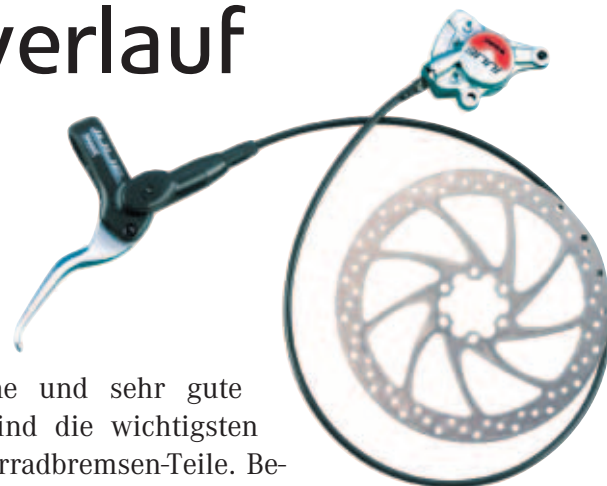


Effizienter Projektverlauf

Polyarylamid-Compounds für Fahrradbremsen-Gehäuse

Wolf Sanner, Rheinberg,
Robert Olz, Bad Urach,
Vito Leo, Brüssel/Belgien, und
Thomas Halcour, Kerpen-Sindorf

Geringes Gewicht, ausgewogenes Festigkeitsprofil, exzellente Oberfläche und sehr gute Gleiteigenschaften sind die wichtigsten Forderungen für Fahrradbremsen-Teile. Berechnungen und ausgiebige Labor- und Praxis-tests haben Polyarylamid (PAMXD6)-Compounds als Werkstoff für diese Sicherheitsbauteile bestätigt.



In enger Zusammenarbeit zwischen der Gustav Magenwirth GmbH & Co., Bad Urach, der A. Schulman GmbH, Kerpen, und Solvay (OEM, Konstrukteur, Spritzgießer und Werkstofflieferant) wurden Bremsengehäuse auf Basis eines Polyarylamid-Compounds (Typ: PAMXD6, Hersteller: Solvay) für die Fahrradbremsen Julie (Titelbild) und Clara entwickelt [1].

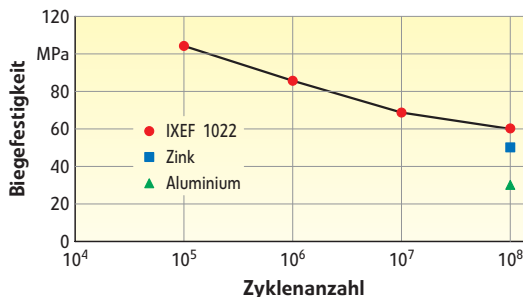
Als Werkstoff für Bremsengehäuse kommt ein glasfaserverstärktes Polyarylamid PAMXD6-GF50 (Typ: IXEF 1022, Hersteller: Solvay Advanced Polymers, Oudenaarde/Belgien) zum Einsatz. Ausschlaggebend für die Verwendung dieses Polyarylamids für Bremsengehäuse ist eine Kombination von Eigenschaften [4] wie:

dingwerte hängen von der Geometrie des Formteils, von Lage und Form der Angüsse sowie vom Grad der Verdichtung beim Abkühlen ab. Bei einer fachgerecht eingestellten Spritzgießmaschine kann von einer Längen- und Quertoleranz von 0,05% ausgegangen werden.

Eigenschaften	PA MXD6-GF50	
E-Modul	GPa	20
Reißfestigkeit	MPa	255

Tabelle 1. Mechanische Eigenschaften des Polyarylamid-Compounds PA MXD6-GF50

Bild 1. Wechselbiegefestigkeit bei 23 °C (Frequenz 25 Hz, 3-Punkt-Biegetest nach ISO 178)



Die Konstrukteure und Entwicklungsingenieure nutzten dabei Finite-Elemente-Berechnungen und rheologische Simulationen [2]. Der erstmalige Einsatz von 3D-Moldflow ersparte allen Beteiligten durch Optimierungen im Vorfeld nachträgliche Nachbesserungsarbeiten und trug somit zu einem effizienteren Projektverlauf bei.

Eigenschaften des Werkstoffs

Polyarylamid (PAMXD6) ist ein teilkristallines, partiell aromatisches Polyamid. Es entsteht durch Polykondensation von m-Xylylendiamin und Adipinsäure nach einem bei Polyamiden üblichen Herstellverfahren [3].

- ▶ **Oberflächenbeschaffenheit:**
PAMXD6-Compounds sind bekannt für ihre ausgezeichnete Oberflächenbeschaffenheit. Die Außenschicht besteht aus reinem Polymer, d.h. aus einer glasfaserfreien Schicht von 1 bis 2 µm Dicke, welche die ausgezeichnete Oberflächengüte bestimmt. Dies ist bei Bremsengehäusen besonders wichtig zur Vermeidung des Stick-Slip-Effekts im Laufbereich des Kolbens sowie für die optischen Eigenschaften im Sichtbereich.
- ▶ **sehr hohe Steifigkeit und Festigkeit:**
Siehe Tabelle 1.
- ▶ **Dimensionsstabilität:**
PAMXD6-GF50 hat eine sehr geringe Verarbeitungsschwindung von durchschnittlich 0,3%. Die tatsächlichen Schwin-

- ▶ **hervorragender Kriechwiderstand:**
PAMXD6-GF50 zeigt einen exzellenten Kriechwiderstand selbst bei hoher Kräfteinwirkung. Die bleibende Verformung nach 1000-stündiger Belastung mit 50 MPa bei 50 °C ist kleiner als 1%.

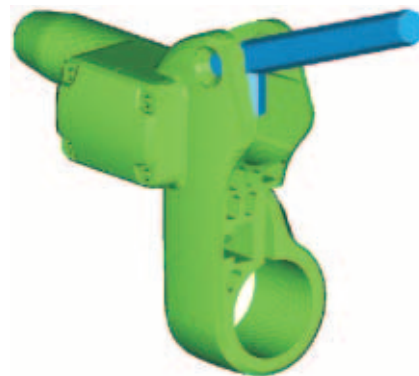


Bild 2. CAD-Modell des Gehäuses der Bremse Clara

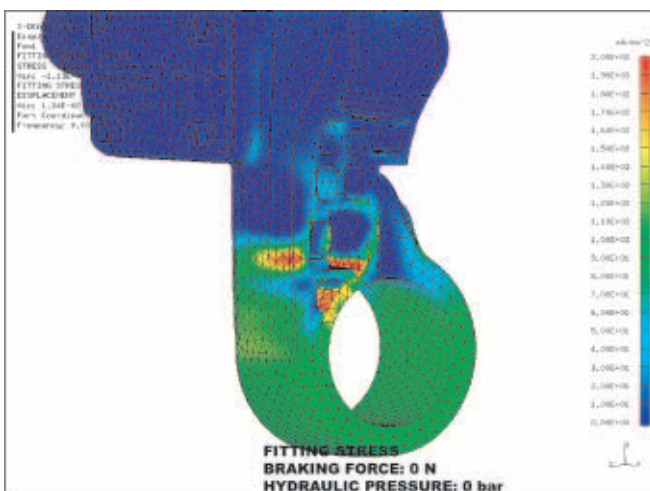


Bild 3. Berücksichtigung des maximal zulässigen Drehmoments zur Gehäusebefestigung am Lenker

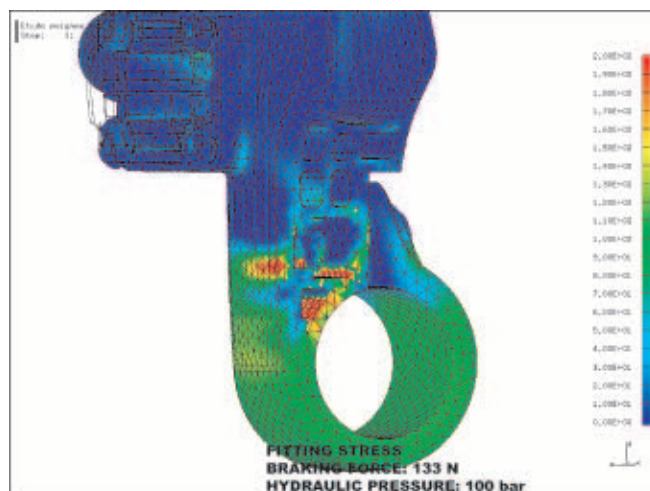


Bild 4. Nenn-Bremskraft, die normal und tangential auf das Gehäuse sowie als interner Druck im Hydraulikzylinder und im Ölausgleichsbehälter wirkt

► **hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen:**

Viele technische Teile müssen dynamischen Langzeitbeanspruchungen widerstehen, z.B. Vibrationen. Aus der Wöhler-Kurve in Bild 1 geht hervor, dass PAMXD6-GF50 nach 10 Mio. Zyklen eine höhere verbleibende Festigkeit aufweist als die Aluminium (AG6)- und Zinklegierung (4% Al, 0,4% Mg).

► **Fließfähigkeit:**

Die hohe Fließfähigkeit von PAMXD6-GF50 hat bei den Bremsgehäusen den Vorteil, dass Einfallstellen weitgehend vermieden werden. Darüber hinaus kann mit einer hohen Geschwindigkeit bei relativ geringen Drücken eingespritzt und damit ein effektiverer Nachdruck erreicht werden, was wiederum zur Vermeidung von Einfallstellen und Verzug beiträgt.

► **Wasseraufnahme:**

Polyarylamid hat im Vergleich mit Standard-Polyamiden, z.B. PA 6 und PA 66, eine deutlich niedrigere und langsamere Wasseraufnahme. PAMXD6-GF50 nimmt bei 50% rel. Luftfeuchtigkeit (23°C) nur ca. 1% Wasser auf.

► **Chemikalienbeständigkeit:**

Das Compound weist eine gute Beständigkeit gegenüber den eingesetzten Hydraulikmedien auf.

Die erste Bremse „Hydro-Stop“ wurde 1987 noch auf dem Reißbrett entwickelt. Prototypen entstanden durch mechanische Bearbeitung, ebenso noch die ersten HS22-Typen. Danach wurde mit CAD in 2D entwickelt. Bei der Entwicklung der ersten Vollkunststoff-Gehäuse aus

PAMXD6-GF50 fand 3D-CAD durchgängig Verwendung. Dies erspart immense Zeit, und die Daten können für STL-Teile und mechanische (FEM) und rheologische Berechnungen herangezogen werden. Bereits im frühen Entwicklungsstadium werden Informationsbesprechungen abgehalten und die Trennebene und Entformungsschrägen sowie Änderungswünsche der Werkzeugkonstruktion und der Fertigung berücksichtigt. Der Zeitvorteil resultiert aus der direkten Weiterverwendung der Geometrie. Es sind keine aufwändigen Anpassungen oder sogar Neukonstruktionen nötig.

FEM-Berechnungen für Clara-Gehäuse

Bei der erstmaligen Umsetzung der Idee einer Vollkunststofflösung wurden die

angedachten konstruktiven Lösungen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) durch Solvay analysiert, um im Vorfeld das mechanische Verhalten der Gehäuse zu prüfen und Verbesserungen vorzunehmen. Auszugsweise werden im Folgenden die Ergebnisse für das Clara-Gehäuse vorgestellt.

Die von Solvay aufbereiteten CAD-Daten wurden für die FEM mit einer Netzstruktur versehen. Einige nicht relevante Teilbereiche, hauptsächlich im Hydraulikzylinder, konnten im Voraus ausgeschlossen werden. Das für die Befestigung des Bremsgehäuses an der Lenkstange benötigte Drehmoment wurde durch einen lokalen Druck simuliert, dessen Wert der maximal zulässigen axialen Belastung entspricht. Die Bremskraft, gekoppelt mit dem Hydraulikdruck im Zylinder, wird mittels eines

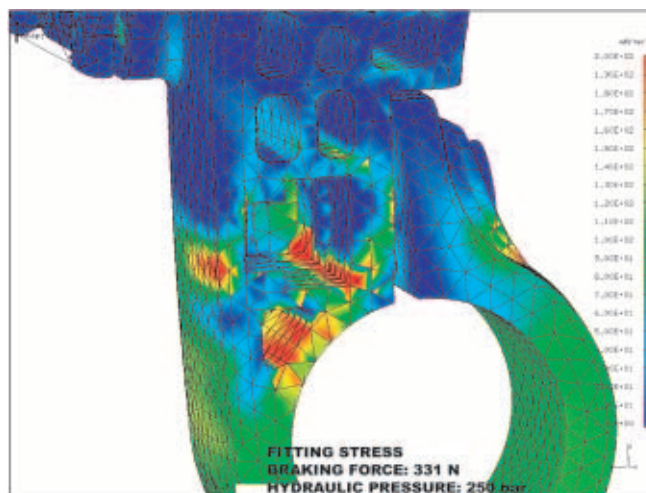


Bild 5. Maximale Bremskraft entsprechend den Rahmenbedingungen aus Bild 4

Historie zu den Werkstoffen für Fahrradbremsen

Seit 1923 beschäftigt sich die Firma Magura (Gustav Magenwirth GmbH & Co, ein Familienunternehmen der Munz-Magenwirth-Gruppe) mit der Entwicklung und Produktion von Motorradkomponenten, genauer mit Lenkern und Komplettarmaturen für motorisierte Zweiräder. Bereits 1987 wurde die Idee umgesetzt, die Erfahrungen und Vorteile der Hydraulik auf Fahrradfelgen- und Scheibenbremsen zu übertragen. Die höhere Bremskraft bei geringerer Handkraft, feine Dosierbarkeit und die Wartungsfreiheit tragen zur erhöhten Kundenzufriedenheit bei.

Begonnen wurde mit der so genannten „Hydro-Stop“, einer aus bearbeiteten Aluminiumgehäusen bestehenden Felgenbremse, die mit einer Polyamid-Hydraulikleitung verbunden ist. Die Bearbeitung der Zylinderbohrung führte zwangsweise zu Riefen und teilweise auch zu Poren durch angeschnittene Lunken. Dieses Manko wurde bei der nächsten Generation HS 22, 24 und 33 durch einen nachträglich montierten Fließpress-Zylinder behoben.

Der Zylinder wurde vorerst in ein bearbeitetes und lackiertes Aluminiumgehäuse eingelegt. Die Bearbeitung erfolgt auf speziell dafür konzipierten mehrstufigen Zellen. Im nächsten Schritt wurden die Fließpresszylinder in einem Spritzgusswerkzeug umspritzt. Dabei muss durch Druckaufnehmer überwacht werden, dass die Zylinder nicht unruhig verdrückt werden. Parallel dazu wird in diversen Versuchswerkzeugen untersucht, ob das Gebergehäuse nicht komplett aus Kunststoff gefertigt werden kann. Verschiedenste, auch hoch geschmierte Werkstoffe wurden Betätigungs- und Dauerlaufversuchen unterzogen. Das größte Problem ist der Stick-Slip-Effekt, ein Ruckeln und Stehenbleiben des im Zylinder sich bewegenden Kolbens. Dieser muss mit O-Ringen bzw. angespritzten Lippendichtungen das System absolut dicht halten.

Das Steckenbleiben des Kolbens hat ein Dauerbremsen zur Folge. Ebenso ist ein zu spätes Lösen für den Rennfahrer nicht akzeptabel. Als sehr guter Zylinder erwies sich eine Bauart aus Duroplast. Die Sprödigkeit des Werkstoffs erschwerte aber die Anschluss- und Sturzproblematik. Mit dem Polyarylamid-Compound (PAMXD6) wurde zu guter Letzt für die Felgenbremse HS 11, für die Scheibenbremsen Clara und Julie und für neue Generationen ein sehr guter Gleitpartner gefunden.

Balkens dargestellt, welcher exakt die Länge sowie den korrekten Winkel des Bremshebels widerspiegelt (Bild 2).

Die Simulation wurde in drei Schritten vollzogen (Bilder 3 bis 6). Die Bilder 3 bis 5 zeigen den Spannungszustand (maximale Zugspannung) in jedem der Analyseschritte. Der maximale Wert auf der Spannungsskala wurde auf 200 MPa gesetzt, sichtbar in den roten Bereichen. Die FEM-Analyse zeigt,

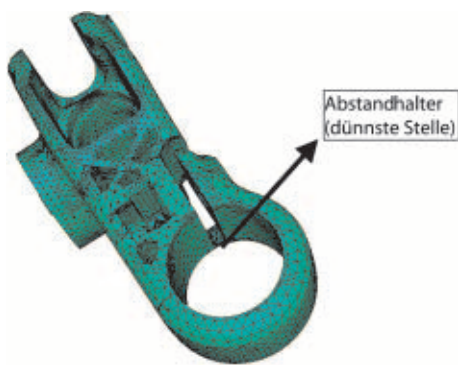


Bild 6. 3D-Moldflow-Modell des Gehäuses der Julie-Fahrradbremse

- ▶ dass die zur Befestigung des Gehäuses am Lenker benötigte Kraft die Hauptspannungsquelle im Gehäuse ist (Bilder 3 bis 5),
- ▶ dass der Effekt der Bremskraft im Vergleich zur Befestigungslast relativ niedrig ist (Bilder 3 bis 5),
- ▶ dass der Einfluss der Entformungsschräge (Konizität) von 2° ziemlich groß ist, und
- ▶ dass die Spannung um so höher liegt, je niedriger die Wanddicke der Verstärkung ist.

Hieraus wurden folgende Verbesserungsmaßnahmen im Befestigungsbereich des Gehäuses abgeleitet und umgesetzt:

- ▶ Erhöhung der Wanddicken im Befestigungsbereich zur Reduzierung des Gesamtspannungsniveaus,
- ▶ Abrundung scharfer Kanten zur Reduzierung der Spannungskonzentration sowie
- ▶ Reduzierung der Konizität von 2 auf 0,5° zur besseren Spannungsverteilung.

3D-Moldflow-Berechnung für Julie-Bremse

Glasfaserverstärkte Thermoplaste neigen durch Faserorientierungen in Verbindung mit einer anisotropen Schwindung zu Verzug. Dies muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Mit Hilfe von numerischen Simulationen kann man das mechanische Design hinsichtlich Schmelzfluss induzierter Probleme optimieren. Zur Analyse der Bremsengehäuse wurde im Vorfeld eine 3D-Formfüllung- und Nachdrucksimulation durchgeführt. Dieses relativ neue Moldflow-Simulationsprogramm wurde von Solvay für das Julie-Gehäuse im vergangenen Jahr erstmals eingesetzt. Die Erfahrung mit ähnlichen Bauteilen zeigt, dass der herkömmliche Mittelflächenansatz für Füllstudien von Formteilen mit starken Wanddicken-Schwankungen nicht präzise genug ist. Die 3D-Software ist geeigneter, das Füllverhalten unter Berücksichtigung des „Thermal-Hesitation-Effect“ besser vorherzusagen.

Zielsetzung der Analyse war die Überprüfung und Optimierung der Binde-naht-Positionen, der Angussauslegung sowie der volumetrischen Schwindungsverteilung.

Geometrie und Füllstudie: Das Gehäuse wird mit einer Schraube an der Lenkstange befestigt (Bild 6). Bei der Erstmontage wird der dünne (1 mm) Abstandhalter zerstört. Diese Sollbruchstel-

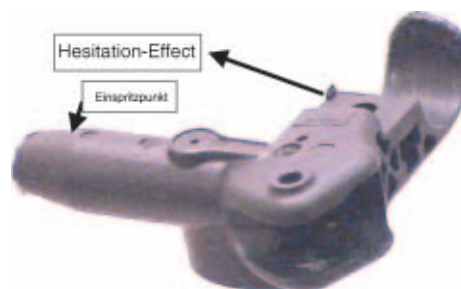


Bild 7. Die Füllstudie stellt den Einspritzpunkt und „Hesitation-Effect“ dar

le dient als provisorischer Abstandhalter, um das Gehäuse leichter an dem Lenker zu montieren. In Anbetracht der Position des Einspritzpunkts spielt der Abstandhalter die Hauptrolle bei der Auswahl der geeigneten Simulation-Software.

Die Füllstudie in Bild 7 zeigt deutlich den sog. „Thermal-Hesitation-Effect“, d.h., die niedrigere Fließgeschwindigkeit und der dünnere Abschnitt tragen

Bild 8. Füllsimulation nach dem Mittelflächen-Modell

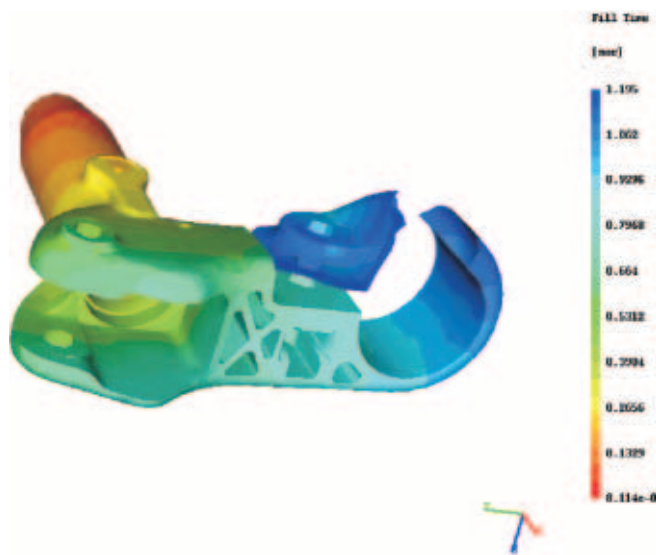
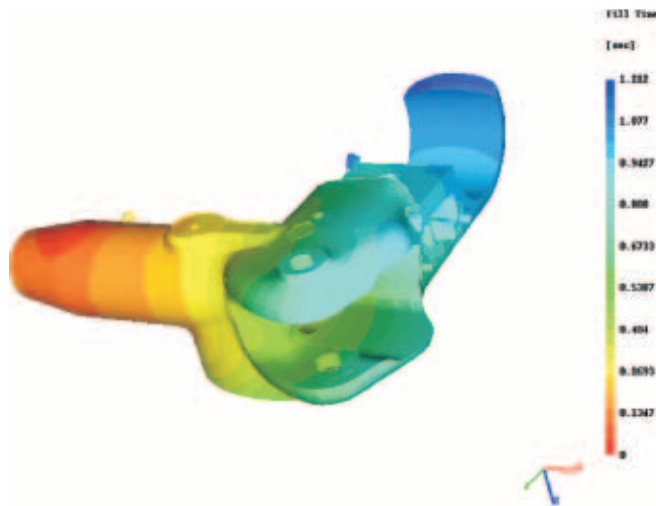


Bild 9. Füllsimulation mittels 3D-Moldflow-Berechnungen



beide zu einer schnellen Abkühlung bei, welche den verfügbaren Schmelzequerschnitt weiter reduziert. Der plötzliche Druckabfall in der Fließeinengung bremst die Fließfront ab.

2D-Mittelflächen- vs. 3D-Methode: Bild 8 stellt die Füllsimulation mit einem Standard-Mittelflächenmodell basierend auf der 3D-CAD-Geometrie dar. Es ist deutlich sichtbar, dass die Schmelze in dieser Simulation die Einengung (Abstandhalter) leicht durchströmt und dadurch eine fehlerhafte Vorhersage der Bindenahtlage im Befestigungsring suggeriert wird.

Die 3D-Füll-Simulation ist dagegen sehr präzise, wie der Vergleich mit der Praxis (Bild 7) zeigt. Das resultiert aus einer realitätsgerechten Bindenaht-Positionierung an der Fließeinengung. Bild 9 zeigt das Ergebnis dieser Analyse basierend auf 390 000 vierflächigen Elementen.

3D-Moldflow-Berechnungen ermöglichen auch die Prognose von problematischen volumetrischen Schwindungsbereichen in Formteilen. Diese erzeugen unerwünschte Hohlräume (sog. Lunker) insbesondere an lokalen Masseanhäufungen. Bild 10 stellt die kritischen Bereiche für das Julie-Gehäuse dar.

3D-Moldflow-Ergebnisse: Die Vorteile des Flow3D-Ansatzes hinsichtlich der Einbeziehung des „Hesitation-Effect“ beruhen auf:

- ▶ einer vollständigen 3D-Lösung der Fließgleichung: Das bedeutet, dass die klassische Hele-Shaw-Approximation nicht genutzt wird. Dies wird dadurch deutlich, dass das Mittelflächenmodell die Kanten rechts und links der Elemente komplett ignoriert, bei dem 3D-Ansatz hingegen vierflächige Elemente eingesetzt werden (Bild 11). Das erzeugt eine zusätzliche Scherung im Bereich des Abstandhalters, welche wiederum einen weiteren Druckabfall indiziert;
- ▶ der zusätzlich erstarrten Schmelzhaut an den Kanten dieser Elemente im dünnwandigen Bereich (Abstandhalter): Dadurch wird der Querschnitt reduziert, was den Druckabfall verstärkt;
- ▶ der Berücksichtigung der Dehnströmung, welche den Druckabfall im Bereich der Querschnittsreduzierung erhöht.

Die Verwendung der Flow3D-Simulation ermöglicht bei diesem komplexen Bau-

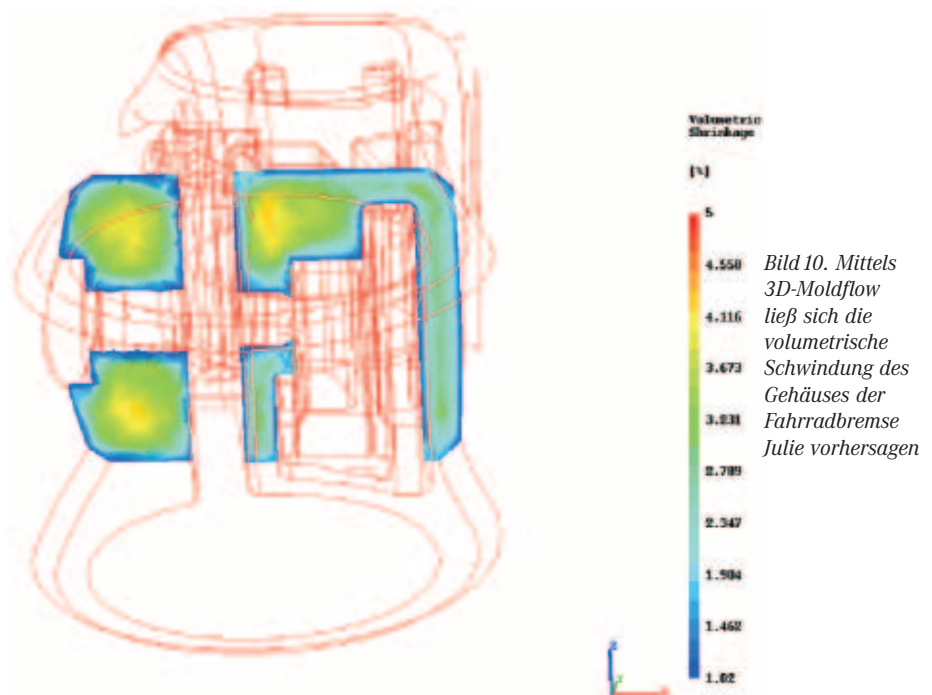


Bild 10. Mittels 3D-Moldflow ließ sich die volumetrische Schwindung des Gehäuses der Fahrradbremse Julie vorhersagen

teil mit erheblichen Wanddicken-Unterschieden, die Bindenaht-Positionen korrekt vorherzusagen und die problematischen Stellen bzgl. Schwindung zu identifizieren. Als Ergebnis der Analyse wurde der Anguss vergrößert und seine Lage verändert, um die hohe Volumenschwindung im dickwandigen Bereich zu vermeiden. Diese Verbesserung ver-

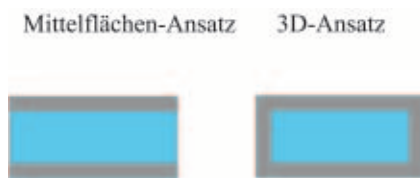


Bild 11. Vergleich von Mittelflächen- und 3D-Ansatz bei der Interpretation der 3D-Moldflow-Ergebnisse

hindert die Lunkerbildung in den kritischen Bereichen und führt letztlich zu optimalen mechanischen Eigenschaften des Bremsengehäuses.

Literatur

- 1 Magura Bike Parts: Produktkatalog 2001
- 2 Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. 2. Aufl., Hanser, München 1999, S. 192-196
- 3 Dominighaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 5. Aufl., Hanser, München 1998, S. 664
- 4 Solvay S. A.: Technisches Handbuch IXEF. 3. Aufl. 2000, S. 1-33

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Kfm. Wolf Sanner, geb. 1966, leitet bei Solvay Advanced Polymers, Rheinberg, Marketing und Verkauf für Technopolymere in Deutschland.
Kontakt: wolf.sanner@solvay.com

Ing. Robert Olz, geb. 1961, ist bei Magura Kunststofftechnik, Bad Urach, zuständig für Markt und Technik.

Kontakt: r.olz@magura.de

Ph.D. Phys. Vito Leo, geb. 1956, leitet bei Solvay, Brüssel, das Advanced Polymers Support Team, hat eine Professur an der Brüsseler Universität ULB inne und gibt Kurse in Polymerverarbeitung.

Kontakt: vito.leo@solvay.com

Dipl.-Ing. Thomas Halcour, geb. 1967, ist bei A. Schulman, Kerpen, Projektmanager im Bereich High Performance Polymers.

Kontakt: thomas.halcour@schulman.de