

Formelsammlung für Polymertechnik / Kunststofftechnik

Hochschule Heilbronn
Wintersemester 2005/2006
Mechatronik und Mikrosystemtechnik

Verfasser:
Dr. Manuel Kühner
www.manuelkuehner.de

Version vom 16. Juni 2018

erstellt mit **L^AT_EX**

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemein	3
1.1	Schnecke	3
1.2	Sonstiges	3
2	Formeln	5
2.1	Masseverweilzeit, Schneckenweg und Plastifizierzeit	5
2.1.1	Allgemein	5
2.1.2	Masseverweilzeit, Hubvolumen und Schnecken-Drehzahl	5
2.1.3	Schneckenweg	6
2.1.4	Plastifizierzeit	6
2.2	Zykluszeit	6
2.2.1	Nachdruckzeit t_{ND}	7
2.2.2	Restkühlzeit $t_{K,Rest}$	7
2.3	Kühlzeitberechnung t_K	7
2.3.1	Platte	7
2.3.2	Zylinder	8
2.3.3	Zylinder - Anschnitt	8
2.4	Schließkraftberechnung	9
2.5	Fülldruckverlustberechnung	9
2.5.1	Kreisquerschnitt	10
2.5.2	Rechteckquerschnitt	11
2.6	Sonstiges	12
2.6.1	spez. Staudruck	12
2.6.2	Massepolster	12
2.6.3	Schneckenrückzug s_{rueck}	12
2.6.4	Umschaltweg x	12
2.6.5	spez. Einspritzdruck $p_{E,sp}$	13
2.6.6	spez. Nachdruck $p_{ND,sp}$	13

1 Allgemein

1.1 Schnecke

- Schneckenlänge i.d.R. $20 \cdot D$
 - normal Drei-Zonen-Schnecke mit 60% Einzugszone (tiefer Steg), 20% Kompressionszone (Steg wird stetig flacher) und 20% Meteringzone (Austragungszone)
- Plastifizierung erfolgt über
 - Wärmeleitung (Heizbänder)
 - Scherwärme (Friktionswärme)
 - * Beeinflussung über Staudruck p_{Stau} , normal 5...10 bar hydraulisch → 50...100 bar spez. Druck, bei schwer aufschmelzbaren Massen wird Staudruck erhöht, bei scherempfindlichen Massen muss der Staudruck gesenkt werden sonst wird die Masse beschädigt (Kettenspaltung), Staudruck ist notwendig für Homogenisierung und für die Dosiergenauigkeit
- Schneckendrehzahl n_S
 - abhängig vom Durchmesser (i.d.R. $40 \dots 300 \frac{1}{\text{min}}$, kleiner Durchmesser → schneller, große Durchmesser → langsamer)
 - Umfangsgeschwindigkeit v_U bei techn. Teilen ungefähr $0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 - ↓ Zykluszeit → ↑ v_U → es muss schneller plastifiziert werden
 - oder: ↓ Zykluszeit → ↓ p_{Stau} → dann läuft Schnecke schneller nach hinten (aber ↓ homogen)
- Massepolster (i.d.R. 5 mm)
 - zum Ausgleich von Schwindung, muss übrig bleiben, Schnecke darf nie auf Block fahren
 - wenn zu groß, dann zusätzl. Elastizität → schlechtere Reproduzierbarkeit
 - Duroplaste/Elastomere
 - * chem. Vernetzung, daher kleines Massepolster wählen, sonst kann Masse durch im Zylinder vernetzten (Wärmeeintrag durch Düse)
 - Thermoplaste
 - * phys. Erstarrung ist reversibel → kein Problem

1.2 Sonstiges

- Entlüftung

- Luft in Kavität wird beim Einspritzen komprimiert und führt u.U. zu Verbrennungen am KS und längerfristig wird das WZ geschädigt (Dieseleffekt)
- Entlüftung normal in der Trennebene, Spalthöhe ca. $\frac{1}{100} \dots \frac{5}{100} mm$, Spalt kann sich aber mit der Zeit zusetzen, daher regelmäßig reinigen (z.B. alle 10.000 Schuss)
- oder: Entlüftung an Auswerfergeometrie (z.B. Nut), hier ist die OF sowieso nicht so toll

2 Formeln

2.1 Masseverweilzeit, Schneckenweg und Plastifizierzeit

2.1.1 Allgemein

- nach dem Schussgewicht zus. Kriterium zur Auswahl des Plastifizieraggregats
- Zweck der Masseverweilzeitbestimmung → Prof.-Skript Seite 12
- Definition der Masseverweilzeitbestimmung → Prof.-Skript Seite 26
- großer Schneckendurchmesser → längere Masseverweilzeit (und umgekehrt)
- max. Hubvolumen bei den meisten Maschinen $4D \rightarrow 20\%$ der Schneckenlänge (bei Länge= $20 \cdot D$)

2.1.2 Masseverweilzeit, Hubvolumen und Schnecken-Drehzahl

Schneckendrehzahl-Berechnung für techn. Teile ($v_U \approx 0,3 \frac{m}{s}$), Näherungsformel

$$n_S = \frac{5000}{D} \left[\frac{1}{min} \right] \text{ Schneckendurchmesser in mm} \quad (2.1.1)$$

mit:

- konventionelle Teile 6000
- Verpackungsteile (Wegwerfprodukte) 9000
- ist die Plastifizierzeit zu lange → **nicht** die Drehzahl erhöhen

Hubvolumen (mit Hub= $4 \cdot D$)

$$V_{Hub} = \pi \cdot D^3 \quad (2.1.2)$$

mittlere Verweilzeit \bar{t}_v in Sekunden

$$\bar{t}_v = \frac{\bar{\rho} \cdot V_{Schnecke}}{G_{Schuss}} \cdot t_{Zyklus} \quad (2.1.3)$$

mit:

- G_{Schuss} =Schussgewicht
- $\bar{\rho}$ = Dichte bei Schmelzetemperatur
- $\bar{\rho} = 0,75 \cdot \rho_{RT}$
- $V_{Schnecke} = 1,1..1,5 \cdot V_{Hub}$ (1,1 → flache Schnecke für z.B. PVC, normal 1,4..1,5 bei 3-Zonen-Schnecke)

- z.B. $\left[\frac{\frac{g}{cm^3} cm^3}{g} \cdot s = s \right]$

- die ideale Verweilzeit $\bar{t}_{v,opt}$ bei techn. Teilen beträgt 3.6 Minuten, bei unter 3 Minuten sollte man die Massetemperatur und den Staudruck erhöhen um Inhomogenitäten entgegenzuwirken, bei über 6 Minuten analog

2.1.3 Schneckenweg

Berechnung des Schneckenwegs s

$$S = \frac{G_{Schuss}}{X \cdot A_{Schnecke}} \quad (2.1.4)$$

mit:

- X = Ausbringfaktor, siehe Prof.-Skript Seite 32
- $A_{Schnecke} = \frac{\pi \cdot D^3}{4}$
- optimaler Bereich: $1..3D$ (zu klein \rightarrow schlechte Reproduzierbarkeit)
- Angabe normal in z.B. 3min 28sec

2.1.4 Plastifizierzeit

$$t_{plast} = \frac{G_{Schuss}}{n_S \cdot PL_{PA}} \quad (2.1.5)$$

mit:

- z.B. $\left[\frac{g}{\frac{1}{s}} = s \right] \rightarrow$ Achtung! Drehzahl in $\frac{1}{s}$
- PL_{PA} = spezifische Plastleistung auf Basis von PA in Gramm pro Umdrehung
- $PL_{PA} = 0,0002 \cdot D \cdot 2,7468$ (gilt für $D < 75$ mm)

2.2 Zykluszeit

$$t_{Zyklus} = t_E + t_K + t_{Neben} + t_{DA} \quad (2.2.1)$$

mit:

- t_E = Einspritzzeit (volum. Formnestfüllung)
- $t_K = t_N + t_{K,Rest}$ = Kühlzeit

- t_N = Nachdruckzeit
- $t_{K,Rest}$ = Restkühlzeit (sonst Verzug, Dosieren, Düse abheben)
- t_{Neben} = Nebenzeiten, siehe Prof.Skript Seite 40
- t_{DA} = Düsenanlegezeit (nur bei Kaltkanal-WZ)

2.2.1 Nachdruckzeit t_{ND}

pauschal:

$$t_{ND} = 0,4 \cdot t_K \quad (2.2.2)$$

2.2.2 Restkühlzeit $t_{K,Rest}$

$$t_{K,Rest} = t_k - t_{ND} \quad (2.2.3)$$

2.3 Kühlzeitberechnung t_K

Bei Kühlzeiten wird grundsätzlich **aufgerundet!** Beispiel: $t_K = 28,34s \rightarrow 29s$

2.3.1 Platte

Auf Seite 36 im Prof-Skript ist eine grafische Möglichkeit zur Kühlzeitbestimmung bei plattenförmiger Geometrie.

$$t_{K,Platte} = \frac{s_{dom}^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\underbrace{\hat{\vartheta}_E - \vartheta_W}_{\hat{T}}} \right) \quad (2.3.1)$$

mit:

- gilt für plattenförmige Geometrie \rightarrow Wärmeabfuhr von zwei Seiten! (bei Zylinder nur von einer Seite mgl.)
- s_{dom} = dominierende Wanddicke (dick ist kritischer)
- a_{eff} = eff. Temp.leitfähigkeit in $\frac{mm^2}{s}$, siehe Prof.-Skript Seite 37
- ϑ_M = Masse- bzw. Schmelzetemperatur, siehe Prof.-Skript Seite 37
- ϑ_W = WZ-Wand-Temperatur, siehe Prof.-Skript Seite 37
- $\hat{\vartheta}_E$ = Entformungstemperatur (dann verzieht sich das Teil nicht mehr), wird bei symm. Verhältnissen in der Plattenmitte erreicht (Kühlung von zwei Seiten), siehe Prof.-Skript Seite 37
- $\hat{T} = \frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\hat{\vartheta}_E - \vartheta_W}$

2.3.2 Zylinder

$$t_{K,Zylinder} = \frac{d_{dom}^2}{23,14 \cdot a_{eff}} \ln \left(1,599 \underbrace{\frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\hat{\vartheta}_E - \vartheta_W}}_{\hat{T}} \right) \quad (2.3.2)$$

mit:

- gilt für zylinderförmige Geometrie → Wärmeabfuhr von einer Seiten/Fläche!
- d_{dom} =dominierender Durchmesser (dick ist kritischer)
- a_{eff} =eff. Temp.leitfähigkeit in $\frac{mm^2}{s}$, siehe Prof.-Skript Seite 37
- ϑ_M =Masse- bzw. Schmelzetemperatur, siehe Prof.-Skript Seite 37
- ϑ_W =WZ-Wand-Temperatur, siehe Prof.-Skript Seite 37
- $\hat{\vartheta}_E$ =Entformungstemperatur (dann verzieht sich das Teil nicht mehr), siehe Prof.-Skript Seite 37
- $\hat{T} = \frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\hat{\vartheta}_E - \vartheta_W}$

2.3.3 Zylinder - Anschnitt

Die Kühlzeit für den Anschnitt darf nicht länger sein als wie die Kühlzeit für das Formteil. Sonst wird Anschnitt kühlzeitbestimmend (zykluszeitbestimmend)! Bei der Entformungstemperatur kann eine um 25 Grad höhere Temperatur angesetzt werden! Allerdings darf der Anschnitt auch nicht zu klein gewählt werden. Sonst ist u.U. der Kern der Anschnitts schon erstarrt, obwohl die Schwindung noch nicht ausgeglichen ist

$$t_{K,Zylinder} = \frac{d_{dom}^2}{23,14 \cdot a_{eff}} \ln \left(1,599 \underbrace{\frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\hat{\vartheta}_E - \vartheta_W}}_{\hat{T}} \right) \quad (2.3.3)$$

mit:

- gilt für zylinderförmige Geometrie → Wärmeabfuhr von einer Seiten/Fläche!
- d_{dom} =dominierender Durchmesser (dick ist kritischer)
- a_{eff} =eff. Temp.leitfähigkeit in $\frac{mm^2}{s}$, siehe Prof.-Skript Seite 37
- ϑ_M =Masse- bzw. Schmelzetemperatur, siehe Prof.-Skript Seite 37
- ϑ_W =WZ-Wand-Temperatur, siehe Prof.-Skript Seite 37

- $\hat{\vartheta}_E$ =Entformungstemperatur, beim **Anschnitt 25 Grad höher als in Tabelle ansetzen** (unkritischer, Anschnitt muss nicht entformstabil etc. sein), siehe Prof.-Skript Seite 37
- $\hat{T} = \frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\hat{\vartheta}_E - \vartheta_W}$

2.4 Schließkraftberechnung

- wird die Schließkraft zu gering gewählt kann es angussnah (max. Füll-Druckverlust) zur Gratbildung kommen
- \uparrow Fließweg $\rightarrow \uparrow$ Druck am Anguss
- bei **Dünnwandteilen** ist der **Fülldruck** (normalerweise) schließkraftbestimmend (erstarrt bevor Nachdruck anfängt), es sei denn der Nachdruck ist höher
- bei **Dickwandteilen** ist der **Nachdruck** schließkraftbestimmend

$$F_S = \frac{A_{proj} \cdot p_{W,max} \cdot f}{100} \text{ in kN} \quad (2.4.1)$$

mit:

- A_{proj} =gesamte in Form-Trennebene proj. Fläche in cm^2 (Trennebene als Tageslichtprojektor-Fläche vorstellen, Schatten des Formteils ist dann die proj. Fläche)
- $p_{W,max}$ =max. Werkzeuginnendruck in *bar*, pauschal 400 bar oder Prof.-Skript Seite 22 (1 bar = 10.000 $\frac{N}{m^2}$)
- f =**Geometrie- oder Symmetriefaktor**, Beispiel Platte: wenn Anspritzpunkt(e) symmetrisch mittig $f = 1$, wenn Anspritzpunkt(e) mehr links oder rechts $f = 2$ oder wenn Anspritzpunkt(e) z.B. oben links $f = 4$, oder **Oberflächenfaktor** (gute Abprägung $to \uparrow f$)

2.5 Fülldruckverlustberechnung

- nicht stationär
- nicht isotherm
- strukturviskose Schmelzen
 - \uparrow Temperatur \downarrow Viskosität
 - \uparrow Druck \uparrow Viskosität
 - \uparrow TSchergeschwindigkeit \downarrow Viskosität
- Näherung für einfache Geometrie (Kreisquerschnitt)

- Annahme: Abkühlung an WZ wird durch Scherwärme kompensiert
- bei amorphen Thermoplasten max. 500 bar, da sonst die Spannungen am Anguss zu groß werden (→ Teil platzt leicht bei mech. Belastung)
- bei teilk. Thermoplasten max. 800 bar (diese sind zäher)

2.5.1 Kreisquerschnitt

$$\Delta p = \frac{128 \cdot \bar{\eta} \cdot \dot{V} \cdot L}{\pi \cdot d^4} \quad (2.5.1)$$

mit:

- Δ =Druckverlust
- $\bar{\eta}$ =mittlere Viskosität
- \dot{V} =Volumenstrom
- L =Länge des Fließkanals
- d =Durchmesser des Fließkanals

$$\bar{\eta} = k \cdot \bar{D}^m \quad (2.5.2)$$

mit:

- k =Stofffaktor
- \bar{D} =mittlere wahre Schergeschwindigkeit
- m =Stoffkonstante, siehe Extra-Tabelle I

$$k = k_{OT} \cdot e^{-\beta \cdot \vartheta_M} \quad (2.5.3)$$

mit:

- k_{OT} =Konstante, siehe Extra-Tabelle I
- β =Konstante, siehe Extra-Tabelle I
- ϑ_M =Massetemperatur in Celcius, siehe Extra-Tabelle I

$$\bar{D}_{\text{Kreisquerschnitt}} = \frac{0,815 \cdot 32 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d^3} \quad (2.5.4)$$

mit:

- d =Durchmesser

- \dot{V} =Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{\bar{v}_f \cdot \pi \cdot d^2}{4} \quad (2.5.5)$$

mit:

- \bar{v}_f =mittlere Fließweggeschwindigkeit der Schmelze beim Einspritzvorgang
- d =Durchmesser

oder

$$\dot{V} = \frac{V}{t_E} \quad (2.5.6)$$

mit:

- V =Formteilvolumen
- t_E =Einspritzzeit

Ineinander eingesetzt ergibt sich der Druckverlust zu:

$$\Delta p_{Kreis} = \frac{128 \cdot k_{OT} \cdot e^{-\beta \cdot \vartheta_M} \cdot (0,815 \cdot 32)^m \cdot \dot{V}^{1+m} \cdot L}{\pi^{1+m} \cdot d^{4+3m}} \quad (2.5.7)$$

2.5.2 Rechteckquerschnitt

$$\Delta p_{Rechteck} = \frac{32 \cdot \varphi \cdot \dot{V} \cdot \eta_{s,eff} \cdot L}{d_{hydr}^2 \cdot B \cdot H} \quad (2.5.8)$$

mit:

- φ =Geometriebeiwert
- $\eta_{s,eff}$ =scheinbare eff. Viskosität
- B =Breite (z.B. berechenbar aus Volumen, H und L)
- H =Höhe (dom. Wandstärke, dünn und lang ist dominant)
- L =Fließweglänge
- d_{hydr} =Durchmesser eines kreisrunden Kanals mit gleicher Fläche

$$\varphi = 0,89 + 0,61 \cdot \left(1 - \frac{H}{B}\right)^3 \quad (2.5.9)$$

$$d_{hydr} = \frac{2 \cdot B \cdot H}{(B + H)} \quad (2.5.10)$$

$$\eta_{s,eff} = k \cdot \bar{D}_{Rechteck}^m \quad (2.5.11)$$

mit:

- k = analog zu oben (Kreis), Werte siehe Extra-Tabellen II und III (je nach Dicke H)

$$k = k_{OT} \cdot e^{-\beta \cdot \vartheta_M} \quad (2.5.12)$$

mit:

- k_{OT} = Konstante, siehe Extra-Tabelle II bzw. III
- β = Konstante, siehe Extra-Tabelle II bzw. III
- ϑ_M = Massetemperatur in Celcius, siehe Extra-Tabelle II bzw. III

$$\bar{D}_{Rechteck} = \frac{6 \cdot \dot{V}}{B \cdot H^2} \quad (2.5.13)$$

2.6 Sonstiges

2.6.1 spez. Staudruck

Prof.-Skript Seite 44 (pauschal 50 bar)

2.6.2 Massepolster

Prof.-Skript Seite 44 (pauschal 5 mm)

2.6.3 Schneckenrückzug s_{rueck}

Prof.-Skript Seite 44 (pauschal 5 mm)

2.6.4 Umschaltweg x

$$x = s_{plast} + s_{rueck} - s_{Nachdruck} \quad (2.6.1)$$

mit:

$$s_{plast} = \frac{4 \cdot G_{Schuss}}{\pi \cdot D^2 \cdot 0,91 \cdot 0,75 \cdot \rho_{RT}} + \text{Massepolster} \quad (2.6.2)$$

mit:

- Prof.-Skript Seite 55
- D = Schneckendurchmesser
- g_{Schuss} = Schußgewicht
- Massepolster i.d.R. 5 mm

- z.B. $\left[\frac{g \cdot 1000 \frac{mm^3}{cm^3}}{mm^2 \cdot \frac{g}{cm^3}} + mm \right]$

$$s_{Nachdruck} = \frac{4 \cdot G_{Schuss}}{\pi \cdot D^2 \cdot 0,91 \cdot 0,75 \cdot \rho_{RT}} \cdot 0,8 + s_{rueck} \quad (2.6.3)$$

mit:

- Prof.-Skript Seite 56
- $s_{rueck} = 5$ mm
- D = Schneckendurchmesser
- G_{Schuss} = Schußgewicht

- z.B. $\left[\frac{g \cdot 1000 \frac{mm^3}{cm^3}}{mm^2 \cdot \frac{g}{cm^3}} + mm \right]$

2.6.5 spez. Einspritzdruck $p_{E,sp}$

pauschal bei offener Düse:

$$p_{E,sp} = p_{WZ,max} + 400\text{bar} \quad (2.6.4)$$

mit:

- $p_{WZ,max}$ = max. Werkzeugdruck (siehe Prof.-Skript Seite 22 oder pauschal 400 bar)

2.6.6 spez. Nachdruck $p_{ND,sp}$

pauschal bei offener Düse, siehe Prof.-Skript Seite 48:

$$p_{ND,sp} = (530 - 30 \cdot s) + z \cdot (120 - 20 \cdot s) \text{ in bar} \quad (2.6.5)$$

mit:

- s = dominierende Wandsicke in mm
- $z=0$ amorpher Werkstoff
- $z=1$ teilkristalliner Werkstoff