

HANSER

Leseprobe

Achim Frick, Claudia Stern

Praktische Kunststoffprüfung

ISBN: 978-3-446-40942-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-40942-2>

sowie im Buchhandel.

Änderungen bei der Additivierung oder im Farbpigment, ebenso etwaige Eigenschaftsveränderungen im Polymer infolge Degradation durch die Schmelzverarbeitung der Kunststoff-Formmasse zum Formteil. Dies alles kann zu potentiell auftretenden Schadensfällen im späteren Einsatz führen. Diese Unzulänglichkeiten müssen eindeutig und auch frühzeitig erkannt und vermieden werden. Die Kunststofftechnik benötigt daher heute leistungsfähige Prüftechniken, schnelle und auch automatisierbare Qualitätssicherungsverfahren zur Beschreibung der Güte der verarbeiteten Kunststoff-Formmassen und der daraus hergestellten Teile [1–5].

2.2 Prüfaufgaben

Die Qualifizierung von Kunststoffen und daraus gefertigter Formteile benötigt eine adaptierte Prüftechnik, welche die molekularen, rheologischen und viskoelastischen Eigenschaften der Polymere erfassen und quantifizieren kann [6–11]. Die Infrarotspektroskopie (IR) lässt Polymere identifizieren, die Gelpermeationschromatografie (GPC) kann die Molmasse und Molmassenverteilung eines Polymers bestimmen, im Falle hoch- und höchstmolekularer Produkte ist jedoch die schmelzerheologische Untersuchung mittels Rotationsviskosimeter der GPC für diesen Zweck überlegen. Aus der Lösungsviskosität können im Falle einfach löslicher Polymere ebenfalls Rückschlüsse auf die Molmasse und ihre etwaige Veränderung gezogen werden. Das Fließverhalten der Polymere in verarbeitungstechnisch relevanten Schergeschwindigkeitsbereichen lässt sich mittels der Kapillarviskosimetrie feststellen. Als Ergebnisse finden sich Viskositätskurven, die die Strukturviskosität der untersuchten Polymere für unterschiedliche Temperaturen oder Einzelpunktmesswerte bei definierten Prüfbedingungen (MFR) beschreiben. Polymere besitzen viskoelastische Eigenschaften, d. h. sie verhalten sich zeit- und temperaturabhängig unterschiedlich. Dies hat zur Folge, dass sowohl deren rheologische (fließtechnische) Eigenschaften als auch deren Festkörpereigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur und Beanspruchungsfrequenz zu betrachten sind. Für den Festkörper ist deshalb der Einfluss der quasistatischen, der kurzzeitigen, nämlich schlagartigen Belastung, der langzeitigen und auch der dynamischen Belastung auf die Lebensdauer zu unterscheiden, wobei die Belastungsart jeweils Zug, Druck, Biegung oder Schub sein kann. Für die Ermittlung der thermischen Eigenschaften von Polymeren dienen die Verfahren der Thermoanalyse, als da sind die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), die Dynamisch mechanische Analyse (DMA), die Thermogravimetrie (TGA) und die Dilatometrie oder thermomechanische Analyse (TMA). Sie liefern Aussagen zum kalorischen, thermomechanischen, thermogravimetrischen und zum Wärmeausdehnungsverhalten. Das äußere Erscheinen von Polymerwerkstoffen und daraus gefertigter Formteile lässt sich durch visuelle und lichtmikroskopische Untersuchung im Auflicht, auch mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie erfassen.

Innere Ungängen in polymeren Proben detektieren zerstörungsfreie Prüfverfahren. Die einfache Röntgendurchstrahlungsprüfung oder die rechnergestützte, auf einer Röntgendurchstrahlungsprüfung basierende Computertomografie (CT) sind dabei flächig bildgebende Verfahren. Die Ultraschallprüfung (US) dagegen arbeitet nur punktuell. Für die Untersuchung einer Probe in der Fläche mittels US muss die Probe mäanderförmig abgerastert werden.

Die mikroskopische Gefügestruktur polymerer Werkstoffe dagegen lässt sich an Dünnschnitten mittels durchlichtmikroskopischen Untersuchungen unter Einsatz der Licht- bzw. Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) feststellen, wobei die dazu erforderlichen Dünnschnitte mit Hilfe eines Mikrotoms oder Ultramikrotoms hergestellt werden.

Neben den bereits erwähnten Prüfverfahren für Kunststoffe existieren noch eine Reihe weiterer Prüfungen, die der Ermittlung der chemischen, elektrischen, physikalischen und sonstigen Eigenschaften dienen. Die folgende Tabelle 2.1 verzeichnet wichtige, praxisrelevante kunststofftechnische Prüfaufgaben und gibt Hinweise auf Prüfverfahren, die geeignet sind, die jeweilige Fragestellung zu lösen.

Tabelle 2.1 Häufige prüftechnische Fragestellungen und dafür geeignete Prüfungen

Prüftechnische Fragestellung	Mögliche Prüfverfahren
Äußere Fehlstellen	→ <i>siehe äußere Merkmale</i>
Äußere Merkmale	→ <i>siehe äußere Fehlstellen</i> Visuelle Prüfung Lichtmikroskopie Elektronenmikroskopie
Bindenahtqualität	→ <i>siehe Nukleierung</i> Festigkeitsprüfung an Bindenaht-Proben
Eigenspannungen	Spannungsoptik Tauchttest Warmlagerung → <i>siehe Verzug</i>
Farbkonzentratqualifizierung	→ <i>siehe Bindenahtqualität</i> → <i>siehe Festigkeitsprüfung</i> → <i>siehe Nukleierung</i> Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
Fasergehalt	→ <i>siehe Füllstoffgehalt</i>
Faser-Matrix-Kopplung	Kaltbruch/Rasterelektronenmikroskopie (REM)
Faserschlichte	→ <i>Faser-Matrix-Kopplung</i>
Festigkeitsprüfung (kurz-, langfristig)	Zug-, Druck-, Biegeprüfung Schlagprüfung Kriech-, Relaxationsverhalten
Feuchtegehalt	→ <i>siehe Konditionierzustand</i> Feuchtemessung
Fließfähigkeit	Kapillarviskosimetrie (Schmelz-, Lösungsviskosität, Schmelzefließrate (MFR))
Flüchtige Bestandteile	Thermogravimetrie (TGA)
Füllstoffcharakterisierung	Untersuchung des Glührückstandes und des beinhaltenden Füllstoffs nach Bestimmung des Glührückstandes

Tabelle 2.1 (Fortsetzung) Häufige prüftechnische Fragestellungen und dafür geeignete Prüfungen

Prüftechnische Fragestellung	Mögliche Prüfverfahren
Füllstoffgehalt	→ siehe Fasergehalt → siehe Füllstoffcharakterisierung Bestimmung des Glührückstandes Thermogravimetrie (TGA)
Gefügeuntersuchung	→ <i>siehe Morphologie</i> Dünnschnitt/Dünnschliff/Durchlichtmikroskopie Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
Geometrie	Maße
Innere Fehlstellen	Schliffbilduntersuchung am Querschnitt Computertomographie (CT) Röntgendurchstrahlungsprüfung Ultraschallprüfung
Integrale Qualitätseigenschaften	Dichtemessung Härteprüfung Massebestimmung
Konditionierzustand	→ <i>siehe Feuchtegehalt</i>
Medienbeständigkeit	→ <i>Quellverhalten</i> Änderung der Festigkeitseigenschaften Härteänderung Masseänderung
Molmasse	Gelpermeationschromatografie (GPC) → <i>siehe Fließfähigkeit</i>
Morphologie	→ <i>siehe Gefügeuntersuchung</i>
Nachschwindung	Warmlagerung/→ <i>Geometrie</i>
Nukleierung	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) → <i>siehe Schmelz- und Kristallisationsverhalten</i>
Polymerabbau	→ <i>siehe Polymerdegradation</i> → <i>siehe Festigkeitsprüfung</i> → <i>siehe Fließfähigkeit</i> → <i>siehe Molmasse</i> Schlagprüfung
Polymerdegradation	→ <i>siehe Polymerabbau</i>
Quellverhalten	→ <i>siehe Medienbeständigkeit</i>
Rezyklateinsatz	→ <i>siehe Rezyklatqualifizierung</i>
Rezyklatqualifizierung	→ <i>siehe Festigkeitsprüfung</i> → <i>siehe Fließfähigkeit</i> → <i>Rezyklateinsatz</i> Schlagprüfung

Tabelle 2.1 (Fortsetzung) Häufige prüftechnische Fragestellungen und dafür geeignete Prüfungen

Prüftechnische Fragestellung	Mögliche Prüfverfahren
Schadensanalyse	→ <i>siehe äußere Merkmale</i> Versagensrekonstruktion und -nachweis
Schmelz- und Kristallisationsverhalten	→ <i>Nukleierung</i> Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
Schwindung	Geometrieabweichung (→ <i>Geometrie</i>) → <i>Nukleierung</i>
Temperatureinsatzgrenzen – Anwendung	Dynamisch mechanische Analyse (DMA)
Temperatureinsatzgrenzen – Verarbeitung	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
Verarbeitungstemperaturgrenzen	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
Verzug	Geometrieabweichungen (→ <i>Geometrie</i>)
Vollständigkeit	Masse
Werkstoffidentifikation	Brennprobe Dichtemessung Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) Infrarotspektroskopie (IR) Thermogravimetrie (TGA)
Zersetzungsverhalten	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) → <i>Temperatureinsatzgrenzen – Verarbeitung</i>

2.3 Auftretende Fehler

An Formteilen aus Kunststoff lassen sich verschiedene mögliche Fehler feststellen, viele von ihnen besitzen fertigungsbedingte Ursachen [12–15]. Wesentliche Fehler, die aus der Fertigung herrühren, sind nachfolgend aufgezählt. Sie werden in den folgenden Kapiteln in der genannten Reihenfolge detailliert beschrieben und es finden sich auch Hinweise für deren Vermeidung.

- Fadenbildung (Kapitel 2.3.1)
- Kalter Pfropfen (Kapitel 2.3.2)
- Freistrahlbildung (Kapitel 2.3.3)
- Lufteinschlüsse (Kapitel 2.3.4)
- Dieseleffekt (Kapitel 2.3.5)
- Unvollständige Füllung (Kapitel 2.3.6)

- Einfallstellen (Kapitel 2.3.7)
- Überspritzungen (Kapitel 2.3.8)
- Lunker (Kapitel 2.3.9)
- Blasenbildung (Kapitel 2.3.10)
- Bindenaht (Kapitel 2.3.11)
- Schlierenbildung (Kapitel 2.3.12)
 - Farbschlieren
 - Verbrennungsschlieren
 - Glasfaserschlieren
 - Feuchtigkeitsschlieren
 - Luftschlieren
- Glanzunterschiede (Kapitel 2.3.13)
- Matte Stellen (Kapitel 2.3.13)
- Dunkle Punkte (Kapitel 2.3.14)
- Schallplatteneffekt (Kapitel 2.3.15)
- Ablätterungen an der Formteiloberfläche (Kapitel 2.3.16)
- Belagbildung (Kapitel 2.3.17)
- Entformungsfehler (Kapitel 2.3.18)
 - Auswerferabdrücke
 - Auszugsmarkierungen
 - Deformation beim Entformen
- Verzug (Kapitel 2.3.19)
- Schrumpfung (Kapitel 2.3.20)
- Weißbruch (Kapitel 2.3.21)
- Spannungsriss (Kapitel 2.3.22)

Einige der genannten Fehler sind äußerlich erkennbar, manche liegen innen im Formteil und sind damit nicht einfach sichtbar. Falls eine Einfärbung eines Formteils nicht zwingend erforderlich ist, sollten die Teile naturfarben und damit hellfarben bzw. transparent erzeugt werden. Damit lassen sich bereits viele der Fehler durch einfache, visuelle Inspektion erkennen und auch frühzeitig vermeiden.

2.3.1 Fadenbildung

Eine Fadenbildung kann beim Spritzgießen sowohl am Anguss (Bild 2.2) als auch am Formteil auftreten. Im Falle einer Kaltkanalanbindung können beim Entformen der Angussstange aus dem Werkzeug Fäden aus der heißen und offenen Maschinendüse gezogen werden, welche möglicherweise zu produktionstechnischen Störungen führen.



Bild 2.2 Fadenbildung an der Angussstange

Durch den Einsatz von Verschlussdüsen lässt sich dieser Nachteil vermeiden, andererseits steigt hiermit das Risiko auf mögliche „schwarze Punkte“ im herzustellenden Formteil, weil sich diese in so genannten Totzonen der Verschlussdüse bilden können, wenn Schmelzeanteile dort verbleiben und so lange Zeit verweilen. Bei schwarzen Punkten dieser Art handelt es sich um Partikel aus thermisch abgebautem Polymerwerkstoff, die als optischer Mangel in hellfarbenen Formteilen oder im Falle größerer Partikel auch als mechanische Fehlstellen wirken. Schwarze Punkte lassen sich visuell und durch mikroskopische Untersuchung im Auflicht feststellen, die Mikroanalyse, beispielsweise mittels Infrarotmikroskopie (Mikro-IR), dient ihrer stofflichen Identifikation.

Bei einer direkten Anbindung des Formteils über einen Heißkanal kann sich auch ein Faden am Formteil bilden, wenn dieses von der Heißkanalspitze abgetrennt und entformt wird.

Eine Fadenbildung, insbesondere bei Kaltkanalwerkzeugen, stellt weniger einen direkten Qualitätsmangel im Formteil dar, als vielmehr eine potentielle Ursache für Prozessstörungen und damit mögliche Prozessunterbrechungen, die schließlich in ihren Auswirkungen zu einer uneinheitlichen Teilequalität führen können. Streut die Teilequalität, kann dies ein Hinweis auf eine Fadenbildung sein. Feststellen lässt sich eine Fadenbildung dann nur durch eine Auditierung des laufenden Fertigungsprozesses.

2.3.2 Kalter Pfropfen

Erkaltete Formmasse, die aus der Maschinendüse in das Werkzeug gelangt, kann hier Fließquerschnitte in unzulässiger Weise verschließen und somit zu einer gestörten Formteilkfüllung beitragen. Zentral angeschnittene Formteile können dadurch beispielsweise eine Bindenaht aufweisen, indem die Schmelze den eingetragenen Pfropf umströmt und am Zusammenfluss eine Fließnaht ausbildet. Ein im Formteil existierender, kalter Pfropfen kann auch als mechanische Fehlstelle im Gefüge eines Formteils wirken und dessen Festigkeit durch lokale Kerbwirkung reduzieren. In diesem Fall wirkt er wie ein unaufgeschmolzenes Granulat Korn einer fremden Formmasse.

Abhilfe lässt sich dadurch erreichen, dass der Anguss mit einem Pfropfenfänger ausgebildet wird, wodurch sicher nur warme Schmelze in die Formteilkavität eingetragen wird (Bild 2.3).



Bild 2.3 Pfröpfen in Verlängerung der Angussstange (auswerferseitig)

Ein kalter Pfröpfen im Formteil ist ein ernst zu nehmender Qualitätsmangel, da er zu einem mechanischen Festigkeitsproblem Anlass geben kann.

Wenn beim Spritzgießen mit einem Mehrfachwerkzeug statistische Qualitätsprobleme bei einzelnen Kavitäten auftreten, dann kann die Bildung kalter Pfröpfen die Ursache dafür sein. Der kalte Pfröpfen wird in dem Fall nach dem Zufallsprinzip in eines der Formnester eingetragen und bewirkt dort einen Qualitätsmangel des betreffenden Formteils. Wird ein kalter Propfen als Fehlerursache im Formteil vermutet, dann gibt eine mikroskopische Untersuchung des Gefüges des betroffenen Formteils hierüber Aufschluss. Untersuchungen am Dünnschnitt oder Schliff sind dazu geeignet, diese Frage zu klären. In einem solchen Fall ist auch die konstruktive Auslegung des Angusses zu überprüfen.

2.3.3 Freistrahlbildung

Beim Spritzgießen wird verfahrenstechnisch angestrebt, die Formteilkavität im Quellfluss zu befüllen. Dies lässt sich weitgehend dadurch erreichen, dass die in die Kavität eintretende Schmelze möglichst anschnittnah in der Kavität auf eine Prallfläche trifft und von dieser reflektiert die Werkzeughöhhlung dann weiter befüllt. Damit behält die Kunststoffschmelze besser ihre gewünschte Massetemperatur, kühlt im Verlauf der Füllung langsamer ab, und es wird somit eine Formteillfüllung bei weitgehend einheitlicher und hoher Temperatur erreicht. Befüllt die Schmelze hingegen bei hoher Einspritzgeschwindigkeit und ohne Prallhindernis die Formteilkavität im freien Strahl, dann bilden sich zunächst „Würstchen“ aus, die erst anschließend mit Formmasse umschlossen werden und ein extrem inhomogenes Formteilgefüge ergeben (Bild 2.4 und 2.5).

Bild 2.4 zeigt die verschiedenen Auswirkungen zweier unterschiedlicher Anschnittausbildungen (Punkt- und Fächeranschnitt) auf das Formfüllverhalten. Der Fächeranschnitt bewirkt vergleichsweise eine Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze zum Eintritt in die Kavität hin und verhindert so die Freistrahlbildung, wiewohl auch hier in Richtung des freien Raumes der Kavität eingespritzt wird. Die Freistrahlbildung führt zu einer inhomogenen Gefügestruktur im Formteil (Bild 2.5), was mit reduzierten Festigkeitseigenschaften verbunden ist.



Bild 2.4 Auswirkung eines Fächer- und Punktanschnitts auf die mögliche Ausbildung eines Freistrahls während der Formfüllung



Bild 2.5 Unter Freistrahlsbildung spritzgegossenes Formteil



Bild 2.6 Formteil aus amorphem Kunststoff mit Freistrahlsbildung; Freistrahls liegt als kalte Seele eingebettet im Formteil

In Formteilen aus transparentem Kunststoff lässt sich eine Freistrahlsbildung gegebenenfalls visuell im Durchlicht erkennen (Bild 2.6). Sind die Teile dagegen undurchsichtig, dann gibt nur eine Gefügeuntersuchung Aufschluss über die vorliegende Homogenität.

Bei bestehenden Spritzgießwerkzeugen liefern auch Teilfüllungsstudien bei sonst unveränderten Fertigungsparametern Hinweise auf eine etwaige Freistrahlsbildung und können Ausgangspunkt für weitere, fertigungstechnische Optimierungen sein (Bild 2.7).



Bild 2.7 Partielle Freistrahlsbildung im Inneren eines Formteils während seiner Herstellung

Niederdruckkapillarviskosimeter dienen der Bestimmung der Viskositätszahl von thermoplastischen Kunststoffen in verdünnter Lösung; es finden hier meist so genannte Ubbelohde-Kapillaren Anwendung. Ein festgelegtes Flüssigkeitsvolumen V läuft bei diesem Verfahren bei gleich bleibendem Druck p (Umgebungsdruck) durch eine Kapillare der Länge l mit dem Radius r und es wird die dafür benötigte Auslaufzeit ermittelt (siehe Kap. 3.5.3).

Mit Hilfe der Viskosimetrie lässt sich auch das Fließverhalten von Kunststoffschmelzen untersuchen. Es werden *Hochdruckkapillarviskosimeter* verschiedener Bauart eingesetzt, bei denen die zu untersuchende Schmelze unter Druck durch eine Kapillare gepresst wird. Die Bestimmung der Schmelze-Massefließrate bzw. Schmelz-Volumenfließrate („Schmelzindexprüfung“) stellt eine Einpunktmessung dar. Es wird das Schmelzeausfließverhalten bei einem bestimmten Druck (Stempellast) und gegebener Temperatur bestimmt. Für die Untersuchung des Fließverhaltens polymerer Schmelzen in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit und Temperatur dienen Hochdruckkapillarviskosimeter (HKV). Sie erlauben Mehrpunktmessungen zur Charakterisierung der Strukturviskosität von Polymerschmelzen. Dabei wird die Schmelzeviskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit und Temperatur gemessen.

Die mehrpunktbasierte Viskositätsmessung besitzt eine höhere Aussagekraft als die Einpunktmessung.

Die Untersuchung des Fließverhaltens von Kunststoffschmelzen im verarbeitungsrelevanten Schergeschwindigkeitsbereich liefert Aussagen über die Verarbeitungsfähigkeit (Schmelzeviskosität) von Kunststoff-Formmassen, ihre Strukturviskosität und die Molmassenverteilung. Eine ausgeprägte Strukturviskosität einer Formmasse begünstigt Überspritzungen und die Schwimmhautbildung bei der Herstellung von spritzgegossenen Formteilen.

Die Kenntnis des Fließverhaltens ist wichtig für die Festlegung von günstigen Verarbeitungsprozessbedingungen, die Fließfähigkeit lässt sich auch als Qualitätskriterium in der Wareneingangskontrolle, im Rahmen der Qualitätssicherung hergestellter Formteile und im Zusammenhang mit dem Recycling von Kunststoffen nutzen.

Die Viskositätsmessung kann auch für die Beurteilung von Problemfällen eingesetzt werden. Wenn sich die Fließeigenschaften eines Polymers gegenüber einem Ausgangszustand verändert haben, dann gibt dies Hinweis auf eine mögliche Schädigung der Makromoleküle beispielsweise durch eine Wärmealterung, einen Medieneinfluss (Chemikalienangriff) oder Fehler während der Verarbeitung des Kunststoffs. Viskositätsmessungen können dazu Aussagen liefern.

3.6.2.1 Schmelze-Massefließrate und Schmelze-Volumenfließrate

Die Schmelze-Massefließrate (MFR) (früher: Schmelzindex, engl.: „*Melt Flow Rate*“) oder auch die Schmelze-Volumenfließrate (MVR) (früher: Volumenfließindex, engl.: „*Melt Volume Rate*“) dienen zur einfachen, schnellen und quantitativen Charakterisierung des Schmelze-fließverhaltens von Kunststoffen mit einem einzigen Zahlenwert [82–85].

Der MFR- bzw. der MVR-Wert geben die Masse bzw. das Volumen an, welches unter definiertem Druck und definierter Temperatur innerhalb von 10 min durch eine genormte Düse strömt. Die Schmelze fließrate von Kunststoffen wird durch die Temperatur und die Schergeschwindigkeit bestimmt. Deswegen lassen sich nur Werte vergleichen, die unter gleichen Prüfbedingungen gemessen wurden.

Tabelle 3.19 Schmelzefließrate und mittlere Molmasse für homopolymeres Polypropylen (PP)

MFR-Wert (230/2,16) [g/10 min]	Mittlere Molmasse [g/mol]	Anwendung
0,3	1 000 000	Hochmolekulares Polymer
0,9	800 000	Hochmolekulares Polymer
3,5	580 000	Flachfolienextrusion
20	260 000	Spritzgießen
55	100 000	Spritzgießen mit langen Fließwegen
bis 200		Dünnwandspritzgießen

Die Schmelzefließrate wird mit steigender Molmasse eines Kunststoffes geringer, der Kunststoff fließt schwerer. Ist ein Kunststoff niedermolekular, dann fließt er leicht und die Schmelzefließrate ist entsprechend hoch. Wird ein hochmolekularer Kunststoff molekular abgebaut, d. h. werden seine Ketten verkürzt, dann fließt er ebenfalls leichter und die Schmelzefließrate steigt entsprechend an.

Übliche MFR-Werte liegen zwischen 0,5 g/10 min und 40 g/10 min.

Tabelle 3.19 zeigt am Beispiel von PP-Formmassen den Zusammenhang zwischen den MFR-Werten und mittlerer Molmasse. Es werden mögliche Anwendungsgebiete für die verschiedenen PP-Typen genannt.

Der MVR-Wert lässt sich im Rahmen eines automatisierten Prüflabors einfacher messen als der MFR-Wert. Die Kunststoffrohstoffhersteller bevorzugen deshalb die MVR-Angabe. Bei Laborprüfungen wird oft der MFR-Wert gemessen.

Beide Schmelzefließprüfungen (MFR und MVR) stellen Einzelmessungen dar. Das Fließverhalten der untersuchten Probe wird nur bei einer bestimmten Schergeschwindigkeit gemessen. Die Werte dienen bevorzugt als Vergleichskennwerte zur Charakterisierung des Fließverhaltens von unterschiedlichen Kunststoffen. Sie geben nur bedingt Auskunft über das Verarbeitungsverhalten unter Verarbeitungsprozessbedingungen beim Spritzgießen oder Extrudieren.

Die Schmelzefließprüfung findet Einsatz in der Wareneingangskontrolle zur stofflichen Charakterisierung und Identifizierung der untersuchten Formmasse. Sie dient auch zur Untersuchung der Qualität von Halbzeugen und Formteilen aus thermoplastischen Kunststoffen im Hinblick auf einen möglichen Abbau des Kunststoffes durch die Verarbeitung. Ein verarbeitungsbedingter Molekülabbau (prozessbedingt oder bei Rezyklat) zeigt sich durch eine gegenüber dem Ausgangszustand erhöhte Schmelzefließrate. Als Ausgangszustand wird die Schmelzefließrate der Formmasse vor der Verarbeitung (Granulat) oder die der Neuware betrachtet.

Die Schmelzefließprüfung findet bevorzugt bei schwer löslichen Kunststoffen (z. B. PE, PP, POM) Anwendung. Bei hygroskopischen und leicht löslichen Kunststoffen (z. B. PA, PBT, PC, PET) wird meist die Lösungsviskosität bestimmt. Eine Schmelzefließprüfung an beispielsweise Polyamidformmassen ist möglich, sie erfordert allerdings ein sehr sorgfältiges Vorgehen. Insbesondere die einheitliche Vortrocknung der Proben vor der Messung ist wichtig. Ist dies nicht

gewährleistet, dann werden stark streuende Messwerte ermittelt, und es ist kein Vergleich der ermittelten Daten möglich. Dieses Verfahren ist nicht oder nur sehr bedingt für Kunststoffe anwendbar, deren rheologisches Verhalten durch Kondensations- oder Vernetzungsreaktionen beeinflusst wird.

Bei schlagzähmodifizierten, löslichen Kunststoffen ist die Bestimmung der Lösungsviskosität meist nicht möglich, in solchen Fällen kann die Schmelzfließprüfung möglicherweise Vorteile bieten. Die Schmelzfließrate erweist sich beim Vergleich von ungefüllten und gefüllten Thermoplasten nützlich.

Durchführung

Als Prüfgerät zur Bestimmung der Schmelzfließrate (MFR und MVR) dient ein einfaches Kapillarviskosimeter (Bild 3.35).

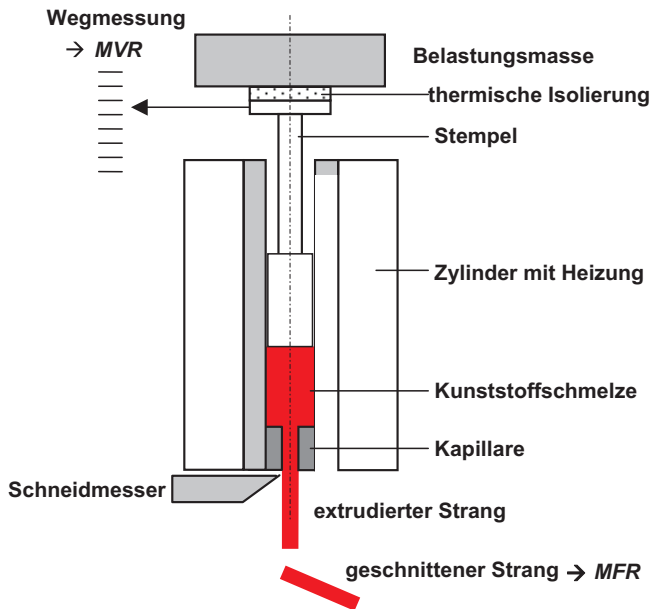


Bild 3.35 Prüfgerät zur Bestimmung der Schmelze-Massefließrate MFR oder Schmelze-Volumenfließrate MVR (schematisch)

Schmelze-Massefließrate (MFR)

Die Prüfung darf nur mit einem zuvor sauber gereinigten Prüfgerät erfolgen. Zylinder und Stempel werden 15 Minuten vorgeheizt, anschließend wird der Zylinder mit etwa 5 g Probengranulat befüllt. Formteile sind vor einer Messung in geeigneter Weise zu zerkleinern. Während des Befüllens des Zylinders wird das Material mit einem Verdichtungsstab unter manuellem Druck komprimiert. Es ist auf eine weitgehend luftblasenfreie Befüllung zu achten. Zur Vermeidung von Oxidationsreaktionen ist der Füllvorgang innerhalb von einer Minute abzuschließen. Der Stempel wird unbelastet in den befüllten Zylinder eingeführt.

Nach Verweilzeit von 4 Minuten- sie dient dem vollständigen Aufschmelzen der Probe- wird der Stempel mit der gewählten Belastungsmasse belastet und die Messung gestartet. Der Stempel sinkt unter Wirkung der Schwerkraft abwärts und extrudiert einen Schmelzestrang durch die Düse (Kapillare).

Die aus der Düse austretenden Stränge dienen zur Auswertung. Sie werden nach einem definierten Zeitintervall geschnitten, sollen blasenfrei sein und nach Norm eine Länge zwischen 10 mm und 20 mm aufweisen. Mindestens 3 Stränge sind auszuwerten, sie werden auf 1mg genau gewogen. Sind die Massenunterschiede der Stränge größer als 15 %, so ist die Messung zu verwerfen bzw. zu wiederholen.

Prüftemperaturen und Belastungsmassen sind der jeweiligen Norm zu entnehmen oder zu vereinbaren. Übliche Prüftemperaturen T sind: 125 °C, 150 °C, 190 °C, 200 °C, 220 °C, 230 °C, 250 °C, 280 °C und 300 °C. Übliche Prüfmassen m_0 sind: 0,325 kg, 1,20 kg, 2,16 kg, 3,80 kg, 5,00 kg, 10,00 kg und 21,60 kg. Die Schmelze-Massefließrate (MFR) in g/10 min ermittelt sich aus der Masse m des in der Zeit Δt aus der Düse extrudierten Schmelzestranges. Gleichung (3.50) gilt für ein Zeitintervall von 60 s [84].

$$\text{MFR}(T/m_0) = \frac{600 \cdot m}{\Delta t} \quad (3.50)$$

Es bedeuten:

T Prüftemperatur in °C

m_0 Prüflast (Masse) in kg

m Mittelwert der Masse der extrudierten Schmelzestränge in g

Δt Zeitintervall für die Extrusion des Schmelzestranges (= Intervall für das Abschneiden) in s

Achtung:

Beim Befüllen des Prüfzylinders ist streng auf Blasenfreiheit zu achten, andernfalls ergeben sich blasenbehaftete Schmelzestränge bei der Messung, die Messfehler verursachen. Das Verfahren ist für hydrolyseempfindliche, hygroskopische Kunststoffe (z. B. Polyamide) schwierig anzuwenden. Es lassen sich nur bei definierter und einheitlicher Vortrocknung der Proben und einheitlicher Schmelzeverweilzeit zuverlässige und damit vergleichbare Messwerte erzielen. Füll- und Verstärkungstoffe beeinflussen das Fließverhalten, werden aber mitgeprüft. Es können nur nach einheitlichen Prüfbedingungen (Temperatur, Belastungsmasse und Verweilzeit) gemessene Werte verglichen werden.

Tabelle 3.20 nennt für unterschiedliche thermoplastische Kunststoffe typische Prüfbedingungen für die Bestimmung der Schmelzefließrate.

Tabelle 3.20 Typische Prüfbedingungen für die Bestimmung der MFR- und MVR-Werte für verschiedene Kunststoffe

Kunststoff	Prüfbedingungen	
	Temperatur [°C]	Belastungsmasse [kg]
ABS	220	10
PC	300	1,2
PMMA	230	2,6
POM	190	2,16
PP	230	2,16
PS	200	5
SAN	220	10

Ergebnis

Die Fließfähigkeit von Kunststoffschmelzen wird durch die Temperatur und Schergeschwindigkeit bestimmt, deshalb müssen zu den gemessenen MFR- und MVR-Werte stets die Prüfbedingungen (Temperatur/Belastungsmasse) angegeben werden.

Beispiel: $MFR(190/2,16) = 5 \text{ g}/10 \text{ min}$

Das bedeutet eine gemessene Schmelze-Massefließrate (MFR) von 5 g/10 min bei einer Temperatur von 190 °C und einer Belastungsmasse von 2,16 kg. Nur mit der Angabe MFR oder MVR ist der Messwert eindeutig bestimmt, indem sich ein Messverfahren zuordnen lässt. Viele Kunststoffrohstoffhersteller geben Werte für die Schmelzefflüssen ihrer Formmassen an, manche beziehen sich auch in ihrer Nomenklatur auf die Schmelzefflüssen (Tabelle 3.21).

Die Schmelzefflüssen ist eine absolute Maßzahl zur einfachen Charakterisierung des Fließverhaltens von Kunststoffen mit einem einzigen Zahlenwert. Mit wachsendem MFR-Wert verbessert sich die Fließfähigkeit einer Formmasse (Tabelle 3.21). Das Fließratenverhältnis MFR/MVR entspricht der Dichte der Polymerschmelze; eine gewisse Unschärfe von Broschürendaten wird deutlich.

Tabelle 3.21 Handelsbezeichnungen von copolymeren POM-Formmassen der Firma Ticona mit den zugehörigen Werten für die Schmelzefflüssen

Nomenklatur	MFR (190/2,16) [g/10 min]	MVR (190/2,16) [cm ³ /10 min]	MFR/MVR [-]	Bemerkung
Hostaform C2521	2,5	2,2	1,136	zähfließend
Hostaform C9021	9,0	8	1,125	normal fließend
Hostaform C13021	13,0	12	1,083	leicht fließend
Hostaform C27021	27,0	24	1,125	extrem leicht fließend

Tabelle 3.22 Einteilung der Verarbeitbarkeit von PP-Formmassen nach der Schmelze-Massefließrate

MFR [g/10 min]	Verarbeitbarkeit
0,3 – 0,6	sehr zähe Extrusionsformmasse
2,0 – 10	leicht fließende Extrusionsformmasse, zähe Spritzgießformmasse
20 – 30	leicht fließende Spritzgießformmasse
20 – 300	Formmassen zum Beschichten und Sintern

Kunststoff-Formmassen können nach dem MFR-Wert in ihre Verarbeitbarkeit unterschieden werden (Tabelle 3.22).

Für die Extrusion werden Formmassen mit höherer Schmelzeviskosität und demzufolge einem niedrigen MFR-Wert verwendet (Tabelle 3.22). Diese Formmassen besitzen eine höhere mittlerer Molmasse. Im Gegensatz dazu finden niedermolekulare Formmassen mit geringerer Schmelzeviskosität und höherem MFR-Wert für das Spritzgießen Verwendung.

Schmelze-Volumenfließrate (MVR)

Normung, Anwendungsbereich, Messgerät und Prüfvorbereitung gelten entsprechend der Schmelze-Massefließratenbestimmung MFR. Bei der MVR-Prüfung wird der Weg des Stempels auf $\pm 0,1$ mm genau gemessen.

Die Schmelze-Volumenfließrate (MVR) wird aus dem Volumen des in der Zeit Δt aus der Düse extrudierten Schmelzestranges ermittelt. Der MVR-Wert in $\text{cm}^3/10$ min errechnet sich nach Gleichung (3.51) für ein Zeitintervall von 60 s wie folgt [82, 84]:

$$\text{MVR}(T/m_0) = \frac{600 \cdot A \cdot l}{\Delta t} = \frac{427 \cdot l}{\Delta t} \quad (3.51)$$

Es bedeuten:

T Prüftemperatur in $^{\circ}\text{C}$

m_0 Prüflast (Masse) in kg

A Kolbenfläche (= $0,711 \text{ cm}^2$)

l Kolbenweg in mm

Δt Zeitintervall für die Extrusion des Schmelzestranges (= Intervall für das Abschneiden) in s

Anmerkungen

Da sich dieses Verfahren einfacher automatisieren lässt (es muss nur der Weg des Stempels gemessen werden), wird dieser Messwert meist in Datenblättern der Kunststoffrohstoffhersteller angegeben. MFR- und MVR-Wert unterscheiden sich durch die Dichte der Schmelze bei der Prüftemperatur. Das Fließratenverhältnis MFR/MVR macht eine Aussage über die Dichte der Schmelze.

3.6.2.2 Hochdruckkapillarviskosimetrie (HKV)

Die Hochdruckkapillarviskosimetrie (HKV) ist ein Messverfahren, mit dem sich die Viskositätsfunktion von Kunststoffschmelzen bestimmen lässt [82, 86]. Die dynamische Viskosität ist die wichtigste Stoffgröße zur Beschreibung des Fließverhaltens. Im Gegensatz dazu erlauben *Rheometer* im Wesentlichen die Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften der Schmelze. Das Verfahren lässt sich für alle schmelzbaren, thermoplastischen Formmassen anwenden.

Die Probe, meist ein Kunststoffgranulat, wird in einem beheizbaren Zylinder bei vorgegebener Temperatur aufgeschmolzen und anschließend durch einen hydraulisch angetriebenen Stempel durch eine definierte Kapillare (Kreis- oder Rechteckquerschnitt) gepresst (Bild 3.36). Bei konstanter Stempelgeschwindigkeit v und damit konstantem Volumendurchsatz $\dot{V} = v \cdot A$ wird das Druckgefälle in der Kapillare gemessen ($\Delta p = p_1 - p_2$). Durch die Messung bei unterschiedlichen Volumenströmen und somit unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten kann eine Viskositätsfunktion abhängig von der Schergeschwindigkeit erstellt werden für eine bestimmte Temperatur. Es wird deshalb von einer Mehrpunktmessung gesprochen.

Für die Berechnung der Viskosität aus den Messdaten wird zunächst ein Newtonsches Fließverhalten für die zu untersuchende Probe angenommen. Es handelt sich deshalb bei der so ermittelten Fließkurve um die scheinbare Fließfunktion. Um die wahre Viskositätsfunktion bei kreisförmigen Kapillaren zu erhalten, muss der Einlaufdruckverlust und die höhere Schergeschwindigkeit von nicht Newtonschen Flüssigkeiten in Düsenwandnähe rechnerisch korrigiert werden. Der Einlaufdruckverlust wird mit Hilfe der Bagley-Korrektur ermittelt und vom Messwert abgezogen. Nach Anwendung der Formel von Weißenberg-Rabinowitsch, ein Korrekturverfahren zur Berücksichtigung des strukturviskosen Fließverhaltens der Kunststoffe, findet sich schließlich die wahre Viskositätsfunktion. Für reine Vergleichsmessungen ist es ausreichend, die scheinbare Fließfunktion einer Kunststoff-Formmasse zu kennen.

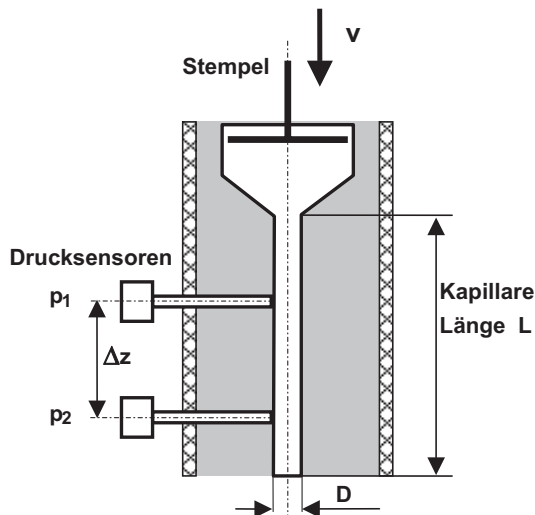


Bild 3.36 Prinzip eines Hochdruckkapillarviskosimeters

Eine kapillarviskosimetrische Untersuchung liefert die Schmelzeviskosität der untersuchten Probe in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit für eine gegebene Temperatur. Bei der Hochdruckkapillarviskosimetrie (HKV) können Schergeschwindigkeiten der Schmelze erreicht werden, die denen in der Kunststoffverarbeitung beim Extrudieren und Spritzgießen entsprechen.

Fließverhalten von Formmassen

Die Ermittlung der rheologischen Eigenschaften von Formmassen ist Voraussetzung für die analytische Erfassung und Berechnung der Verarbeitung von Kunststoffen. Das Fließverhalten der Formmassen wird durch deren Viskosität charakterisiert, die den inneren Widerstand gegen eine von außen einwirkende Beanspruchung beschreibt. Es wird zwischen Dehnaviskosität und Scherviskosität unterschieden. Die Kunststoffschmelze wird während ihrer Verarbeitung hauptsächlich geschert, da die Schmelze an den Wänden der schmelzeführenden Kanäle (Düse, Werkzeugkavität) anhaftet. Das Fließverhalten von Kunststoffschmelzen lässt sich nur bei sehr geringen Schergeschwindigkeiten (Deformationsgeschwindigkeiten) unter Anwendung des Newtonschen Fließgesetzes beschreiben. Es gilt dann die so genannte Nullviskosität η_0 . Das Fließgesetz lautet für Scherströmungen:

$$\tau = \eta_0 \cdot \dot{\gamma} \quad (3.52)$$

Es bedeuten:

τ Schubspannung

η_0 Newtonsche Viskositätskonstante (Nullviskosität)

$\dot{\gamma}$ Schergeschwindigkeit

Unterliegt eine Kunststoffschmelze hohen Schergeschwindigkeiten, wie beispielsweise beim Extrudieren und insbesondere beim Spritzgießen, dann tritt eine Scherverdünnung auf, die Viskosität wird durch die Schergeschwindigkeit bestimmt. Die Beschreibung des Schmelze-fließverhaltens von Kunststoffen bei höheren Schergeschwindigkeiten wird durch deren Strukturviskosität sehr komplex. Es lassen sich Abweichungen zum Newtonschen Fließen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung feststellen. Kunststoffschmelzen verhalten sich dann nicht mehr linear, sondern zeigen ein strukturviskoses Verhalten. Das bedeutet, die Viskosität nimmt mit steigender Schergeschwindigkeit überproportional ab und ist folglich keine Konstante mehr. Die Viskosität ist außer von der Schergeschwindigkeit auch von der Schmelzetemperatur und vom Druck abhängig. Der Druckeinfluss auf die Viskosität wird aber erst bei hohem Druck deutlich. Der Temperatureinfluss dagegen ist stärker zu beobachten und zeigt sich schon bei kleinen Differenzen ausgeprägt. Durch eine Temperaturänderung wird die Viskositätskurve verschoben, ihre Form bleibt jedoch unverändert. Außer Druck und Temperatur können Füllstoffe und Weichmacher noch einen Einfluss auf die Viskosität haben.

Bei Kunststoffschmelzen ist die Viskosität von der Molmasse abhängig. Auf Grund des makromolekularen Charakters der Kunststoffe steigt die Viskosität mit zunehmender Molmasse. Auch die Molmassenverteilung hat einen Einfluss. So nimmt bei einer breiteren Molmassenverteilung die Strukturviskosität zu. Das heißt, dass bei höherer Schergeschwindigkeit die Viskosität stärker abfällt, der Kunststoff wird dünnflüssiger.

Anwendung

Die Viskosimetrie ist zur Bestimmung der Viskositätsfunktion von Kunststoffschmelzen notwendig. Bei fast allen Verarbeitungsverfahren werden die Kunststoffe in schmelzflüssigem Zustand verarbeitet. Die Viskositätsfunktion ist erforderlich

- zur Auslegung von Spritzgießwerkzeugen
- zur Auslegung von Extrusionsanlagen
- zur Auswahl der erforderlichen Maschinengröße
- zur Simulation von Schmelzeverarbeitungsprozessen

Die Viskosität eines Kunststoffs unter den Bedingungen der Schmelzeverarbeitung entscheidet über das mögliche Füllverhalten einer Kavität, die erreichbare Fließweglänge und die erforderliche Anzahl von Anbindungen bei ausgedehnten Formteilen. Kunststoff-Formmassen mit einer stark ausgeprägten Strukturviskosität neigen zur Schwimmhautbildung. Hilfreich ist die Viskositätsfunktion

- zur Festlegung von optimalen Verarbeitungsparametern und
- zur Qualitätssicherung.

Werkstoffliche Veränderungen durch Materialschädigung lassen sich eher in der Viskositätskurve erkennen als bei einer Schmelzfließratenmessung. Die Fließkurvenbestimmung kann folglich auch im Rahmen der Schadensanalyse eingesetzt werden. Sollen Rückschlüsse auf die Molmasse erfolgen, dann ist die rheometrische Messung, mit der Möglichkeit der Bestimmung der Nullviskosität, der viskosimetrischen Messung (HKV) vorzuziehen. Das Rheometer benötigt auch eine weit geringere Probenmenge als das Viskosimeter (< 1 g bis zu > 100 g). Für eine Werkstoffeingangskontrolle eignet sich das HKV-Verfahren weniger, da es vergleichsweise aufwändig und teuer ist.

Prinzip

Bei der Hochdruckkapillarviskosimetrie (HKV) wird ein definierter Volumenstrom \dot{V} einer homogenen Kunststoffschmelze bei einer konstanten Temperatur durch eine geometrisch definierte Kapillare gedrückt und dabei kontinuierlich die benötigte Kraft bzw. der auftretende Druckverlust Δp gemessen (Bild 3.37) [82]. Bei Kapillaren mit rundem Querschnitt wird als Druckgefälle Δp die Druckdifferenz zwischen dem Druck im Zylinder und dem atmosphärischen Aussendruck am Kapillarenausgang gemessen. Bei Schlitzkapillaren ist es meist möglich, zwei Messstellen direkt an der Kapillare anzubringen.

Das Fließen in einer Kapillare wird für Newtonsche Fluide durch das Gesetz nach Hagen-Poiseuille beschrieben. Es wird eine laminare, stationäre und wandhaftende Strömung angenommen. Damit folgt für die Schubspannung an der Kapillarwand [87]:

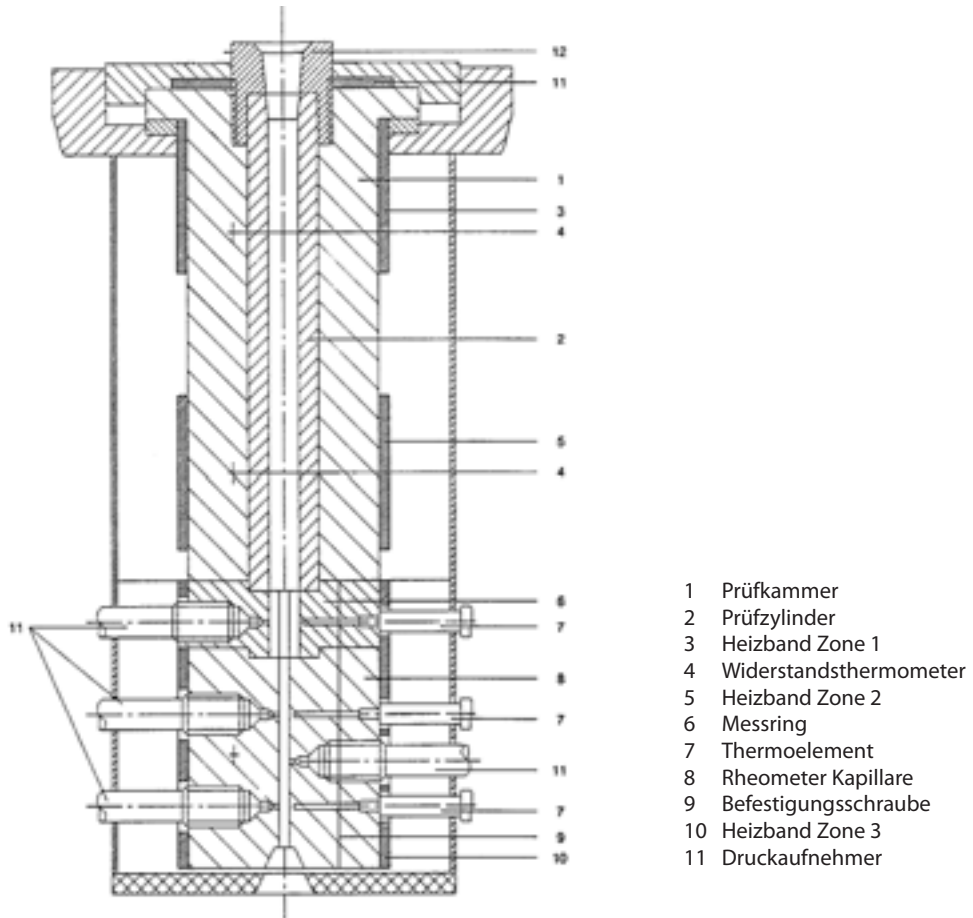


Bild 3.37 Prinzip eines Hochdruckkapillarviskosimeters (HKV) mit Schlitzdüse, nach [43]

Kreiskapillare $r = R$

Schlitzkapillare $z = H$

$$\tau_w = \frac{R \cdot \Delta p}{2 \cdot L} \qquad \frac{H \cdot \Delta p}{2 \cdot L} \qquad (3.53)$$

Für die Schergeschwindigkeit an der Wand gilt:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3} \qquad \frac{6 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \qquad (3.54)$$

Damit ergibt sich die scheinbare Viskosität η_s zu:

$$\eta_s = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot L \cdot \dot{V}} \qquad \frac{B \cdot H^3 \cdot \Delta p}{12 \cdot L \cdot \dot{V}} \qquad (3.55)$$

τ_w bezeichnet die Schubspannung an der Wand, $\dot{\gamma}_w$ die Schergeschwindigkeit an der Wand, R den Radius, H die Höhe, B die Breite, L die Länge der Kapillare und \dot{V} den Volumenstrom. Aus den bekannten geometrischen Größen der Kapillare, dem vorgegebenen Volumenstrom und der gemessenen Druckdifferenz lässt sich somit ein Punkt der Viskositätskurve ($\eta_s, \dot{\gamma}$) ermitteln. Durch Variation des Volumenstroms lassen sich unterschiedliche Schergeschwindigkeiten erzielen. Dadurch wird es möglich, das Fließverhalten einer untersuchten Probe in einen weiten Schergeschwindigkeitsbereich zu bestimmen.

Bei einer HKV-Messung können Schergeschwindigkeiten erreicht werden, die denen der praktischen Kunststoffverarbeitung beim Extrudieren und Spritzgießen entsprechen. Die prüftechnisch erreichbaren Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ liegen im Bereich zwischen 1 s^{-1} und 10^5 s^{-1} .

Bei der ermittelten Fließfunktion (Gleichung 3.55) handelt es sich um die *scheinbare Fließfunktion*. Sie basiert auf der Annahme eines Newtonschen Fließverhaltens der Schmelze und der Vernachlässigung von Einlaufdruckverlusten beim Einlauf der Schmelze aus dem beheizten Zylinder in die Kapillare. Um die *wahre Fließfunktion* der untersuchten Kunststoffschmelze zu erhalten, muss u. a. der Einlaufdruckverlust und die höhere Schergeschwindigkeit von nicht Newtonschen Fluiden in der Nähe der Kapillarwand rechnerisch korrigiert werden [86, 88]. Das kann beispielsweise nach der *Weissenberg-Rabinowitsch-Korrektur* oder nach dem *Konzept der repräsentativen Viskosität* erfolgen.

Bekannte Korrekturen sind:

- *Bagley-Korrektur*: berücksichtigt Wirbelbildungen infolge viskoelastischer Effekte,
- *Hagenbach-Korrektur*^{*)}: berücksichtigt Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und,
- *Couette-Korrektur*: berücksichtigt Änderungen der Reibungsbedingungen an der Wand.

Bagley-Korrektur

Da bei einer Kapillare mit rundem Querschnitt (Durchmesser meist 1mm bis 3mm) keine zwei Druckaufnehmer innerhalb der Kapillarenlänge angebracht werden können, muss die Druckdifferenz zwischen dem Zylinderraum und dem atmosphärischen Aussendruck gemessen werden (Bild 3.38).

Am Übergang vom relativ großen Durchmesser des Zylinders zur Kapillare tritt ein Einlaufdruckverlust auf, der zu berücksichtigen ist. Ursache für diesen Druckverlust ist die elastische Deformation der Schmelze beim Einlauf in die Kapillare. Die für die Deformation nötige Energie verursacht einen Druckverbrauch. Beim Austritt der Schmelze wird die gespeicherte, elastische Energie wieder zurückgewonnen und macht sich in Form einer Strangaufweitung bemerkbar. Durch die Bagley-Korrektur lässt sich dieser Einlaufeffekt korrigieren.

Bei der Messung des Druckgradienten Δp bei unterschiedlichen Kapillaren mit unterschiedlichen Längen-Durchmesser-Verhältnissen L/D für unterschiedliche Schergeschwindigkeiten ergeben sich mehrere Geraden in einem $\Delta p - L/D$ -Diagramm (Bild 3.39) [82, 86, 88]. Die Steigung der Geraden entspricht dabei dem Druckgradienten in der Kapillare. Alle Geraden für die unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ schneiden die Ordinate in einem Punkt.

^{*)} findet häufig Anwendung bei der Lösungsviskosimetrie (Niederdruck-Kapillarviskosimetrie, siehe 3.5.3)

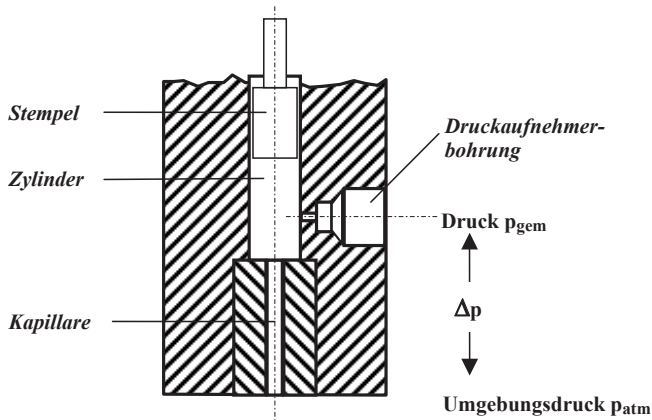


Bild 3.38 Druckmessung im Zylinder bei Kapillaren mit rundem Querschnitt, nach [59]

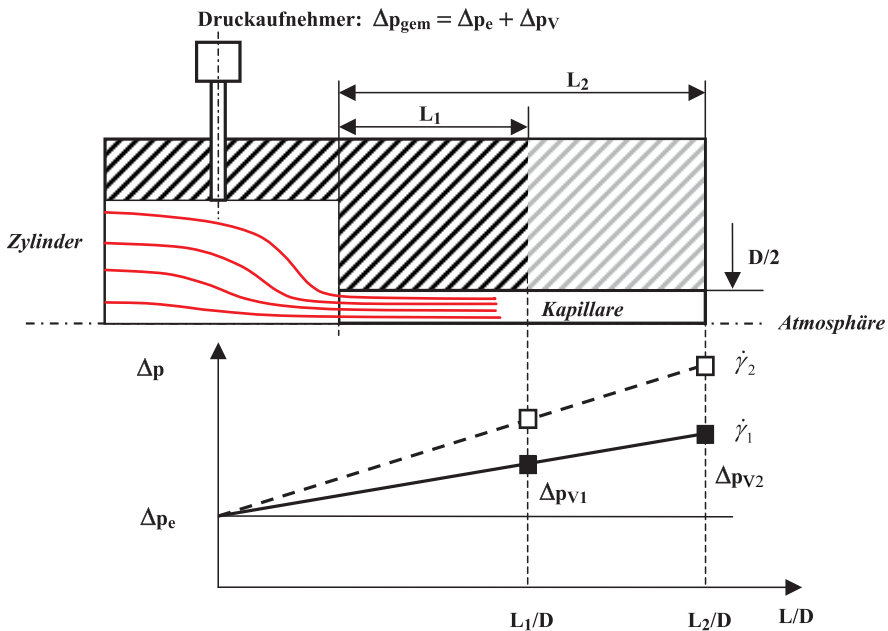


Bild 3.39 Bagley-Korrektur – Bestimmung des Einlaufdruckverlustes und der korrigierten Kapillarlänge für kreisförmige Kapillaren

Das ist der Einlaufdruckverlust Δp_E , er ist unabhängig von der Kapillarlänge L . Der aus dem Bagley-Diagramm ermittelte Einlaufdruckverlust Δp_E muss von dem gemessenen Druckabfall Δp abgezogen werden. Es gilt:

$$\Delta p_{\text{kor}} = \Delta p_{\text{gem}} - \Delta p_E = \Delta p(L/D) \quad (3.56)$$