Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist die numerische Analyse des bei der Kühldüsenextrusion im Kalibrator auftretenden Wärmeausgleichsprozesses und des Strömungsvorgangs erstarrendender Polymerschmelze. Mit der Methode der Finiten Elemente sind die Grundgleichungen für Energie-, Impuls- und Massenerhaltung unter Einbeziehung der konstitutiven Gleichungen gelöst und Programme zur computergestützten Berechnung generiert worden. Anhand von Berechnungsbeispielen wird die Leistungsfähigkeit der Programme dargestellt und die Richtigkeit der Berechnungsergebnisse durch den Vergleich mit experimentell ermittelten Temperaturen nachgewiesen.

Der Abkühlvorgang wird zunächst durch den instationären und zweidimensionalen Fall beschrieben, der im Programmpaket SIMFLOW® des IKT enthalten ist. Um die von der Temperatur und der Abkühlgeschwindigkeit abhängenden Materialparameter Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit in die Berechnungen einzubeziehen, wird die Abkühlgeschwindigkeit berechnet, und in das erweiterte Stoffgesetz eingegeben, wozu programmtechnische Erweiterungen durchgeführt worden sind. Neben der Möglichkeit, die Kalibratorgeometrie auf der Basis der Berechnungsergebnisse zu optimieren und die erreichbare Extrusionsgeschwindigkeit vorab ermitteln zu können, zeigt sich der Einfluss der Kühlrate. Während im Innern des Extrudats niedrige Abkühlgeschwindigkeiten zu ausgeprägten Haltepunkten im Tempraturverlauf führen, wird die Kristallisation in den schnell erkaltenden Randschichten behindert.

Um den bisher vernachlässigten konduktiven Anteil der Wärmeleitung in axialer Richtung zu berücksichtigen, wird die Energiegleichung in drei Raumdimensionen für den stationären Fall angesetzt und mit einem im

Rahmen dieser Arbeit generierten Berechnungscode gelöst. Damit kann der über die Kontaktfläche von dem Ausformwerkzeug in den Kalibrator transferierte Wärmestrom mittels der auf den gemessenen Kalibratorstirnflächentemperaturen gestützten Randtemperatur berücksichtigt werden.

Die berechneten Extrudattemperaturen zeigen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss des Kontaktwärmestroms, und damit die Notwendigkeit zur 3D-Simulation. Der bisherige Entwicklungsstand des Programms ermöglicht nur die Kalibrator-Eintrittsregion mit dem Kontakt zum Extrudat zu modellieren. Weiter Programmentwicklung, insbsondere effektivere Matrix-Assemblierung und Lösung des Gleichungssystems sind erforderlich, um hinsichtlich der Unbekanntenanzahl grössere Modelle aufstellen zu können.

Das Strömungsfeld der im Kalibrator mit sinkenden Temperaturen erstarrenden Schmelze wird mit der Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichung in zwei Raumdimensionen beschrieben. Dabei wird die Viskosität, die Dichte, und die sich ändernde Randbedingung abhängig von der Temperatur berechnet und in einem Programm umgesetzt. Erstmalig können die Effekte des Erstarrens und Kontrahierens des Polymers, die das Kühldüsen-Extrusionsverfahren charakterisieren, anhand von berechneten Strömungsgeschwindigkeiten analysiert werden. Neben der sich im Kanaleintrittsbereich ändernden Randbedingung vom Haften zum Gleiten bestimmt das Nachfließen der Schmelze die berechneten Geschwindigkeitsfelder.

Mit der Kenntnis der Geschwindigkeitprofile ergibt sich die Möglichkeit, bei der Abkühlsimulation von der vereinfachenden Annahme konstanter Geschwindigkeiten abzusehen und mittels einer Iteration der Temperatur- und Geschwindigkeitsberechnung zu einem geschlossenen Lösungsverfahren zu kommen, was sich zur Fortsetzung dieses Forschungsaspekts anbieten würde. Eine experimentelle Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeiten wird durch die Feststoffschicht, die sich um die fließende Schmelze herum bildet, erschwert und bleibt späteren Arbeiten vorbehalten.

Mittels thermischer Analyse und rheologischer Messungen wird das Stoffverhalten eines TPE, repräsentativ für teilkristalline Polymere, untersucht. Die thermischen Parameter Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit werden basierend auf gemessenen Stoffwerten durch abschnittsweise definierte Polynome abhängig von der Temperatur und der Abkühlgeschwindigkeit approximiert. Die Viskosität wird mit dem Kapillarrheo-

meter und dem Rotationsrheometer gemessen, wobei neben der reinen Schmelze, die Mischung aus Schmelze und kristallinen Bestandteilen untersucht werden kann. In der Mischphase zeigt sich ein exzessiver Viskositätsanstieg. Im Gegensatz zu bisherigen konstitutiven Gleichungen wird die Viskosität im verarbeitungsrelevanten Temperaturbereich, der die Schmelze, den Feststoff und das Kristallisationsgebiet einschließt, mit Hilfe eines zusammengesetzen Modells approximiert.

Um den Kühldüsen-Extrusionsprozess experimentell zu untersuchen, ist eine Anlage entwickelt worden, mit der ein Führungsprofil stellvertretend für Vollprofile hergestellt werden kann. Mit einem neuartigen Regelungskonzept wird der Druck als entscheidende Prozessgröße auf das erforderliche Niveau eingeregelt. Unter praxisrelevanten Bedingungen werden die Extruderdrehzahl, die Schmelzetemperatur, der Druck, der Durchsatz, die mittlere Austrittsgeschwindigkeit und die Kalibratortemperaturen gemessen, was die Möglichkeit zur Verifikation der berechneten Temperaturen gibt.

Literaturverzeichnis

[1] J. L. Voigt, “Kontinuierliches Herstellen von Polyamid-Stäben”, *Kunststoffe*, 51, 8, S. 450ff, 1961.

[2] “N. V. Onderzoekingsinstitut Arnhem, Holland”, *EP 774430*, 1954.

[3] R. Pflüger, “Polyamide”, *Kunststoff Handbuch, Herausgeber Vieweg R./Müller A.*, Band 6, S. 302ff, 1966.

[4] “Inventa AG, Suisse, Belg. Patent BP 563343”,

[5] “Polymer Corporation, USA, Patente EP 726911, AP 2719330, DBP 1140342”,

[6] B. Pornnimit, “Eigenverstäkung von Polyethylen in der Extrusion, Verfahren - Eigenschaften - Struktur”, *Dissertation, Universität - Gesamthochschule Kassel*, 1, 1990.

[7] A. Weber und G. W. Ehrenstein, “Eigenverstärkende Profile aus PE und PP”, *GAK*, 50, S. 892–896, 1997.

[8] W. Ensinger, “Verfahren und Vorrichutng zum Extrudieren, insbesondere Strangpressen, von heißen Kunststoffschmelzen”, *Patent DE 3801574 A1*, 1988.

[9] W. Michaeli, “Zur Analyse des Flachfolien- und Tafelextrusionsprozesses”, *Dissertation, R-W TH Aachen*, 1976.

[10] E. Haberstroh, “Analyse von Kühlstrecken in Extrusionsanlagen”, *Dissertation, RWTH Aachen*, 1, 1982.

[11] E. Mitsoulis und A. Hannachi, “Numerical Simulation of Sheet Extrusion Cooling using Chilling Rolls”, *Proceedings of the 9th international Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel*, S. 353–358, 1990.

[12] J. Schmidt, “Wärmetechnische Auslegung von Profilkühlstrecken mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente”, *Dissertation, R-W TH Aachen*, 1985.

[13] G. Menges, M. Kalwa und J. Schmidt, “Wärmeausgleichsrechnung in der Kunststoffverarbeitung mit der FEM”, *Kunststoffe 77*, 8, 1987.

[14] P. Sheehy und P. A. Tanguy, “A finite Element Model for Complex Profile Calibration”, *Polymer Enigneering and Science*, 34, 1994.

[15] L. Fradette, P. A. Tanguy, F. Thibault und P. Sheehy, “Optimal Design in Profile Extrusion Calibration”, *Journal of Polymer Engineering*, 14, S. 295–322, 1995.

[16] H. M. Ettouney und R. A. Brown, “Finite Elements Methods for Steady Solidification Problems”, *Journal of Computational Physics*, 49, S. 118–150, 1982.

[17] J. F. T. Pittman, P. Aguirre und D. Ding, “Development of a Computer Simulation of SCORIM”, *International Polymer Processing*, XI, S. 248–256, 1996.

[18] S. Fang, “Konzipierung und Dimensionierung komplexer Extrusionswerkzeugsysteme mittels der Methode der Finiten Elemente”, *Dissertation, Universität Stuttgart*, 1999.

[19] S. Fang und H.-G. Fritz, “Auslegung und Optimierung von Profilwerkzeugen komplexer Geometrien mittels FEM”, *Extrusionswerkzeuge -Schwerpunkt Profilwerkzeuge-, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik*, I, S. 127–157, 1996.

[20] W. Michaeli und K. Hoffmann, “Grundlegendes Auslegen und anschließende Überprüfung der Ergebnisse von Extrusionszeugen mittels FEM”, *Extrusionswerkzeuge -Schwerpunkt Profilwerkzeuge-, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik*, I, S. 95–125, 1996.

[21] K. Hoffmann, “Beiträge zur Strömungs- und Spannungsberechnung in Extrusionswerkzeugen”, *Dissertation, RWTH Aachen*, 1, 1996.

[22] M. Ghoreishy und M. R. Nouri, “Finite Elemnt Analysis of Thermoploastic Melts Flow through the Metering and Die Regions of Single Screw Extruders”, *Journal of Applied Polymer Science*, 74, S. 676–689, 1999.

[23] E. Mitsoulis und J. Vlachopoulos, “The Finite Element Method for Flow and Heat Transfer Analysis”, *Advances in Polymer Technology*, 4, S. 107–121, 1984.

[24] J. Li, “Numerische Analyse von Mehrschichtenströmungen bei Coextrusionsprozessen”, *Dissertation, Universität Stuttgart*, 1997.

[25] Y. Rubin, T. Marchal und F. Röthemeyer, “Die Design Improvements through Numerical Simulation for the Extrusion of EPDM Compounds”, *KGK, Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 51, S. 602–608, 1998.

[26] E. Haberstroh, P. Ryzko und B. Rotter, “Werkstoffdaten für die Verfahrensauslegung”, *GAK*, 6, S. 389–397, 2000.

[27] D. Kropp, “Rheologische Stoffdaten von Extrusionsschmelzen”, *Extrusionswerkzeuge -Schwerpunkt Profilwerkzeuge-, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik*, I, S. 3–32, 1996.

[28] D. N. Githuku und A. J. Giacomin, “A Spectral Element Simulation of Gravitational Flow during Plastic Pipe Extrusion”, *Journal of Engineering Materials an Technology*, 115, S. 433–439, 1993.

[29] R. D. Krause, “Modellierung und Simulation rheologisch/thermodynamischer Vorgänge bei der Herstellung großflächiger thermoplastischer Formteile mittels Kompressionsformverfahren”, *Dissertation, Universität Stuttgart*, 2000.

[30] R. Mayavaram und M. Reddy, “Non-isothermal, Non-newtonian Analysis of three dimensional RTM/VARTM Processes using HP-adaptive Finite Element Method”, *Antec*, S. 2356–2360, 2000.

[31] V. Voller und C. Prakash, “A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, S. 1709–1719, 1987.

[32] S. Idelsohn, N. Nigro und M. Storti, “Segregation in Continuous Casting Processes with coupled Solidification and Fluid Flow Modelling”, *International Journal of Forming Processes*, 1, S. 135–161, 1998.

[33] V. Voller, A. D. Brent und C. Prakash, “The Modelling of Heat, Mass and Solute Transport in Solidification Systems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32, S. 1719–1731, 1989.

[34] W. Bennon und F. P. Incropera, “A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change Systems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, S. 2161–2170, 1987.

[35] J. Pittman und I. A. Farah, “Computer Simulation of the Cooling Process in Plastic Pipe Manufacture, including sag, thermal stesses and morphology”, *Proceedings Plastics Pipes(Inst. of Materials)*, IX, 1995.

[36] R. B. Bird, W. E. Stewart und E. N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, *Wiley International Edition, New York London, John Wiley & Sons, Inc.*, 1960.

[37] C. L. Tucker III, “Computer Modelling for Polymer Processing, Fundamentals”, *Hanser Publishers, Munich Vienna New York*, 1989.

[38] H.-G. Fritz und K. Geiger, “in Hensen, Knappe, Potente: Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik I, Grundlagen”, *Carl Hanser Verlag München Wien*, 1989.

[39] C. D. Han, “Rheology in Polymer Processing”, *Academic Press, New York San Francisco London*, 1976.

[40] I. N. Bronstein und K. A. Semendjajev, “Taschenbuch der Mathematik”, *Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a. M.*, 27, 1987.

[41] H.-G. Fritz, S. Fang und R. Krause, “Rechnergestützte Auslegung von Kalibrierwerkzeugen”, *Extrusionswerkzeuge -Schwerpunkt Profilwerkzeuge-, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik*, I, S. 187–242, 1996.

[42] E. Grünschloß und L. Radtschenko, “Experimentelle Bestimmung der Wärmeübergangszahlen bei der Kühlung von extrudierten Kunststoffrohren aus HD-PE in Wasserbad”, *Plastverarbeiter*, 30, S. 631–639, 1979.

[43] U. Grigull und H. Sandner, “Wärmeleitung”, *Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York*, 1979.

[44] V. D. Ingenieure, “VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang”, *VDI-Verlag GmbH*, 7, 1994.

[45] J. F. T. Pittman und R. Sander, “Thermal Effects in Extrusion: Slit Dies”, *International Polymer Processing*, IX, S. 326–345, 1994.

[46] R.-Y. Chang und W.-L. Yang, “Numerical Simulation of non-isothermal Extrudate Swell at high Extrusion Rates”, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 51, S. 1–19, 1994.

[47] O. C. Zienkiewicz, “Methode der Finiten Elemente”, *Carl Hanser Verlag München Wien*, 1975.

[48] D. Marsal, “Die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen in Wissenschaft und Technik”, *Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich, BI-Wissenschaftsverlag*, 1976.

[49] H. Eschenauer und W. Schnell, “Elastizitätstheorie”, *BI Wissenschaftsverlag, Mannheim Wien Leipzig Zürich*, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 1993.

[50] E. Hinton und D. R. J. Owen, “An Introduction to Finite Element Computations”, *Pineridge Press Limited Swansea, U. K*, 1981.

[51] K. J. Bathe, “Finite Elemente Methoden”, *Deutsche Übersetzung von P. Zimmermann, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo*, 1986.

[52] J. G. Ergatoudis, “Isoparametric Finite Elements in two and three Dimensional Analysis”, *Phd Thesis, University of Wales, Swansea*, 1968.

[53] J. F. T. Pittman, G. P. Whitham, S. Beech und D. Gwynn, “Cooling and Wall Thickness Uniformity in Plasic Pipe Manufacture”, *International Polymer Processing*, IX, S. 130–140, 1994.

[54] O. C. Zienkiewicz und C. J. Parekh, “Transient Field Problems: Two-Dimensional and Three-Dimensional Analysis by Isoparametric Finite Elements”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2, S. 61–71, 1970.

[55] E. L. Wilson und R. E. Nickel, “Application of the Finite Element Method to Heat Conduction Analysis”, *Nuclear Engineering and Design*, 4, S. 276–286, 1966.

[56] O. C. Zienkiewicz, B. M. Irons, J. G. Ergatoudis, S. Ahmad und F. Scott, “Iso-Parametric and Associated Element Families for two- and three-dimensional Analysis”, *Proc. Cours on finite Element Methods in Stress Analysis, ed. I. Holand and K. Bell, Trondheim, Tech. University*, 1969.

[57] R. Clough, “Comparison of Three Dimensional Elements”, *Symposium on Application of Finite Element Methods in Civil Engginee-ring, Vanderbild*, S. 1–26, 1969.

[58] H. R. Schwarz, “Methode der Finiten Elemente”, *B. G. Teubner Stuttgart*, 1, 1991.

[59] A. Duschek und A. Hochrainer, “Tensorrechnung in Analytischer Darstellung”, *Springer Verlag Wien*, 2, S. 34ff, 1961.

[60] B. H. Kang und Y. Jaluria, “Heat Transfer from continuously moving Material in Channel Flow for thermal Processing”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 8, S. 546–555, 1994.

[61] H. Mavridis, A. N. Hrymak und J. Vlachopoulos, “Finite Element Simulation of stratified Multiphase Flows”, *AIChE Journal, 3*, 33, S. 410–422, 1987.

[62] E. Isaacson und H. B. Keller, “Analyse numerischer Verfahren”, *Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfut am Main*, 1, 1973.

[63] I. S. Beresin und N. P. Shidkow, “Numerische Methoden”, *VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin*, 1, 1970.

[64] M. Abramowitz und I. A. Stegun, “Handbook of Mathematical Functions”, *National Bureau of Standards, Appl. Math. Series, 55 Washington DC,*, 18, S. 37–44, 1964.

[65] Y. Jinyun, “Gaussian Quadrature Formulae for Tetrahedronal Regions”, *ISD-Report No. 307, Institut f. Statik u. Dynamik d. Luft- u. Raumfahrtkonstruktionen, Uni Stuttgart*, 1982.

[66] A. H. Stroud und D. Secrest, “Gaussian Quadrature Formulas”, *Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, N. J.*, 18, S. 37–44, 1966.

[67] P. C. Hammer, O. P. Marlowe und A. H. Stroud, “Numerical Integration over Simplexes and Cones”, *Math. tables Aids Comp.*, 10, S. 130–137, 1956.

[68] G. R. Cowper, “Gaussian Quadrature Formulas for Triangles”, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 7, S. 405–408, 1973.

[69] R. Mehling, “Entwicklung eines Kühldüsen-Extrusionsprozesses zur Herstellung dickwandiger Profile”, *16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Vortragsbeitrag 2.3*, I, 1999.

[70] J. M. Piau, “Adherent and Slippery Walls for Extrusion of Entangled Polymer Melts and Compounds”, *Macromol. Symp., WILEY-VCH Verlag Weinheim*, 143, S. 269–289, 1999.

[71] H.-G. Fritz, Q. Cai und U. Bölz, “Polypropylen-Modifikation durch reaktive Kunststoffaufbereitung”, *13. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Vortragstexte*, 13, S. 5–25, 1993.

[72] B. F. Mathod, “Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers”, *Hanser Publishers, Munich Vienna New York*, 1994.

[73] G. W. Ehrenstein, G. Riedel und P. Trawiel, “Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen”, *Carl Hanser Verlag München Wien*, 1998.

[74] B. Wunderlich, “Thermal Analysis”, *Academic Press, Inc.*, 1990.

[75] n. n., “DSC 200, Meßteil”, *Betriebsanleitung, NETZSCH*, 1992.

[76] n. n., “DSC 200, Teil Auswertung”, *Software Handbuch, NETZSCH*, 1994.

[77] H. Janeschitz-Kriegl, H. Wippel, C. Paulik und G. Eder, “Polymer Cristallization Dynamics as reflected by Diffential Scanning Calorimetry, Part 1: On the Calibration of the Appartus”, *Colloid and Polymer Science*, S. 1107–1115, 1993.

[78] G. Eder und H. Janeschitz-Kriegl, “Crystallization”, *Materials Science and Technology, A comprehensive Treatment, edited by R. W. Cahn, P. Haasen and E. J. Kramer, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim*, 18, S. 270–342, 1997.

[79] C. H. Wu, G. Eder und H. Janeschitz-Kriegl, “Polymer Cristallization Dynamics as reflected by Diffential Scanning Calorimetry, Part 2: Numerical Simulations”, *Colloid and Polymer Science*, S. 1116–1128, 1993.

[80] F. Hell, “Grundlagen der Wärmeübertragung”, *VDI-Verlag, Düsseldorf*, 2, 1979.

[81] I. Duretek und W. Friesenbichler, “Messung des p-v-T-Diagramms und der Wärmeleitfähigkeit für ein TPE-Compound”, *unveröffentlichter Untersuchungsbericht zur Auftragsmessung am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, Österreich*, 1999.

[82] Rheometrics, “Dynamic Stess Rheometer”, *Instrument Manual*, 1993.

[83] W. Gleissle, “Kurzzeitmessungen zur Ermittlung der Fließeigenschaften von Kunststoffen bis zu höchsten Schergeschwindigkeiten”, *Praktische Rheologie der Kunststoffe, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf*, I, S. 83–105, 1978.

[84] P. Ehrecke, “Untersuchungen zur Irreversibilität von Netzwerkentschlaufungen beim Fließen von Polymerschmelzen”, *Dissertation, Universität Stuttgart*, 1997.

[85] M. Pahl, W. Gleißle und H.-M. Laun, “Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere”, *VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf*, I, 1995.

[86] R. I. Tanner, “Engineering Rheology”, *Clarendon Press, Oxford*, 1985.

[87] W. Heinz, “Rheologie und Rheometrie mit Rotationsviskosimetern, zweite von H. Mewes und P. Haake überarbeitete Auflage”, *Springer Verlag, Berlin*, 2, 1965.

[88] Rheometrics, “Rheometrics Controlled Stess Testing”, *User Guide*, 1992.

[89] R. R. Lagasse und B. Maxwell, “An Experimental Study of the Kinetics of Polymer Crystallization during Shear Flow”, *Polymer Engineering and Science*, 16, S. 189, 1976.

[90] J. F. Petersen, “Praktische Rheometrie von Kunststoffschmelzen”, *Praktische Rheologie der Kunststoffe, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf*, S. 45–62, 1978.

[91] G. Langer, “Zur Rheometrie des Hochdruckschlitzviskosimeters”, *Dissertation, Universität Dortmund*, 1976.

[92] A. Göttfert, E.-O. Reher und I. M. Balagula, “Kapillarrheometer für die Kunststoffverarbeitung”, *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 53, S. 512–514, 2000.

[93] W. P. Cox und E. H. Merz, “Correlation of Dynamic and Steady Flow Viscosities”, *Journal of Polymer Science*, 28, S. 619–622, 1958.

[94] C. Lacroix, M. Grmela und P. Carreau, “Morphological Evolution of immiscible Polymer Blend in simple Shear and Elongational Flows”, *Journal for Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 86, S. 37–59, 1999.

[95] P. J. Carreau, “Rheological Equations from Molecular Network Theories”, *PhD Thesis, University of Wisconsin*, 1968.

[96] K. Geiger und H. Kühnle, “Analytische Berechnung einfacher Scherströmungen aufgrund eines Fließgesetzes vom Carreau’schen Typ”, *Rheologica Acta*, 23, S. 355 – 367, 1984.

[97] Z. Tadmor und C. G. Gogos, “Principles of Polymer Processing”, *Wiley Interscience Publication, New York Brisbane Chichester Toronto, John Wiley & Sons, Inc.*, 1979.

[98] L. Gehm, “Rheologie, Praxisorientierte Grundlagen und Glossar”, *Vincentz Verlag, Hannover*, 1998.

[99] M. L. Williams, R. F. Landel und J. D. Ferry, “The Temperature Dependence of Relaxation Mechnisms in amorphous Polymers and other Glas forming Liquids”, *Journal of American Chem. Society*, 77, S. 3701, 1955.

[100] W. Ostwald, “über die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme”, *Kolloid-Z. 36:99*, 1925.

[101] R. S. Lenk, “Rheologie der Kunststoffe, Grundlagen”, *Carl Hanser Verlag München*, 1971.

[102] H. Münstedt, “Rheologisce Eigenschaften einiger Kunststoffschmelzen”, *Praktische Rheologie der Kunststoffe, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf*, S. 63–82, 1978.

[103] Z. Tadmor und I. Klein, “Engineering Principles of Plastificating Extrusion”, *The Polymer Science and Engineering Series of the Society of Plasics Engineers, Inc., Van Nostrand Reinhold Company, New York Cincinnati Toronto London Melbourne*, 1970.

[104] R. Mehling und H.-G. Fritz, “Heat Transfer and Melt Flow Simulation in Cooled-die Extrusion”, *The Polymer Processing Society, Sixteenth International Meeting, Shangai, China*, I, S. 249–250, 2000.

[105] W. Michaeli, “Einführung in die Kunststoffverarbeitung”, *Carl Hanser Verlag München Wien*, 4, S. 96–106, 1999.

[106] R. Sander, “Gestaltung der Düse”, *Das Extrusionswerkzeug - Leitfaden zur Gestaltung und Handhabung-, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik*, I, S. 31–76, 2000.

[107] J. Wortberg und K. P. Schmitz, “Auslegung und Optimierung von Wendelverteilerwerkzeugen”, *Kunststoffe 72*, 3, S. 198–205, 1982.

[108] H. Kühnle, “Rheologische Auslegung von Profilextrusionswerkzeugen”, *Kunststoffe 76*, 3, S. 276–281, 1986.

[109] N. N., “50 Jahre Hannover Messe”, *GAK*, 6, S. 494, 1997.

Lebenslauf

Ralf Mehling

Geboren	am 18.03.1968 in Lippstadt (Nordrhein-Westfalen).

Schulbildung:

1974 – 1977	Grundschule in Badwaldliesborn und Rhode.
1977 – 1984	Hauptschule in Olpe und Finnentrop,
1984 – 1986	Höhere Berufsfachschule für Wirtschaft, Fachhochschulreife,

Berufsausbildung:

1986 – 1988	Berufsausbildung zum Federmacher.

Studium:

1988 – 1995	Studium des allgemeinen Maschinenbaus an der Universität-Gesamthochschule Siegen.

Berufstätigkeit:

1995 – 2001	Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Kunststoff-technologie der Universität Stuttgart.
seit 2001	Berechnungs-Ingenieur in der Antriebsentwicklung, BMW, München

ISBN 3-00-011045-3