

Schneckenelemente für mehrwellige Schneckenmaschinen

Die Erfindung betrifft Schneckenelemente für mehrwellige Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnig drehenden Schneckenwellen, die Verwendung der Schneckenelemente in mehrwelligen Schneckenmaschinen, ein Verfahren zur Extrusion plastischer Massen unter Verwendung dieser Schneckenelemente sowie ein Verfahren zur Erzeugung der Schneckenelemente.

Gleichsinnig drehende Zwei- oder ggf. Mehrwellenmaschinen, deren Rotoren sich gegenseitig exakt abschaben, sind bereits seit langem bekannt (siehe z.B. DP 862 668). In der Polymerherstellung und -verarbeitung haben Schneckenmaschinen, die auf dem Prinzip exakt abschabender Profile beruhen, eine vielfältige Nutzung erfahren. Dies beruht vor allem darauf, dass Polymerschmelzen an Oberflächen anhaften und unter üblichen Verarbeitungstemperaturen mit der Zeit degradieren, was durch die selbstreinigende Wirkung der exakt abschabenden Schnecken unterbunden wird. Regeln zur Erzeugung exakt abschabender Schneckenprofile sind beispielsweise in [1] ([1] = Klemens Kohlgrüber: „Der gleichläufige Doppelschneckenextruder“, Hanser Verlag München 2007, Seiten 96 - 109) dargestellt. Hier wird auch beschrieben, dass ein vorgegebenes Schneckenprofil auf der ersten Welle eines Doppelschneckenextruders das Schneckenprofil auf der zweiten Welle des Doppelschneckenextruders bestimmt ([1], Seite 97). Das Schneckenprofil auf der ersten Welle wird daher als das erzeugende Schneckenprofil bezeichnet. Das Schneckenprofil auf der zweiten Welle folgt aus dem Schneckenprofil der ersten Welle des Doppelschneckenextruders und wird daher als das erzeugte Schneckenprofil bezeichnet. Bei einem Mehrwellenextruder werden das erzeugende Schneckenprofil und das erzeugte Schneckenprofil auf benachbarten Wellen immer abwechselnd eingesetzt. Moderne Doppelschneckenextruder verfügen über ein Baukastensystem, bei dem verschiedene Schneckenelemente auf einer Kernwelle aufgezogen werden können. Hiermit kann der Fachmann den Doppelschneckenextruder an die jeweilige Verfahrensaufgabe anpassen.

Im Stand der Technik sind Schneckenelemente bekannt, bei denen ein Knick im Querschnittprofil am Schneckenkamm auftritt und einen abrupten Übergang zur Gewindeflanke bildet, wobei der Kamm aus einem Kreisbogen mit Radius = Außendurchmesser des Profils besteht, mit dem Drehpunkt des Profils als Mittelpunkt. Dieser Knick am Übergang zur Flanke des Profils bildet auf dem Schneckenelement eine Kante. Eine der wesentlichen Aufgaben, die auf Mehrwellenmaschinen durchgeführt werden, ist das Dispergieren von

flüssigen Phasen oder Schmelzen, die nicht homogen ineinander mischbar sind oder das Dispergieren von Feststoffen in Polymerschmelzen. Aus der technischen Literatur ist bekannt (siehe z.B. Chang Dae Han: „*Multiphase Flow in Polymer Processing*“, Academic Press, New York 1981), dass eine Kombination aus Scherströmung und Dehnströmung für schwierige Dispergieraufgaben optimal ist. Eine solche Strömungsform liegt in einem Schneckenkanal vor, wo die Masse einerseits durch die Rotation der Wellen geschert und andererseits durch die Konvergenz des Schneckenkanals zum Kamm hin gleichzeitig gedehnt wird. Im Bereich des Schneckenkamms liegt allerdings eine reine Scherströmung vor, die bei schwierigen Dispergieraufgaben kaum zur Dispergierung beitragen wird. Andererseits wird im Spalt zwischen dem Schneckenkamm und dem Gehäuse beziehungsweise der Nachbarwelle der größte Teil der eingetragenen Energie dissipiert. Deshalb trägt dieser Bereich maßgeblich zur Erhitzung der Polymermasse und damit potentiell zur thermischen Schädigung bei, ohne einen Beitrag zur Verfahrensaufgabe der Dispergierung zu leisten. Eine Ausnahmestellung haben exzentrisch angeordnete Kreisscheiben, die bekanntermaßen exakt abschabend angeordnet werden können. Sie weisen keinen Kambereich mit reiner Scherströmung auf. Sie sind für ihre exzellente Dispergierwirkung bekannt, weisen aber ebenfalls eine hohe Energieeinleitung auf, weil sie über einen großen Umfangsbereich einen sehr engen Spalt erzeugen. Ferner sind sie auf eine Gangzahl $Z = 1$ beschränkt.

Die internationalen Patentanmeldungen WO 2009/152968 A1 und WO 2011/069896 A1, deren gesamter Inhalt hiermit durch Verweis in der vorliegenden Anmeldung einbezogen ist, beschreiben auch Schneckenelemente für mehrwellige Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnigen Schneckenwellen. Diese Schneckenelemente wurden entwickelt, dass sie Profile im axialen Querschnitt aufweisen, die durch stetig differenzierbare Profilkurven darstellbar sind, um der obigen Problematik zu begegnen. Allerdings wurde eine optimale Leistung der Schneckenelemente auf allen Anwendungsgebieten damit noch nicht erreicht.

Die europäische Patentanmeldung EP 1093905 A2, die unter anderem Doppelschneckenextruder offenbart, geht bereits auf das Problem der Vermeidung der dissipativen Erwärmung des zu extrudierenden Materials bei hoher dispersiver und distributiver Mischwirkung ein, bietet jedoch nur eine unzureichende Lösung.

Auch die deutsche Patentanmeldung DE 102008026862 A1 beschäftigt sich mit der Verbesserung der dispersiven und distributiven Mischwirkung bei Mehrwellenextrudern, geht

aber nicht auf das Problem der dissipativen Erwärmung des zu extrudierenden Materials ein.

In der europäischen Patentanmeldung EP 087536 A2 wird zwar einerseits auf eine Verbesserung der dispersiven und distributiven Mischwirkung bei Mehrwellenextrudern, andererseits auf eine schonende Verarbeitung abgehoben, jedoch nicht auf eine Verbesserung der
5 dispersiven und distributiven Mischwirkung in Verbindung mit einer schonenden Verarbeitung.

Die europäische Patentanmeldung EP 0002131 A1 offenbart Mehrwellenextruder mit verbesserter Knetwirkung auf Kunststoffen. Diese Patentanmeldung geht aber weder auf die
10 Verbesserung der dispersiven oder distributiven Mischwirkung ein, noch geht sie auf das Problem der dissipativen Erwärmung des zu extrudierenden Materials ein.

Die internationale Patentanmeldung WO 2001/006516 A1 offenbart Mehrwellenextruder mit verbesserter dispersiver Mischwirkung. Jedoch geht auch diese Patentanmeldung nicht auf das Problem der dissipativen Erwärmung des zu extrudierenden Materials ein.

15 Ausgehend vom Stand der Technik stellt sich daher die Aufgabe, Schneckenelemente für mehrwellige Schneckenmaschinen bereitzustellen, die bei möglichst geringer Energieeinkleitung eine gegenüber dem Stand der Technik verbesserte Dispergierwirkung aufweisen.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt erfindungsgemäß durch Schneckenelemente für mehrwellige Schneckenmaschinen mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und durch ein Verfahren
20 zur Erzeugung dieser Schneckenelemente mit den Merkmalen des Anspruchs 10,. Bevorzugte Ausgestaltungen und Anwendungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen und weiteren unabhängigen Ansprüchen angegeben.

Überraschend wurde gefunden, dass die Aufgabe durch Schneckenelemente gelöst wird, deren Profil über den gesamten Querschnitt durch eine Profilkurve darstellbar ist, die nicht
25 stetig differenzierbar ist, sondern einen Knick in ihrem Verlauf aufweist, der innerhalb eines Außenradius der Profilkurve liegt, wobei das Verhältnis eines Krümmungsradius des Schneckenprofils zum Außenradius des Profils 0,05 bis 0,95 beträgt. Dies gilt insbesondere an dem Punkt P_A , der das Gehäuse abreinigt. Der Knick gilt als eine Stelle der abrupten Steigungsänderung oder der geometrischen Unstetigkeit in der Steigung der Profilkurve.
30 Ferner bedeutet der Begriff „innerhalb eines Außenradius der Profilkurve“, dass der Knick nicht am Außenradius der Profilkurve liegt, sondern an einer Stelle mit einem Radius, der

vom Drehpunkt bzw. von der Drehachse des jeweiligen Schneckenelements aus kleiner ist, als der Außenradius der Profilkurve.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung beträgt das Verhältnis des Krümmungsradius des Schneckenprofils zum Außenradius des Profils 0,2 bis 0,8, bevorzugt 0,3 bis 0,7, besonders bevorzugt 0,35 bis 0,65. Dies gilt insbesondere an dem Punkt P_A , der das Gehäuse abreinigt. Falls die Profilkurve aus verschiedenen Funktionen abschnittsweise zusammengesetzt ist, kann der Krümmungsradius ggf. unstetig verlaufen, d.h. die Grenzwerte des Kurvenradius für Werte bei Annäherung an einen Punkt in einer Drehrichtung ist anders als bei Annäherung an einen Punkt in der entgegengesetzten Drehrichtung. Ist ein solcher Übergang gerade bei dem Außenradius des Profils, so gelten die bevorzugten Bereiche bevorzugt für mindestens einen der beiden Grenzwerte.

Gegenstand der Erfindung sind daher Schneckenelemente für mehrwellige Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnig drehenden Schneckenwellen, wobei diese Schneckenelemente paarweise exakt abschabend sind und aus diesen Schneckenelementen zusammengesetzte Schneckenwellen zwei oder mehreren Schneckengänge aufweisen, wobei das erzeugende und das erzeugte Schneckenprofil über den gesamten Querschnitt jeweils durch eine Profilkurve darstellbar sind, die mindestens einen Knick oder eine geometrische Unstetigkeit in der Steigung der Profilkurve aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Knick oder die mindestens eine Unstetigkeit nicht am Außenradius der Profilkurve liegt, wobei das Verhältnis eines Krümmungsradius des Schneckenprofils zum Außenradius des Profils 0,05 bis 0,95 beträgt. Dies gilt insbesondere an dem Punkt P_A , der das Gehäuse abreinigt. Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente sollen sich stets in mindestens einem Punkt bei gleichsinniger Rotation mit gleicher Drehzahl um zwei, in einem Abstand a parallel zueinander angeordnete Drehachsen berühren.

Dabei ist die Erfindung nicht auf Schneckenelemente aus der heutzutage üblichen Modulbauweise einer Schnecke aus Schneckenelementen und Kernwellen beschränkt, sondern auch auf Schnecken in Massivbauweise anwendbar. Daher sind unter dem Begriff Schneckenelemente auch Schnecken in Massivbauweise zu verstehen. Obwohl der mindestens eine Knick eine Kante im Profil des Schneckenelements bildet, liegt er nicht am Schneckenkamm sondern ist radial nach innen versetzt, so dass er zur Dispergierung der Polymer-Masse beitragen kann, ohne einen erheblichen Beitrag zur deren Erhitzung zu leisten.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung lassen sich die Querschnittsprofile (im Folgenden kurz Profile oder auch Schneckenprofile genannt) der erfindungsgemäßen Schneckenelemente über ihren gesamten Verlauf abgesehen von dem besagten mindestens einen Knick durch eine stetig differenzierbare Kurve darstellen. Vorzugsweise werden die Abschnitte der stetig differenzierbaren Profilkurven durch das in der WO 2011/069896 A1 beschriebene Verfahren erzeugt.

Wie oben bereits mit Bezug auf das erzeugende und das erzeugte Schneckenprofil erwähnt, kann das Querschnittsprofil eines Schneckenelements vorgeben werden, wobei sich das Querschnittsprofil des anderen Schneckenelements aus diesem vorgegebenen Profil einfach ableiten lässt. Die Schneckenprofile bzw. Schneckenelemente werden hier der Einfachheit halber auch als korrespondierende Profile bzw. Elemente bezeichnet. Dabei muss das erzeugende oder vorgegebene Profil nur wenige, einfach zu realisierende Kriterien erfüllen. Die Ableitung oder die Erzeugung des Profils des korrespondierenden Schneckenelements erfolgt auf einfache Weise entweder zeichnerisch oder rechnerisch. Dies ermöglicht die Konstruktion einer außerordentlichen Vielfalt an korrespondierenden Schneckenelementen. Eine Kurve, die das Querschnittsprofil eines Schneckenelements beschreibt, muss die folgenden Kriterien erfüllen, damit sich aus der Kurve ein Querschnittsprofil eines korrespondierenden Schneckenelements erzeugen lässt: die Kurve muss geschlossen sein, die Kurve muss stetig sein, die Kurve muss konvex sein, die Kurve muss abschnittsweise stetig differenzierbar sein und die Kurve muss in jedem Punkt einen Krümmungsradius aufweisen, der kleiner oder gleich dem Achsabstand a zwischen den Schneckenelementen ist.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird das erzeugende Querschnittsprofil des einen Schneckenelements in einer Ebene durch eine stetige, abschnittsweise stetig differenzierbare, geschlossene, konvexe Kurve $\vec{p}$ und das erzeugte Querschnittsprofil des anderen Schneckenelements aus der Kurve $\vec{q}$ gemäß der folgenden Beziehung (1) gebildet:

$$\vec{q} = \vec{p} + a \cdot \vec{n}(\vec{p}) + \vec{a} \quad (1),$$

wobei

- die Kurve $\vec{p}$ in jedem Punkt einen Krümmungsradius ρ aufweist, der kleiner oder gleich dem Achsabstand a der Schneckenelemente ist,

- für jeden Punkt der Kurve $\vec{p}$ innerhalb eines stetig differenzierbaren Abschnitts ein normierter Normalenvektor $\vec{n}(\vec{p})$ mit der Länge 1 existiert, der in dem jeweiligen Punkt senkrecht auf der Tangente zur Kurve $\vec{p}$ steht und in Richtung des Mittelpunktes des zum jeweiligen Punkt der Kurve $\vec{p}$ gehörigen Krümmungskreises zeigt,
- 5 - $\vec{a}$ ein Vektor ist, der in Richtung vom Drehpunkt des erzeugenden Profils zum Drehpunkt des erzeugten Profils in der Querschnittsebene führt und die Länge a hat.

In diesem Zusammenhang kann die Kurve $\vec{p}$ abschnittsweise durch eine einzige mathematische Funktion beschrieben werden. Als Beispiele seien dem Fachmann bekannte Funktionen wie Kreisfunktionen oder Ellipsenfunktionen, Parabelfunktionen oder Hyperbelfunktionen genannt. Auch ist beispielsweise möglich, Funktionen in der Form:

$$\vec{p} = (r_0 - f(s)) \cdot \begin{pmatrix} \cos(s) \\ \sin(s) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}$$

darzustellen, wodurch man, abhängig von der Gestalt der Funktion $f(s)$ sich bei der Ausführung von Schneckenelementen zwischen einem Gehäuse mit einem Radius r_0 und dem rotierenden Schneckenelement ein Spalt von frei wählbarer Gestalt ergibt. Die Funktion $f(s)$ kann beispielsweise eine lineare Funktion oder quadratische Funktion von s , eine Hyperbelfunktion oder eine Exponentialfunktion sein.

Weiterhin sind Funktionen, deren Werte durch Kontrollpunkte bestimmt werden, wie beispielsweise B-Spline-Funktionen, Bezier-Funktionen, rationale Bezier-Funktionen sowie nicht-uniforme rationale B-Splines (NURBS) genannt. Bezier-Funktionen, rationale Bezier-Funktionen und NURBS sind bevorzugt, weil sie häufig in der Konstruktion mit CAD-Systemen (CAD = Computer Aided Design) eingesetzt werden und dienen dort vor allem dazu, beliebige Formen in geometrisch anschaulicher Form durch Verschieben von Kontrollpunkten zu definieren. Besonders bevorzugt sind quadratische und kubische (d.h. mit $n = 2$ und $n = 3$) Bezier-Funktionen und kubische rationale Bezier-Funktionen.

Als Beispiel sollen hier Bezier-Funktionen angeführt werden. Bezier-Funktionen haben bekanntlich die Form

$$\vec{C}(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) \vec{P}_i$$

wobei $\vec{P}_i$ die Koordinaten der Kontrollpunkte und $B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$ ein Bernstein-Polynom ist.

Rationale Bezier-Funktionen vom Grad n , die beispielsweise in M. S. Floater: "*Derivatives of Rational Bezier Curves*", Comp. Aid. Geom. Design 9, 1992, 161-174 beschrieben werden, haben bekanntlich die Form

$$\vec{P}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) w_i \vec{P}_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) w_i}$$

wobei $\vec{P}_i$ die Koordinaten der Kontrollpunkte der Funktion und w_i ihre Gewichtung darstellt.

Ebenso kann die Kurve $\vec{p}$ abschnittsweise durch verschiedene mathematische Funktionen beschrieben werden, wobei die abschnittswisen Funktionen bevorzugt den im vorherigen Absatz genannten Funktionen entsprechen. Ein Sonderfall der abschnittswisen Beschreibung durch mathematische Funktionen stellt die Beschreibung durch Kreisbögen dar. Das heißt, es ist möglich, einen Teil oder die gesamte Kurve $\vec{p}$ – und damit einen Teil oder das erzeugende Querschnittsprofil des einen Schneckenelements – durch Kreisbögen zu beschreiben. Aus der obigen Beziehung (1), nämlich $\vec{q} = \vec{p} + a \cdot \vec{n}(\vec{p}) + \vec{a}$, ergibt sich, dass in diesem Fall auch die Kurve $\vec{q}$ und damit das erzeugte Querschnittsprofil des anderen Schneckenelements aus Kreisbögen zusammengesetzt ist.

Die Kurve $\vec{p}$ muss mindestens abschnittsweise stetig differenzierbar sein. An den Abschnittsgrenzen einer abschnittsweise definierten Kurve $\vec{p}$ müssen die einzelnen Abschnitte somit nicht stetig differenzierbar ineinander übergehen. Stoßen zwei Kurvenabschnitte in einem Knick-Punkt aufeinander, so ist für den Knick-Punkt bzw. die Knick-Stelle kein Tangenten- und kein Normalen-Vektor definiert. Dementsprechend ergibt sich für die Knick-Stelle des Profils des einen Schneckenelements der korrespondierende Abschnitt der Kurve $\vec{q}$ des anderen Schneckenelements nicht unmittelbar aus der obigen Beziehung (1). Zu jedem Knick im Querschnittsprofil des einen Schneckenelements korrespondiert ein Kreisbogen im Profil des anderen Schneckenelements. Die Größe eines Kreisbogens ist durch die Angabe seines Zentriwinkels und seines Radius gegeben. Im Folgenden wird der Zentriwinkel eines Kreisbogens kurz als der Winkel eines Kreisbogens bezeichnet. Die Position eines Kreisbogens ist durch die Position seines Mittelpunkts und durch die Posi-

on seiner beiden Endpunkte gegeben. Ein zu einem Knick im Querschnittsprofil des einen Schneckenelements korrespondierender Kreisbogen im Querschnittsprofil des anderen Schneckenelements hat stets einen Radius, dessen Größe dem Achsabstand a entspricht. Ferner hat ein zu einem Knick korrespondierender Kreisbogen stets einen Winkel, der demjenigen Winkel entspricht, in dem die Tangenten an die Kurvenabschnitte in dem Knickpunkt aufeinandertreffen. Umgekehrt gilt entsprechend, dass ein korrespondierender Profilabschnitt der Kurve $\vec{q}$ ein „Knick“ ist, wenn ein Profilabschnitt der Kurve $\vec{p}$ ein Kreisbogen mit dem Radius a ist.

Insofern ist es vorteilhaft, einen Knick durch einen Kreisbogen zu beschreiben, dessen Radius gleich 0 ist. An einem Knick erfolgt ein Übergang eines ersten Kurvenabschnitts durch Drehung um den Winkel des Kreisbogens mit Radius Null in einen zweiten Kurvenabschnitt. Eine Tangente an den ersten Kurvenabschnitt im Mittelpunkt des Kreisbogens mit dem Radius Null schneidet eine Tangente an den zweiten Kurvenabschnitt ebenfalls im Mittelpunkt des Kreisbogens in einem Winkel, der dem Winkel des Kreisbogens entspricht. Unter Berücksichtigung des Kreisbogens gehen alle benachbarten Kurvenabschnitte (erster Kurvenabschnitt $\rightarrow$ Kreisbogen mit Radius Null $\rightarrow$ zweiter Kurvenabschnitt) tangential ineinander über. Zweckmäßigerweise wird ein Kreisbogen mit einem Radius Null wie ein Kreisbogen behandelt, dessen Radius gleich ϵ ist, wobei ϵ eine sehr kleine positive reelle Zahl ist, die gegen 0 strebt ($\epsilon \ll 1$, $\epsilon \rightarrow 0$). Auf dem korrespondierenden Querschnittsprofil entsteht ein Kreisbogen mit demselben Winkel und einem Radius = Achsabstand. Dieser Sachverhalt wird in der WO2011/069896 A1 verdeutlicht (WO2011/069896 A1, Seite 8, Zeilen 5 - 11).

In bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung lassen sich die Profile der Schneckenelemente daher auch ausschließlich durch eine Anordnung von Kreisbögen beschreiben. Das Schneckenprofil erzeugender und erzeugter erfindungsgemäßer Schneckenelemente setzt sich in seiner Gesamtheit aus n Kreisbögen zusammen, wobei n größer oder gleich vier ist. Jeder der n Kreisbögen besitzt einen Anfangs- und einen Endpunkt. Einige der Kreisbögen können an ihren Anfangs- und Endpunkten tangential ineinander übergehen, so dass sie teilweise eine stetig differenzierbare Profilkurve bilden. An der Stelle des Knicks bzw. der abrupten Steigungsänderung oder der geometrischen Unstetigkeit in der Steigung der Profilkurve gehen die jeweiligen Kreisbögen jedoch nicht tangential ineinander über sondern treffen einander in einem Winkel, vorzugsweise in einem Winkel zwischen 90°

und 180° , weiter bevorzugt zwischen 120° und 180° , und noch weiter bevorzugt zwischen 140° und 180° .

Die Position eines jeden Kreisbogens j ($j = 1$ bis n) ist durch die Angabe von zwei verschiedenen Punkten eindeutig festlegbar. Zweckmäßigerweise wird die Position eines
5 Kreisbogens durch Angabe des Mittelpunktes und/oder des Anfangs- oder Endpunktes festgelegt. Die Größe eines einzelnen Kreisbogens j ist durch den Radius r_j und den Winkel α_j um den Mittelpunkt zwischen Anfangs- und Endpunkt festgelegt, wobei der Radius r_j größer als 0 und kleiner als der Achsabstand a zwischen den Wellen ist und der Winkel α_j im Bogenmaß größer oder gleich 0 und kleiner oder gleich 2π ist, wobei π die Kreiszahl ist.

10 In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die Schneckenelemente dadurch gekennzeichnet, dass

- das erzeugende Schneckenprofil und das erzeugte Schneckenprofil in einer Ebene liegen,
- die Drehachse des erzeugenden Schneckenprofils und die Drehachse des erzeugten
15 Schneckenprofils in einem Abstand a (Achsabstand) jeweils senkrecht auf der besagten Ebene der Schneckenprofile stehen, wobei der Schnittpunkt der Drehachse des erzeugenden Schneckenprofils mit der besagten Ebene als Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils und der Schnittpunkt der Drehachse des erzeugten Schneckenprofils mit der besagten Ebene als Drehpunkt des erzeugten Schnecken-
20 profils bezeichnet wird,
- die Anzahl der Kreisbögen des gesamten erzeugenden Schneckenprofils n größer oder gleich vier ($n \geq 4$) ist,
- der Außenradius r_a des erzeugenden Schneckenprofils größer als Null ($r_a > 0$) und kleiner als der Achsabstand a ($r_a < a$) ist,
- 25 - der Kernradius r_i des erzeugenden Schneckenprofils größer als Null ($r_i > 0$) und kleiner oder gleich Außenradius r_a ($r_i \leq r_a$) ist,
- die Kreisbögen ein geschlossenes Schneckenprofil bilden, d.h. die Summe der Winkel α_j aller Kreisbögen j gleich 2π ist, wobei π die Kreiszahl ($\pi \approx 3,14159$) ist,
- die Kreisbögen ein konvexes Schneckenprofil bilden,

- jeder der Kreisbögen des erzeugenden Schneckenprofils innerhalb oder auf den Grenzen eines Kreistrings mit dem Außenradius r_a und dem Kernradius r_i liegt, dessen Mittelpunkt auf dem Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils liegt,
- mindestens einer der Kreisbögen des erzeugenden Schneckenprofils den Außenradius r_a des erzeugenden Schneckenprofils in einem Punkt P_A berührt,
- mindestens einer der Kreisbögen des erzeugenden Schneckenprofils den Kernradius r_i des erzeugenden Schneckenprofils in einem Punkt P_I berührt,
- die Anzahl der Kreisbögen n' des erzeugten Schneckenprofils gleich der Anzahl der Kreisbögen n des erzeugenden Schneckenprofils ist,
- der Außenradius r_a' des erzeugten Schneckenprofils gleich der Differenz aus Achsabstand und Kernradius des erzeugenden Schneckenprofils ist ($r_a' = a - r_i$),
- der Kernradius r_i' des erzeugten Schneckenprofils gleich der Differenz aus Achsabstand und Außenradius des erzeugenden Schneckenprofils ist ($r_i' = a - r_a$),
- der Winkel $\alpha_{j'}$ des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils gleich dem Winkel α_j des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils ist, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich von 1 bis zur Anzahl der Kreisbögen n beziehungsweise n' durchlaufen,
- die Summe von Radius $r_{j'}$ des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils und Radius r_j des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils gleich dem Achsabstand a ist, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich 1 bis zur Anzahl der Kreisbögen n beziehungsweise n' durchlaufen,
- der Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils einen Abstand von dem Mittelpunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils besitzt, der gleich dem Achsabstand a ist, und der Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils einen Abstand von dem Drehpunkt des erzeugten Schneckenprofils besitzt, der gleich dem Abstand des Mittelpunkts des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils von dem Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils ist, und die Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils und dem Mittelpunkt des j -

- ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils eine Parallele zu einer Verbindungslinie zwischen dem Drehpunkt des erzeugten Schneckenprofils und dem Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils ist, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich 1 bis zur Anzahl der Kreisbögen n beziehungsweise n' durchlaufen,
- 5
- ein Anfangspunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils in einer Richtung bezogen auf den Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils liegt, die entgegengesetzt derjenigen Richtung ist, die ein Anfangspunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils bezogen auf den Mittelpunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils besitzt, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich 1 bis zur Anzahl der Kreisbögen n beziehungsweise n' durchlaufen.
- 10

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die Profile erfindungsgemäßer Schneckenelemente dadurch charakterisiert, dass sie mit Winkellineal und Zirkel konstruiert werden können. Ein tangentialer Übergang zwischen dem j -ten und dem $(j+1)$ -ten Kreisbogen des erzeugenden Schneckenprofils kann konstruiert werden, indem um den Endpunkt des j -ten Kreisbogens ein Kreis mit dem Radius r_{j+1} geschlagen wird und der näher zum Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils gelegene Schnittpunkt dieses Kreises mit der Geraden, die durch den Mittelpunkt und den Endpunkt des j -ten Kreisbogens definiert ist, der Mittelpunkt des $(j+1)$ -ten Kreisbogens ist. Praktischerweise wird man anstelle von Winkellineal und Zirkel ein Computerprogramm zur Konstruktion der Schneckenprofile verwenden.

15

20

Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente können symmetrisch oder unsymmetrisch sein; bevorzugt sind erfindungsgemäße Schneckenelemente symmetrisch. Symmetrische Schneckenelemente können achsensymmetrisch oder punktsymmetrisch sein; bevorzugt sind erfindungsgemäße Schneckenelemente achsensymmetrisch. Vorzugsweise haben die Schneckenelemente jeweils zwei Stellen der Unstetigkeit im Profilkurvenverlauf innerhalb eines Außenradius der Profilkurve, bspw. in einem Winkel von 180° oder π im Bogenmaß um die Profilkurve voneinander versetzt. Vorzugsweise liegt jede dieser Stellen auf einer Auslaufseite eines Kamms der Profilkurve.

25

30

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung beträgt die Gangzahl Z solcher erfindungsgemäßer achsensymmetrischer Schneckenelemente im Bereich von 2 bis 8; be-

sonders bevorzugt 2 bis 4. Die Profilkurve des Querschnitts erfindungsgemäßer symmetrischer Schneckenelemente lassen sich damit in Profil-Abschnitte unterteilen, die durch Punkt- oder Achsenspiegelung an den Symmetriezentren bzw. -achsen des Profils ineinander überführen. Die Zahl der Kreisbögen n , die einen der Profil-Abschnitte bilden, liegt
5 bevorzugt im Bereich von 2 bis 8, besonders bevorzugt im Bereich von 3 bis 6.

Vorzugsweise lässt sich die Profilkurve des Querschnitts erfindungsgemäßer achsensymmetrischer Schneckenelemente in $2 \cdot Z$ Profil-Abschnitte unterteilen, die durch Achsenspiegelung an den Symmetrieachsen des Profils ineinander überführt werden können. Aufgrund seiner Symmetrie lässt sich das Profil eines achsensymmetrischen Schneckenelements mit einer Gangzahl Z also durch einen Profil-Abschnitt in einem Ausschnitt von
10 $360^\circ/(2 \cdot Z)$, der zwischen zwei Symmetrieachsen des Profils liegt, vollständig definieren. Das restliche Profil ergibt sich durch Spiegelung des Profil-Abschnitts an den Z Symmetrieachsen, die sich im Drehpunkt schneiden und den Winkel von 360° um den Drehpunkt in $2 \cdot Z$ Winkel der Größe $360^\circ/(2 \cdot Z)$ unterteilen. Bei achsensymmetrischen Schneckenelementen sind ferner die korrespondierenden Schneckenprofile auf benachbarten Wellen
15 (erzeugendes und erzeugtes Profil) gleich, bzw. lassen sich durch Rotation zur Deckung bringen. Analoges gilt für punktsymmetrische Schneckenprofile, bei dem sich die symmetrischen Teile jeweils durch Punktspiegelung am Symmetriezentrum ineinander überführen lassen.

20 In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Profil-Abschnitt eines erfindungsgemäßen achsensymmetrischen Schneckenelements dadurch gekennzeichnet, dass er sich zwischen einem Punkt P_A , der auf dem Außenradius des Profils liegt, und einem Punkt P_I , der auf dem Kernradius des Profils liegt, aus Kreisbögen zusammensetzt. Die Kreisbögen gehen ineinander über und bilden über den größten Teil des Profil-Abschnitts eine
25 stetig differenzierbare Kurve aber der Profil-Abschnitt umfasst mindestens eine Stelle, an der die Kreisbögen nicht tangential ineinander übergehen sondern einen Knick bilden bzw. sich in einem Winkel zwischen 90° und 180° treffen. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform setzt sich ein Profil-Abschnitt eines erfindungsgemäßen Schneckenelements zwischen den Punkten P_A und P_I aus genau drei Kreisbögen zusammen. Mit drei Kreisbögen kann das Profil im Bereich des Punktes P_A , der die Zylinderwand abreinigt, durch
30 Wahl eines kleinen Radius schlanker gestalten, wodurch die Energiedissipation weiter reduziert wird.

In einer anderen Ausführungsform der Erfindung kann ein punktsymmetrisches Schneckenprofil mit Gangzahl Z in Z symmetrische Teile aufgeteilt werden, wobei die symmetrischen Teile durch Punktspiegelung am Symmetriezentrum bzw. am Drehpunkt des Profils ineinander überführt werden können. Bei punktsymmetrischen Schneckenelementen sind die korrespondierenden Schneckenprofile auf benachbarten Wellen (erzeugendes und erzeugtes Profil) gleich, bzw. lassen sich durch Rotation zur Deckung bringen.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Profil-Abschnitt eines erfindungsgemäßen Schneckenelements dadurch gekennzeichnet, dass er sich aus mehreren Kreisbögen zusammensetzt, die tangential ineinander übergehen und eine stetig differenzierbare Kurve zwischen zwei Stellen bilden, an denen der jeweilige Kreisbogen nicht tangential in den benachbarten Profil-Abschnitt übergeht sondern ihn in einem Winkel trifft, vorzugsweise in einem Winkel zwischen 90° und 180° , weiter bevorzugt in einem Winkel zwischen etwa 120° und 180° , und noch weiter bevorzugt in einem Winkel zwischen etwa 140° und 180° . Mit anderen Worten, die Endpunkten jedes Profil-Abschnitts in dieser Ausführungsform bilden die Knick-Stellen in der Profilkurve.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung beträgt das Verhältnis vom Außenradius r_a des Schneckenelements zum Achsabstand a für zweigängige erfindungsgemäße Schnecken zwischen 0,54 und 0,7 und besonders bevorzugt zwischen 0,58 und 0,63, für dreigängige Schnecken zwischen 0,53 und 0,57 und besonders bevorzugt zwischen 0,54 und 0,56, sowie für viergängige Schnecken zwischen 0,515 und 0,535.

Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente können als Förderelemente oder Knetelemente oder Mischelemente ausgebildet sein.

Ein Förderelement zeichnet sich bekanntlich dadurch aus (siehe zum Beispiel [1], Seiten 243 - 237), dass das Schneckenprofil in Achsrichtung kontinuierlich schraubenförmig verdreht und fortgesetzt wird. Dabei kann das Förderelement rechts- oder linksgängig sein. Die Steigung t des Förderelements kann z.B. Werte von dem 0,1 -fachen bis 10-fachen des Außendurchmessers annehmen, wobei unter der Steigung die axiale Länge verstanden wird, die für eine vollständige Drehung des Schneckenprofils erforderlich ist. Bevorzugt liegt die Steigung t im Bereich des 0,3- fachen bis 3-fachen des Außendurchmessers. Die axiale Länge eines Förderelements wird aus praktischen Gründen bevorzugt in ganzzahligen Vielfachen von t/Z ausgeführt.

Ein Knetelement zeichnet sich bekanntlich dadurch aus (siehe zum Beispiel [1], Seiten 237 - 240), dass das Schneckenprofil in Achsrichtung absatzweise in Form von Knetscheiben fortgeführt wird. Die Anordnung der Knetscheiben kann rechts- oder linksgängig oder neutral erfolgen. Die axiale Länge der Knetscheiben liegt bevorzugt im Bereich des 0,02-
 5 fachen bis 2-fachen des Außendurchmessers. Der axiale Abstand zwischen zwei benachbarten Knetscheiben liegt bevorzugt im Bereich des 0,001 -fachen bis 0,1 -fachen des Außendurchmessers.

Mischelemente werden bekanntlich dadurch gebildet (siehe zum Beispiel [1], Seiten 242-244), dass Förderelemente mit Durchbrüchen in den Schneckenkämmen ausgeführt werden. Die Mischelemente können rechts- oder linksgängig sein. Ihre Steigung t liegt bevorzugt im Bereich des 0,1 -fachen bis 10-fachen des Außendurchmessers. Die axiale Länge eines Mischelements wird analog zu den Förderelementen bevorzugt in ganzzahligen Vielfachen von t/Z ausgeführt. Die Durchbrüche haben bevorzugt die Form einer u- oder v-förmigen Nut. Wird das Mischelement ausgehend von einem förderaktiven Element gebil-
 10 det, so werden die Nuten bevorzugt gegenfördernd oder achsparallel angeordnet.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist weiterhin ein Verfahren zur Erzeugung der erfindungsgemäßen Schneckenelemente, die sich bei gleichsinniger Rotation mit gleicher Drehzahl um zwei, in einem Abstand a parallel zueinander angeordnete Drehachsen stets in mindestens einem Punkt berühren.

20 In einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens wird in einer Ebene E senkrecht zu den Drehachsen das (erzeugende) Querschnittsprofil des einen Schneckenelements durch eine stetige, abschnittsweise stetig differenzierbare, geschlossene, konvexe Kurve $\vec{p}$ und das (erzeugte) Querschnittsprofil des anderen Schneckenelements aus der Kurve $\vec{q}$ gemäß der folgenden Beziehung (1) gebildet: $\vec{q} = \vec{p} + a \cdot \vec{n}(\vec{p}) + \vec{a}$ (1), wobei

- 25 - die Kurve $\vec{p}$ in jedem Punkt einen Krümmungsradius ρ aufweist, der kleiner oder gleich dem Achsabstand a der Schneckenelemente ist,
- für jeden Punkt der Kurve $\vec{p}$ innerhalb eines stetig differenzierbaren Abschnitts ein normierter Normalenvektor $\vec{n}(\vec{p})$ mit der Länge 1 existiert, der in dem jeweiligen Punkt senkrecht auf der Tangente zur Kurve $\vec{p}$ steht und in Richtung des Mittelpunktes des zum jeweiligen Punkt der Kurve $\vec{p}$ gehörigen Krümmungskreises zeigt,
- 30

- $\vec{a}$ ein Vektor ist, der in Richtung vom Schnittpunkt der Drehachse des erzeugenden Profils mit der Ebene E zum Schnittpunkt der Drehachse des erzeugten Profils mit der Ebene E führt und die Länge a besitzt.

Die Erzeugung der jeweiligen Profile nach der obigen Formel kann anhand eines Punktes an einer Kurve $\vec{p}$ vorgestellt werden. Die Profilkurven $\vec{p}$, $\vec{q}$ werden in einer Ebene senkrecht zu den Drehachsen der Schneckenelemente erzeugt. Die Drehachsen sind in einem Abstand a voneinander. Der Vektor a hat die Länge a und weist in Richtung von einer Drehachse zur anderen. Aus jedem Punkt der Profilkurve $\vec{p}$ des einen (erzeugenden) Profils lässt sich ein Punkt auf der korrespondierenden Kurve $\vec{q}$ des anderen (erzeugten) Profils erzeugen. Der Punkt auf der korrespondierenden Kurve $\vec{q}$ ergibt sich, indem man im Punkt der Kurve $\vec{p}$ eine Tangente $\vec{t}(\vec{p})$ an die Kurve legt, zu dieser Tangente den normierten Normalen-Vektoren $\vec{n}(\vec{p})$ bildet und ihn um den Faktor a verlängert {also, $a \cdot \vec{n}(\vec{p})$ } und schließlich zu diesem Vektor $a \cdot \vec{n}(\vec{p})$ den Vektor $\vec{a}$ addiert.

Wie oben schon erläutert, zeichnen sich Schneckenelemente in einer bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung durch ein Profil aus, das aus Kreisbögen zu einer Kurve zusammengesetzt wird, die mindestens eine Knick-Stelle bzw. eine Stelle der Unstetigkeit der Steigung in ihrem Verlauf aufweist, wobei diese mindestens eine Stelle innerhalb eines Außenradius der Profilkurve liegt. Vorzugsweise weist das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung von Schneckenelementen für mehrwellige Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnigen und paarweise exakt abschabenden Schneckenwellen in einem Achsabstand a mit zwei oder mehr Schneckengängen deshalb Schneckenprofile auf, die im gesamten Querschnitt aus n Kreisbögen gebildet werden, wobei n eine ganze Zahl größer oder gleich 4 ist.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung von erfindungsgemäßen Schneckenprofilen ist vorzugsweise dadurch gekennzeichnet, dass

- ein Außenradius r_a des erzeugenden Schneckenprofils größer als 0 ($r_a > 0$) und kleiner als der Achsabstand a ($r_a < a$) gewählt wird,
- ein Kernradius r_i des erzeugenden Schneckenprofils größer als 0 ($r_i > 0$) und kleiner oder gleich Außenradius r_a ($r_i \leq r_a$) gewählt wird,

- 5 - die Kreisbögen nacheinander durch Festlegung ihrer Position und Größe so angeordnet werden, dass die Kreisbögen ein geschlossenes, konvexes Schneckenprofil bilden, wobei jeder der Kreisbögen des erzeugenden Schneckenprofils innerhalb oder auf den Grenzen eines Kreistrings mit dem Außenradius r_a und dem Kernradius r_i liegt, deren Mittelpunkte auf dem Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils liegen, mindestens einer der Kreisbögen des erzeugenden Schneckenprofils den Außenradius r_a des erzeugenden Schneckenprofils in einem Punkt P_A berührt und mindestens einer der Kreisbögen des erzeugenden Schneckenprofils den Kernradius r_i des erzeugenden Schneckenprofils in einem Punkt P_I berührt,
- 10 - sich die n' Kreisbogen des erzeugten Schneckenprofils aus den n Kreisbogen des erzeugenden Schneckenprofils dadurch ergeben, dass

 - die Anzahl der Kreisbogen n' des erzeugten Schneckenprofils gleich der Anzahl der Kreisbogen n des erzeugenden Schneckenprofils ist,
 - 15 ○ der Außenradius r_a' des erzeugten Schneckenprofils gleich der Differenz aus Achsabstand a und Kernradius r_i des erzeugenden Schneckenprofils ist ($r_a' = a - r_i$),
 - der Kernradius r_i' des erzeugten Schneckenprofils gleich der Differenz aus Achsabstand a und Außenradius r_a des erzeugenden Schneckenprofils ist ($r_i' = a - r_a$),
 - 20 ○ der Winkel $\alpha_{j'}$ des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils gleich dem Winkel α_j des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils ist, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich von 1 bis zur Anzahl der Kreisbogen n beziehungsweise n' durchlaufen,
 - 25 ○ die Summe von Radius $r_{j'}$ des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils und Radius r_j des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils gleich dem Achsabstand a ist, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich 1 bis zur Anzahl der Kreisbogen n beziehungsweise n' durchlaufen,
 - 30 ○ der Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils einen Abstand von dem Mittelpunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden

- 5 Schneckenprofils besitzt, der gleich dem Achsabstand a ist, und der Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils einen Abstand von dem Drehpunkt C' des erzeugten Schneckenprofils besitzt, der gleich dem Abstand des Mittelpunkts des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils von dem Drehpunkt C des erzeugenden Schneckenprofils ist, und die Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils und dem Mittelpunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils eine Parallele zu einer Verbindungslinie zwischen dem Drehpunkt des erzeugten Schneckenprofils und dem Drehpunkt des erzeugenden Schneckenprofils ist, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich 1 bis zur Anzahl der Kreisbogen n beziehungsweise n' durchlaufen,
- 10
- ein Anfangspunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils in einer Richtung bezogen auf den Mittelpunkt des j' -ten Kreisbogens des erzeugten Schneckenprofils hegt, die entgegengesetzt derjenigen Richtung ist, die ein Anfangspunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils bezogen auf den Mittelpunkt des j -ten Kreisbogens des erzeugenden Schneckenprofils besitzt, wobei j und j' ganze Zahlen sind, die gemeinsam alle Werte im Bereich 1 bis zur Anzahl der Kreisbögen n beziehungsweise n' durchlaufen.
- 15
- 20

Das erfindungsgemäße Verfahren in der bevorzugten Variante, in dem das Schneckenprofil aus Kreisbögen zusammengefasst ist, lässt sich überraschenderweise allein mit Winkellineal und Zirkel auf Papier ausführen. Damit ist es prinzipiell sogar möglich, das Querschnittsprofil eines Schneckenelements nur mit der Hand zu erzeugen und das Querschnittsprofil des korrespondierenden Schneckenelements aus dem zeichnerisch vorgegebenen Profil zeichnerisch abzuleiten.

25

Es empfiehlt sich jedoch, das Verfahren zur Erzeugung von Schneckenprofilen auf einem Computer durchzuführen. Die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf einem Computersystem ist vorteilhaft, da die Koordinaten und Abmessungen der Profile in einer Form vorliegen, die von einem Computer weiter verarbeitet werden können. Ferner liegen die Abmessungen der Schneckenelemente auch dann in einer Form vor, in der sie einer CAD-Fräsmaschine zur Erzeugung der Schneckenelemente zugeführt werden können.

30

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist daher auch ein Computersystem zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Erzeugung von erfindungsgemäßen Schneckenprofilen auf einem Computer. Bevorzugt weist das Computersystem eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) auf, die es einem Benutzer auf einfache Weise erlaubt, die frei wählbaren Größen zur Erzeugung von Profilen über Eingabegeräte, wie z.B. Maus und/oder Tastatur einzugeben. Besonders bevorzugt weist das Computersystem eine Möglichkeit auf, Konturen von Profilen mit Hilfe von Kontrollpunkten und ggf. Wichtungen bei Funktionen, deren Werte durch Kontrollpunkte definiert werden, Funktionen, deren Werte durch Kontrollpunkte bestimmt werden, wie beispielsweise B-Spline-Funktionen, Bezier-Funktionen, rationale Bezier-Funktionen sowie nicht-uniforme rationale B-Splines (NURBS) anzugeben, wobei dies in Form von Zahlen (Koordinaten), graphisch oder mit einer Kombination aus grafischer und zahlenmäßiger Eingabe erfolgen kann. Weiterhin weist das Computersystem bevorzugt eine grafische Ausgabe auf, mittels derer die berechneten Profile auf einem grafischen Ausgabegerät wie z.B. Bildschirm und/oder Drucker visualisiert werden können.

Bevorzugt weist das Computersystem die Möglichkeit auf, berechnete Profile zu exportieren, d.h. in Form von speicherbaren Datensätzen, welche die geometrischen Maße der berechneten Schneckenelemente umfassen, für weitere Verwendungszwecke entweder auf einem Datenträger zu speichern oder an ein angeschlossenes Gerät zu übertragen. Das Computersystem ist vorzugsweise so gestaltet, dass es sowohl Querschnittsprofile als auch aus den Querschnittsprofilen generierte Schneckenelemente berechnen und die berechneten Geometrien in einem Format ausgeben kann, das von einer Maschine zur Herstellung solcher Körper z.B. einer Werkzeugmaschine, beispielsweise einer Fräsmaschine verwendet werden kann, um reale Schneckenelemente herzustellen. Solche Formate sind dem Fachmann bekannt.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ferner ein Computerprogrammprodukt, mit Programmcodemitteln zum Ausführen des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Erzeugung von erfindungsgemäßen Schneckenprofilen auf einem Computer.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung steht einem Benutzer des Computerprogrammprodukts eine bevorzugt grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung, mit deren Hilfe er die zu wählenden Parameter (Zahl der Kreisbögen des erzeugenden und erzeugten Schneckenprofils, Radien, Winkel) eingeben kann. Bevorzugt erhält er dabei Unterstüt-

zung von dem Computersystem, das den Benutzer darauf hinweist, wenn sich durch Wahl der Parameterwerte Schneckenprofile ergeben, die nicht paarweise exakt abschabend sind. Bevorzugt wird er bei der Eingabe der Parameterwerte in der Weise unterstützt, dass erlaubte Parameterwertebereiche angezeigt werden. Unter erlaubten Parameterwerten werden
5 solche Kombinationen von Parameterwerten verstanden, die zu paarweise exakt abschabenden Schneckenprofilen führen.

In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden nicht nur die Profile sondern ganze Schneckenelemente virtuell am Computer konstruiert. Das Ergebnis der Konstruktion wird bevorzugt in Form von Konstruktionszeichnungen auf einem Bildschirm oder an
10 einem Drucker ausgegeben. Ebenso ist es denkbar, das Ergebnis als elektronische Datei auszugeben, die in einer bevorzugten Ausführungsform an eine CAD-Fräsmaschine zur Erzeugung der entsprechenden Schneckenelemente weitergegeben werden kann.

Nachdem die dreidimensionalen Profile auf die beschriebene Weise erzeugt worden sind, können die Schneckenelemente z.B. mit einer Fräsmaschine, einer Drehmaschine oder
15 einer Wirbelmaschine erzeugt werden. Bevorzugte Materialien zur Erzeugung solcher Körper sind Stähle, insbesondere Nitrierstähle, Chrom-, Werkzeug- und Edelstähle, pulvermetallurgisch hergestellte metallische Verbundwerkstoffe auf Basis von Eisen, Nickel oder Kobalt, sowie ingenieurkeramische Werkstoffe wie z.B. Zirkonoxid oder Siliziumcarbid, falls es sich bei den Körpern um Extruderschnecken handelt.

20 Das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung von erfindungsgemäßen Schneckenprofilen erlaubt es, das Profil einer Schnecke von Grund auf so zu gestalten, dass es für eine vorgegebene Aufgabe optimal geeignet ist. Die nach dem Stand der Technik bekannten Schneckenelemente sind zum größten Teil nicht auf eine konkrete Aufgabe hin optimal gestaltet. Vielmehr liefern die Hersteller Schneckenelemente (Förder-, Knet- und Mischelemente)
25 aus einem festliegenden Baukastensystem unabhängig von einer konkreten Aufgabe. Durch das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung von erfindungsgemäßen Schneckenprofilen ist es möglich, das Profil von selbstreinigenden Schneckenelementen nahezu völlig frei zu gestalten und somit auf eine Anwendung hin durch kleinste Variation von Parametern für die jeweilige Anwendung zu optimieren. In diesem Zusammenhang sei
30 darauf hingewiesen, dass die Zahl der Kreisbögen zur Erzeugung von Schneckenprofilen nicht limitiert ist. Dadurch ist es möglich, Schneckenprofile, die nicht aus Kreisbögen aufgebaut und damit nicht selbstreinigend sind, durch eine ausreichend hohe Anzahl an Kreis-

bögen mit einer gewünschten Genauigkeit zu approximieren. Dabei ist das mittels Kreisbögen approximierte Profil natürlich selbstreinigend.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass sich aus einem (erzeugenden oder erzeugten) Schneckenprofil das entsprechende Längsschnittprofil berechnen lässt. Bevorzugt wird jeder Kreisbogen eines Schneckenprofils genutzt, um mittels einer expliziten Funktion einen zu diesem Kreisbogen gehörigen Teil des Längsschnitts zu berechnen. Zur Berechnung des Abstandes s eines Punktes eines Kreisbogens eines Schneckenprofils wird in einem ersten Schritt der Schnittpunkt (S_x, S_y) einer Geraden g , dadurch charakterisiert, dass die besagte Gerade in der Ebene des Schneckenprofils liegt, durch den Drehpunkt des Schneckenprofils führt und die Orientierung der Gerade durch den Winkel φ gegeben ist, mit einem Kreisbogen k_b , charakterisiert durch seinen Radius r und die Lage seines Mittelpunktes (M_x, M_y) , bestimmt. In einem zweiten Schritt wird der Abstand des Schnittpunktes (S_x, S_y) vom Drehpunkt des Schneckenprofils berechnet. Die Berechnung eines Schnittpunktes einer Geraden mit einem Kreisbogen lässt sich durch eine explizite Funktion darstellen. Gleiches gilt für die Abstandsberechnung. Für den Abstand gilt daher $s = s(\varphi, r, M_x, M_y)$. Der Winkel φ lässt sich bei bekannter Steigung t eines Schneckenelements über $\varphi/2\pi \cdot t$ in eine axiale Position z_{ax} umrechnen, so dass für den Abstand $s = s(z_{ax}, r, M_x, M_y) = s(\varphi/2\pi \cdot t, r, M_x, M_y)$ gilt. Die Funktion $s(z_{ax}, r, M_x, M_y)$ beschreibt den gesuchten Längsschnitt für einen Kreisbogen des Schneckenprofils.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ferner die Verwendung der erfindungsgemäßen Schneckenelemente in mehrwelligen Schneckenmaschinen. Bevorzugt werden die erfindungsgemäßen Schneckenelemente in zweiwelligen Schneckenmaschinen eingesetzt. Die Schneckenelemente können in den mehrwelligen Schneckenmaschinen in Form von Knet-, Förder- oder Mischelementen vorliegen. Es ist ebenso möglich, Knet-, Förder-, und Mischelemente in einer Schneckenmaschine miteinander zu kombinieren. Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente können auch mit anderen Schneckenelementen, die z.B. nach dem Stand der Technik bekannt sind, kombiniert werden.

Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente bilden in mehrwelligen Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnig und paarweise exakt abschabenden Schneckenwellen einen über ihren gesamten Umfang laufenden Kanal. Dabei weist der Kanal eine abwechselnd zu- und abnehmende Kanalbreite auf. Ein solcher Kanal wird hier als konvergent-divergenter Kanal bezeichnet. In einem solchen konvergent-divergenten Kanal tritt im Be-

trieb über seine gesamte Länge eine Kombination aus Scherströmung und Dehnströmung auf, die eine sehr gute Dispergierwirkung hat. Die Energieeinleitung ist im Vergleich zu herkömmlichen, nach dem Stand der Technik bekannten Schneckenelementen reduziert. Exzentrisch angeordnete Kreisscheiben bilden ebenfalls einen konvergent-divergenten

5 Kanal. Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente weisen jedoch einen geringeren Umfangsbereich auf, in dem ein sehr enger Spalt vorliegt, als exzentrisch angeordnete Kreisscheiben. Daher ist die Energieeinleitung bei der Verwendung von erfindungsgemäßen Schneckenelementen in Mehrwellenschneckenmaschinen gegenüber der Verwendung ex-

10 zentrisch angeordneter Kreisscheiben reduziert. Vorzugsweise sind die Profile der Schneckenelemente paarweise relativ zum zentrisch in der Gehäusebohrung gelegenen Drehpunkt verschoben.

Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente eignen sich zur Extrusion plastischer und viskoelastischer Massen, z.B. Suspensionen, Pasten, Glas, Keramische Massen, Metalle in Form einer Schmelze, Kunststoffe, Kunststoffschmelzen, Polymerlösungen, Elastomer- und Kautschuk-

15 Massen.

Unter einer plastischen Masse wird eine verformbare Masse verstanden. Beispiele für plastische Massen sind Polymerschmelzen, vor allem von Thermoplasten, sowie Elastomere, Mischungen von Polymerschmelzen oder Dispersionen von Polymerschmelzen mit Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen.

20 Bevorzugt werden thermoplastische Polymere oder Gemische von Polymeren aus der folgenden Reihe eingesetzt: Polycarbonat, Polyamid, Polyester, insbesondere Polybutylenterephthalat und Polyethylenterephthalat, sowie Polyether, thermoplastisches Polyurethan, Polyacetal, Fluorpolymer, insbesondere Polyvinylidenfluorid, sowie Polyethersulfone, Polyolefin, insbesondere Polyethylen und Polypropylen, sowie Polyimid, Polyacrylat, insbesondere Poly(methyl)methacrylat,

25 sowie Polyphenylenoxid, Polyphenylensulfid, Polyetherketon, Polyaryletherketon, Styrolpolymerisate, insbesondere Polystyrol und Styrolcopolymere, insbesondere Styrolacrylnitrilcopolymer und Acrylnitrilbutadienstyrolblockcopolymere sowie Polyvinylchlorid eingesetzt. Ebenso bevorzugt eingesetzt werden so genannte Blends aus den aufgeführten Kunststoffen, worunter der Fachmann eine Kombination aus zwei oder mehreren Kunststoffen versteht.

30 Unter viskoelastischen Massen werden solchen Materialien und Mischungen verstanden, die eine zeit-, temperatur- und frequenzabhängige Elastizität aufweisen. Die Viskoelastizität ist durch ein teilweise elastisches, teilweise viskoses Verhalten geprägt. Das Material relaxiert nach Entfernen der externen Kraft nur unvollständig, die verbleibende Energie wird in Form von Fließvorgängen (Retardation) abgebaut.

Beispiele für viskoelastische Materialien sind Styrol-Butadien-Kautschuk, Naturkautschuk, Butadien-Kautschuk, Isopren-Kautschuk, Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk, Ethylen-Propylen-Kautschuk, Butadien-Acrylnitril-Kautschuk, hydrierter Nitrilkautschuk, Butylkautschuk, Halobutylkautschuk, Chloropren-Kautschuk, Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk, Polyurethan-Kautschuk, 5 Thermoplastisches Polyurethan, Guttapercha, Arylatkautschuk, Fluorkautschuk, Siliconkautschuk, Sulfidkautschuk, Chlorsulfonyl-Polyethylen-Kautschuk eingesetzt. Eine Kombination von zwei oder mehreren der aufgeführten Kautschuke, oder eine Kombination aus einem oder mehreren Kautschuk mit einem oder mehreren Kunststoffen ist natürlich auch möglich.

Die zu extrudierenden plastischen oder viskoelastischen Polymere können in reiner Form oder als 10 Mischungen mit Füll- und Verstärkungsstoffen, wie insbesondere Glasfasern, als Mischungen untereinander oder mit anderen Polymeren oder als Mischungen mit üblichen Polymeradditiven eingesetzt werden.

Additive können als Feststoffe, Flüssigkeiten oder Lösungen gemeinsam mit dem Polymer in den Extruder gegeben werden oder aber es wird wenigstens ein Teil der Additive oder alle Additive 15 dem Extruder über einen Seitenstrom zugeführt.

Additive können einem Polymer vielfältige Eigenschaften verleihen. Dies können beispielsweise Weichmacher, Farbmittel, Pigmente, Verarbeitungshilfsmittel, Füllstoffe, Antioxidantien, Verstärkungsstoffe, UV-Absorber und Lichtstabilisatoren, Extenderöle, Metalldesaktivatoren, Peroxidfänger, basische Stabilisatoren, Keimbildner, als Stabilisatoren oder Antioxidantien wirksame Benzo- 20 furane und Indolinone, Formtrennmittel, flammhemmende Additive, antistatische Mittel, Färbemittel und Schmelzestabilisatoren sein. Beispielhaft für Füll- und Verstärkungsstoffe sind Ruß, Glasfaser, Ton, Glimmer, Graphitfaser, Titandioxid, Kohlenstofffasern, Kohlenstoffnanoröhrchen, ionische Flüssigkeiten und Naturfasern.

Die erfindungsgemäßen Schneckenelemente eignen sich wie oben ausgeführt besonders zur Extrusion 25 viskoelastischer Massen. Die Verfahrensschritte, die mit Hilfe dieser Elemente durchgeführt werden können, sind beispielsweise das Einmischen oder Dispergieren von Feststoffen oder Flüssigkeiten oder Gasen. Feststoffe können beispielsweise die oben genannten festen Additive sein. Flüssigkeiten können beispielsweise die oben genannten Additive in flüssiger Form sein, aber auch beispielsweise Wasser. Gase können beispielsweise Stickstoff oder Kohlendioxid sein. Gegenstand 30 der vorliegenden Erfindung ist daher weiterhin ein Verfahren zur Extrusion viskoelastischer Massen in einem Doppelschnecken- oder Mehrwellenextruder unter Verwendung von erfindungsgemäßen Schneckenelementen.

Nachfolgend wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die anliegenden Zeichnungen anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele exemplarisch erläutert, wobei die nachfolgend

dargestellten Merkmale sowohl jeweils einzeln als auch in Kombination einen Aspekt der Erfindung darstellen können. Es zeigen:

Fig. 1 Profilkurven erfindungsgemäßer Schneckenelemente in einer mehrwelligen Schneckenmaschine gemäß eines Ausführungsbeispiels der Erfindung;

5 Fig. 2 Profilkurven erfindungsgemäßer Schneckenelemente in einer mehrwelligen Schneckenmaschine gemäß eines weiteren Ausführungsbeispiels der Erfindung;

Fig. 3 Profilkurven erfindungsgemäßer Schneckenelemente in einer mehrwelligen Schneckenmaschine gemäß einer Abwandlung des Ausführungsbeispiels in Fig. 2.

Aus praktischen Gründen soll der weiteren Beschreibung ein kartesisches Koordinatensystem zu Grunde gelegt werden, dessen Ursprung durch den Drehpunkt C eines Schnecken-
 10 elements gebildet wird. Die x-Achse des kartesischen Koordinatensystems verläuft durch den Punkt P_A ; die y-Achse steht im Drehpunkt C senkrecht auf der x-Achse. In Figur 1 ist ein solches Koordinatensystem gezeigt.

Sinnvollerweise arbeitet man mit dimensionslosen Kennzahlen, um die Übertragbarkeit auf
 15 unterschiedliche Extruder-Baugrößen zu vereinfachen. Als Bezugsgröße für geometrische Größen wie zum Beispiel Längen oder Radien bietet sich der Achsabstand A an, da diese Größe an einem Extruder nicht verändert werden kann.

Für die Figuren gelten folgende Konventionen: Die Koordinaten x und y haben ihren Ursprung im Drehpunkt einer der Wellen. Alle Winkelangaben erfolgen im Bogenmaß. Alle
 20 übrigen Maßangaben sind auf den Achsabstand normiert und werden durch Großbuchstaben dargestellt: $A = a/a$; $R_j = r_j/a$; $RA = ra/a$; $RJ = ri/a$ $T = t/a$ usw. M_x und M_y sind die x- und y-Koordinaten des Kreismittelpunkts eines profilerzeugenden Kreisbogens, R ist der auf den Achsabstand a normierte Radius und α der Bogenwinkel des Kreisbogens. Weiterhin bedeuten RG = normierter Gehäuseradius, RV = normierter virtueller Gehäuseradius,
 25 RA = normierter Außenradius des exakt abschabenden Profils, RF = normierter Außenradius der zu fertigenden Schnecke, S = normiertes Spiel der Schnecken untereinander (Spalt), D = normiertes Spiel der Schnecke zum Gehäuse, VPR = normierter Betrag der Profilverschiebung, VPW Winkel der Profilverschiebung im Bogenmaß, VLR = normierter Betrag der Verschiebung der linken Welle, VLW = Winkel der Verschiebung der linken
 30 Welle, VRR = normierter Betrag der Verschiebung der rechten Welle, VRW = Winkel der Verschiebung der rechten Welle.

Figur 1 zeigt im Querschnitt zwei in einem Abstand A voneinander angeordnete exakt abschabende, zweigängige erfindungsgemäße Schneckenelemente 10, 10', welche jeweils ein erzeugendes und ein erzeugtes Profil 11, 11' aufweisen. Die mit C und C' gekennzeichneten Punkte geben die Drehpunkte der Profile 11, 11' bzw. die Drehachsen der Wellen W, W' an, auf denen die Schneckenelemente angeordnet sind. Der Drehpunkt C des erzeugenden Schneckenelements 10 befindet sich im Abstand A vom Drehpunkt C' des korrespondierenden (erzeugten) Schneckenelements 10'. Der Koordinatenursprung markiert in dieser und allen weiteren Figuren den Drehpunkt C der Welle W. Um den Drehpunkt C kann ein Kreis (Innenkreis) mit dem Kernradius RI und ein Kreis (Außenkreis) mit dem Außenradius RA des Schneckenelements 10 eingezeichnet werden. Innenkreis und Außenkreis bilden einen Kreisring. Mit dem Außenradius RA kann ein Kreis um das Profil herum gezeichnet. Die Gehäusebohrung 12 wird durch einen dazu konzentrischen Kreis mit einem gegenüber dem Außenradius RA um das Spiel D vergrößerten Radius RG repräsentiert (also, $RG = RA + D$).

Das Schneckenelement 10 hat eine Gangzahl $Z = 2$ und eine konvexe Profilkurve 11, die aus mehreren Kreisbögen gebildet wird. Die Profilkurve 11 lässt sich in $2 \cdot Z$, also vier Profil-Abschnitte unterteilen, die durch Achsenspiegelung an den Symmetrieachsen des Profils ineinander überführt werden können. Somit lässt sich das Profil 11 des Schneckenelements 10 durch einen Profil-Abschnitt in einem Ausschnitt von $360^\circ / (2 \cdot Z)$, also 90° , der zwischen zwei Symmetrieachsen des Profils liegt, vollständig definieren. Das in Figur 1 gezeigte, erzeugende Profil 11 ist achsensymmetrisch zur x- und y-Achse, sodass sich das gesamte Profil 11 durch Spiegelung des Viertels zwischen den Punkten P_A und P_I an der x- und y-Achse ergeben würde. Alle Punkte des Profil-Abschnitts zwischen den Punkten P_A und P_I sowie des sich daraus ergebenden Gesamtprofils 11 des Schneckenelements 10 liegen im Kreisring zwischen dem Kernradius RI und dem Außenradius RA. Das Profil 11 zeichnet sich dadurch aus, dass es innerhalb eines Profil-Abschnitts in einem Ausschnitt von 90° nur einen einzigen Punkt P_A gibt, der einen Abstand vom Drehpunkt C hat, der dem Außenradius RA des Schneckenelements 10 entspricht. Anders ausgedrückt gibt es nur einen Punkt P_A im Profil-Abschnitt, der auf einem Kreis um den Drehpunkt C mit dem Außenradius RA (Außenkreis) liegt. Durch fortlaufende Spiegelung des Profil-Abschnitts zwischen P_A und P_I an einer Geraden, die durch die Punkte C und P_A verläuft (also, die x-Achse) und an einer Geraden, die durch die Punkte C und P_I verläuft (also, die y-Achse), lässt sich das Gesamtprofil 11 des (erzeugenden) Schneckenelements 10 konstruieren. Das

Profil 11' des korrespondierenden (erzeugten) Schneckenelements 10' ergibt sich dann durch Drehung des Profils 11 des Schneckenelements 10 um einen Winkel von 90° .

Zur Erzeugung des Profil-Abschnitts zwischen den Punkten P_A und P_I kennzeichnet der Punkt P_A einen Anfangspunkt eines ersten Kreisbogens 1 mit einem Radius $R_1 < R_A$ und einem Mittelpunkt M_1 , der auf der Verbindungsstrecke $C-P_A$ liegt. Der Punkt P_A liegt auf dem Außenkreis. Punkt P_I kennzeichnet einen Anfangspunkt eines Kreisbogens 3 mit einem Radius $R_3 = A - R_1$. Sein Mittelpunkt M_3 liegt auf der Strecke $C-P_I$. Zwischen dem Kreisbogen 1 und dem Kreisbogen 3 schließt sich ein Kreisbogen 2 mit Radius $R_2 = A$ und einem Mittelpunkt M_2 derart an, dass der Kreisbogen 2 tangential in den Kreisbogen 3 übergeht aber einen Knick-Stelle K in einem Winkel θ mit dem Kreisbogen 1 bildet, so dass die Knick-Stelle K eine geometrische Unstetigkeit in der Steigung der Profilkurve 11 darstellt. Der Winkel θ liegt bevorzugt im Bereich zwischen 140° und 180° .

Mit Bezug nun auf Figur 2 sind im Querschnitt zwei in einem Abstand A voneinander angeordnete exakt abschabende, zweigängige erfindungsgemäße Schneckenelemente 10, 10' gezeigt, bei denen sich die Profil-Abschnitte nicht durch Achsenspiegelung zur Deckung bringen lassen sondern bei denen die Profil-Abschnitte punktsymmetrisch zu den Drehpunkten C, C' sind, sodass sich das gesamte Schneckenprofil 11, 11' durch Spiegelung der einen Hälfte an dem Drehpunkt C bzw. C' ergibt. Die Schneckenelemente 10, 10' verfügen somit über dasselbe punktsymmetrische Schneckenprofil 11, 11' in der Form eines erzeugenden und eines erzeugten Profils. Das rechte Schneckenelement 10' ist gegenüber dem linken Schneckenelement 10 um 90° gedreht. Jedes der gezeigten Schneckenprofile 11, 11' setzt sich aus zwei symmetrischen Profil-Abschnitten zusammen und an den Übergängen der Abschnitte treten Knicke K, K' auf, die durch einen Pfeil gekennzeichnet sind.

Zur Erzeugung des Profil-Abschnitts kann der Punkten P_A einen Anfangspunkt eines ersten Kreisbogens 1 kennzeichnen mit einem Radius $R_1 < R_A$ und einem Mittelpunkt M_1 , der auf der Verbindungsstrecke $C-P_A$ liegt. Der Punkt P_A liegt auf dem Außenkreis. Punkt P_I kennzeichnet einen Anfangspunkt eines Kreisbogens 2 mit einem Radius R_2 und einem Mittelpunkt M_2 , der auf der Strecke $C-P_I$ liegt. Der Kreisbogen 2 schließt sich den Kreisbogen 1 derart an, dass sich die Kreisbögen 1, 2 einander in einem Winkel θ treffen und eine Knick-Stelle K bilden, die eine geometrische Unstetigkeit in der Steigung der Profilkurve 11 darstellt. Der Winkel θ liegt bevorzugt zwischen 140° und 180° . Der Punkt P_I kennzeichnet ferner einen Anfangspunkt eines Kreisbogens 3 mit Radius $R_3 = A - R_1$ und

einem Mittelpunkt M_3 , der ebenfalls auf der Strecke $C-P_I$ liegt, sodass der Kreisbogen 2 tangential in den Kreisbogen 3 übergeht. Der Kreisbogen 3 geht dann tangential in einen weiteren Kreisbogen 4 mit einem Radius $R_4 = A$ und einem Mittelpunkt M_4 über und die Hälfte der Profilkurve 11 wird durch einen letzten Kreisbogen 5 zum gegenüberliegenden Punkt P_A auf dem Außenkreis ergänzt. Der Kreisbogen 5 hat einen Radius $R_5 = A - R_2$ und einen Mittelpunkt M_5 , der auf der Strecke P_A-C liegt, und verläuft tangential aus dem Kreisbogen 4 heraus zum Punkt P_A .

Die obere Hälfte der Profilkurve 11, die zwischen den Punkten P_A-P_A verläuft und aus der Kreisbögen-Serie 1-2-3-4-5 gebildet ist, entspricht der unteren Hälfte der Profilkurve 11, welche durch eine Punktspiegelung der oberen Hälfte am Drehpunkt C erzeugt werden kann. Gleichwohl kann man sich die Schneckenprofile 11, 11' in diesem Ausführungsbeispiel so vorstellen, dass die Profilkurven zwei stetig differenzierbar Hälften umfasst, die jeweils aus einer Serie tangential ineinander übergehender Kreisbögen 2-3-4-5-1 bestehen und sich an den jeweiligen Knick-Stellen K, K' treffen. Das heißt, die Knick-Stellen K, K' können auch als die Endpunkte der jeweiligen Profil-Abschnitte gesehen werden. Dies lässt sich von der gestrichelten Linie durch die Knick-Stellen K' und den Drehpunkt C' des erzeugten Schneckenprofils 11' in Figur 2 besser vorstellen. Als solche kann sich jeder Profil-Abschnitt aus mehreren Kreisbögen 1-5 zusammensetzen, die tangential ineinander übergehen und eine stetig differenzierbare Kurve zwischen zwei Knick-Stellen K, K' bilden. An den Knick-Stellen K, K' gehen die jeweiligen Kreisbögen nicht tangential in den benachbarten Profil-Abschnitt über sondern stehen im Winkel θ dazu.

Ein weitere Ausführungsform erfindungsgemäßer Schneckenelemente ist beispielhaft in Figur 3 dargestellt. Sie ist eine Abwandlung des Ausführungsbeispiels in der Figur 2 mit etwas anderen Maßen, hat aber prinzipiell den gleichen punktsymmetrischen Aufbau mit fünf Kreisbögen 1-5 und zwei Knick-Stellen K, K'.

Schneckenelemente für eine Schneckenmaschine bzw. für einen Doppelschnecken- oder Mehrwellenextruder sind üblicherweise in ein Gehäuse eingebracht. Dabei sind die Schneckenelemente und das Gehäuse so ausgeführt, dass durch die Rotation der Schneckenelemente nicht nur eine paarweise Abschabung benachbarter Schneckenelemente erfolgt, sondern auch eine Abreinigung der Gehäuseinnenwandungen durch die Rotation der Schneckenelemente gegeben ist. Bis hierher wurden nur exakt abschabende Schneckenprofile behandelt. Bei technisch ausgeführten Maschinen ist es aber erforderlich, von der exakt

abschabenden Geometrie insofern abzuweichen, als exakt definierte Spalte S bzw. D bei der Abreinigung eingehalten werden, wobei im Rahmen der vorliegenden Erfindung die Begriffe, Abreinigung/abreinigen synonym zu Abschabung/abschaben verwendet werden. Dies ist notwendig, um metallisches „Fressen“ zu verhindern, um Fertigungstoleranzen auszugleichen und um übermäßige Energiedissipation in den Spalten zu vermeiden.

Wie beispielsweise in der Veröffentlichung [1] auf den Seiten 27 bis 30 ausgeführt, weisen Anordnungen aus Schneckenelementen und Gehäuse in der Praxis stets sogenannte Spiele auf. Die Spiele können, wie dem Fachmann bekannt ist, zwischen Schnecke und Gehäuse und zwischen Schnecke und Schnecke unterschiedlich groß oder gleich sein. Das Spiel zwischen Schnecke und Gehäuse wird als „ δ “ bezeichnet, das Spiel zwischen Schnecke und Schnecke als „ s “. Die Spiele können auch konstant oder, in den angegebenen Grenzen, variabel sein. Es ist auch möglich, innerhalb der Spiele ein Schneckenprofil zu verschieben. Damit weisen die in der Praxis eingesetzten Schneckenelemente aufgrund der vorliegenden Spiele streng genommen nicht die Eigenschaft auf, dass sie sich bei gleichsinniger Rotation mit gleicher Drehzahl um parallel angeordnete Achsen in mindestens einem Punkt berühren. Dennoch geht man zur Erzeugung von Schneckenelementen in der Praxis üblicherweise, wie in [1] ausgeführt, von den exakt abschabenden Konturen (Profilen) aus und führt dann Spiele ein. Erfindungsgemäß werden demnach zunächst Schneckenelemente vorzugsweise virtuell erzeugt, die sich bei gleichsinniger Rotation mit gleicher Drehzahl um parallel angeordnete Achsen stets in mindestens einem Punkt berühren. Ausgehend von diesen vorzugsweise virtuellen Geometrien werden Spiele vorgesehen, die verhindern, dass die in der Praxis eingesetzten Schneckenelemente „fressen“, d.h. dass die Schneckenelemente sich gegenseitig unter Zerstörung ihrer Oberfläche abschaben.

Dem Fachmann sind Methoden bekannt, um ausgehend von einem vorgegebenen, exakt abschabenden Schneckenprofil, ein Schneckenprofil mit Spielen abzuleiten. Bekannte Methoden hierfür sind beispielsweise die in [1] auf den Seiten 28ff beschriebene Möglichkeit der Achsabstand-Vergrößerung, der Längsschnitt-Äquidistanten und der Raumäquidistanten. Bei der Achsabstand-Vergrößerung wird ein Schneckenprofil kleineren Durchmessers konstruiert und um den Betrag des Spiels zwischen den Schnecken auseinandergerückt. Bei der Methode der Längsschnitt-Äquidistanten wird die Längsschnitt-Profilkurve (parallel zur Drehachse des jeweiligen Elementes) um das halbe Spiel Schnecke-Schnecke senkrecht zur Profilkurve nach innen, in Richtung zur Drehachse hin, verschoben. Bei der Methode der Raumäquidistanten wird, ausgehend von der Raumkurve, auf der die Schnecken-

elemente sich gegenseitig abreinigen, das Schneckenelement in der Richtung senkrecht zu den Flächen des exakt abschabenden Profils um das halbe Spiel zwischen Schnecke und Schnecke verkleinert. Auch eine exzentrische Positionierung von Schneckenelementen in einem Gehäuse unter Beibehaltung der Gehäuse- und paarweisen Abschabung ist dem Fachmann der Extrudertechnik bekannt (siehe z.B. [1] Seiten 108, 246 und 249). Die Regeln zur Erzeugung von Schneckenprofilen mit definierten Spalten S sowie die Verwendung von Gehäusen, Spielen und/oder exzentrischer Positionierung sind auf erfindungsgemäße Schneckenelemente 10, 10', die sich bei der gleichsinnigen Rotation um zwei parallel angeordnete Achsen in der Weise streifen, dass sie sich stets in mindestens einem Punkt berühren, in entsprechender Weise anwendbar.

In den Figuren 1 bis 3 wurden ausschließlich zweigängige Schneckenelemente 10, 10' behandelt. Dieselben Prinzipien lassen sich jedoch auch auf Schneckenelemente mit drei und mehr Gängen anwenden. Die Vorgehensweise bei dreigängigen Schneckenelementen ist analog zur Vorgehensweise bei den zweigängigen Profilen. Der Außenradius des Profils wird gegenüber dem Gehäuseradius verkleinert und das Profil paarweise verschoben, wobei der Drehpunkt zentrisch zum Gehäuse beibehalten wird. Für die dreigängigen Profile lassen sich auch exzentrisch rotierende Profile konstruieren. Besonders interessant sind Schneckenprofile, bei denen sich die Schnecken untereinander vollständig abreinigen und wo das Gehäuse mit nur einem von drei Kämmen abgereinigt wird. Die Erzeugung von Spalten bei der gegenseitigen Abreinigung der Profile und bei der Abreinigung des Gehäuses erfolgt in völliger Übereinstimmung mit der Vorgehensweise bei den zweigängigen Profilen. Die dreigängigen Profile können als kontinuierliches Fördergewinde oder als Knetscheiben erfindungsgemäß eingesetzt werden.

Achsensymmetrische viergängige Schneckenprofile können durch einen 45°- Abschnitt des Schneckenprofils vollständig definiert werden. Die Erzeugung von exzentrischen Profilen und die Erzeugung von Spalten bei der Abreinigung erfolgt auf ähnliche Art und Weise wie bei den zwei- und dreigängigen Profilen und wird hier nicht gezeigt. Die viergängigen Profile können ebenfalls als kontinuierliches Fördergewinde oder als Knetscheiben eingesetzt werden. Erfindungsgemäße Profile mit mehr als vier Gängen können auf analoge Weise hergestellt werden. Ebenso können auf analoge Weise die Spalte variiert und exzentrische Profile erzeugt werden.

Fig. 4 zeigt schematisch die Profile von paarweise exakt abschabenden Schneckenelementen aus dem Stand der Technik, sogenannte Erdmengerprofile ([1], Seiten 227-228). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Knick-Stellen (K1-K4) auf dem Außenradius RA der Profilkurve liegen. Eine solche Anordnung führt maßgeblich zur Erhitzung der Polymermasse und trägt damit potentiell zur thermischen Schädigung bei, ohne einen Beitrag zur Verfahrensaufgabe der Dispergierung zu leisten.

Patentansprüche

1. Schneckenelemente (10, 10') für mehrwellige Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnig drehenden Schneckenwellen (W, W'), wobei diese Schneckenelemente paarweise exakt abschabend sind und aus diesen Schneckenelementen zusammengesetzte Schneckenwellen zwei oder mehr Schneckengänge aufweisen, wobei die Schneckenprofile (11, 11') über den gesamten Querschnitt durch jeweilige Profilkurven darstellbar sind, dadurch gekennzeichnet, dass jede Profilkurve (11, 11') mindestens eine Knick-Stelle (K, K') in ihrem Verlauf aufweist, die innerhalb eines Außenradius (RA, RA') der Profilkurve liegt, wobei das Verhältnis eines Krümmungsradius des Schneckenprofils zum Außenradius des Profils 0,05 bis 0,95 beträgt.
2. Schneckenelemente (10, 10') nach Anspruch 1, wobei jede Profilkurve eine stetige, geschlossene, konvexe Kurve ist, die abgesehen von der mindestens einen Knick-Stelle (K, K') auch stetig differenzierbar ist.
3. Schneckenelemente (10, 10') nach Anspruch 2, wobei das Profil (11) des einen Schneckenelements (10) durch eine Kurve $\vec{p}$ und das Profil (11') des anderen Schneckenelements (10') aus der Kurve $\vec{q}$ gemäß der folgenden Beziehung (1) gebildet wird:

$$\vec{q} = \vec{p} + a \cdot \vec{n}(\vec{p}) + \vec{a} \quad (1),$$

wobei

- die Kurve $\vec{p}$ in jedem Punkt einen Krümmungsradius ρ aufweist, der kleiner oder gleich einem Achsabstand a der Schneckenelementen (10, 10') ist,
- für jeden Punkt der Kurve $\vec{p}$ innerhalb eines stetig differenzierbaren Abschnitts ein normierter Normalenvektor $\vec{n}(\vec{p})$ mit der Länge 1 existiert, der in dem jeweiligen Punkt senkrecht auf der Tangente zur Kurve $\vec{p}$ steht und in Richtung des Mittelpunktes des zum jeweiligen Punkt der Kurve $\vec{p}$ gehörigen Krümmungskreises zeigt,
- $\vec{a}$ ein Vektor ist, der in Richtung vom Drehpunkt (C) des erzeugenden Profils (11) zum Drehpunkt (C') des erzeugten Profils (11') führt und die Länge a hat.

4. Schneckenelemente (10, 10') nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei sich jedes Schneckenprofil bzw. jede Profilkurve (11, 11') aus mehreren Kreisbögen (1-5) zusammensetzt, wobei die jeweiligen Kreisbögen (1-5) an der mindestens einen Knick-Stelle (K, K') in einem Winkel (θ) zwischen 90° und 180° , bevorzugt zwischen 140° und 180° zueinander stehen.
5
5. Schneckenelemente (10, 10') nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei sich jedes Schneckenprofil bzw. jede Profilkurve (11, 11') in Profil-Abschnitte unterteilen lässt, die durch eine Punkt- oder Achsenspiegelung ineinander überführt werden können.
- 10 6. Schneckenelemente (10, 10') nach Anspruch 5, wobei sich jeder Profil-Abschnitt aus mehreren Kreisbögen (1-5) zusammensetzt, wobei die Zahl der Kreisbögen (1-5), die einen der Profil-Abschnitte bilden, bevorzugt 2 bis 8, besonders bevorzugt 3 bis 6 beträgt.
- 15 7. Schneckenelemente (10, 10') nach Anspruch 5 oder Anspruch 6, wobei sich einer der Profil-Abschnitte zwischen einem Punkt (P_A , P_A'), der auf dem Außenradius (R_A , R_A') des Profils (11, 11') liegt, und einem Punkt (P_I , P_I'), der auf dem Kernradius (R_I , R_I') des Profils (11, 11') liegt, erstreckt und die mindestens eine Knick-Stelle (K, K') umfasst.
- 20 8. Schneckenelemente (10, 10') nach Anspruch 5 oder Anspruch 6, wobei jeder Profil-Abschnitt eine stetig differenzierbare Kurve zwischen zwei Knick-Stellen (K, K') umfasst.
9. Schneckenelemente (10, 10') nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei das Verhältnis eines Krümmungsradius des Schneckenprofils zum Außenradius des Profils 0,2 bis 0,8, bevorzugt 0,3 bis 0,7, besonders bevorzugt 0,35 bis 0,65 beträgt, vorzugsweise an dem Punkt P_A , der das Gehäuse abreinigt.
25
10. Verfahren zur Erzeugung von Schneckenelementen (10, 10') für mehrwellige Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnig drehenden Schneckenwellen, wobei diese Schneckenelemente paarweise exakt abschabend sind und aus diesen Schneckenelementen zusammengesetzte Schneckenwellen zwei oder mehr Schneckengänge aufweisen, wobei zur Ausbildung der Schneckenprofile (11, 11') eine Profilkurve in einer Ebene senkrecht zur Drehachse (C, C') erzeugt wird, welche
30

Profilkurve mindestens eine Knick-Stelle (K, K') bzw. eine Stelle der Unstetigkeit in der Steigung der Kurve in ihrem Verlauf aufweist, wobei diese Stelle (K, K') innerhalb eines Außenradius (RA, RA') der Profilkurve liegt.

11. Verfahren zur Erzeugung von Schneckenelementen (10, 10') für mehrwellige
5 Schneckenmaschinen mit paarweise gleichsinnig drehenden Schneckenwellen, wobei diese Schneckenelemente paarweise exakt abschabend sind und aus diesen Schneckenelementen zusammengesetzte Schneckenwellen zwei oder mehr Schneckengänge aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass in einem ersten Schritt zur Ausbildung der Schneckenprofile (11, 11') eine Profilkurve in einer Ebene senkrecht zur Drehachse (C, C') erzeugt wird, welche Profilkurve mindestens eine
10 Knick-Stelle (K, K') bzw. eine Stelle der Unstetigkeit in der Steigung der Kurve in ihrem Verlauf aufweist, wobei diese Stelle (K, K') innerhalb eines Außenradius (RA, RA') der Profilkurve liegt, und in einem zweiten Schritt Spiele eingeführt werden.
12. Verwendung von Schneckenelementen (10, 10') nach einem der Ansprüche 1 bis 9 oder erzeugt nach Anspruch 10 oder 11 in einer Schneckenmaschine.
13. Verwendung nach Anspruch 12, wobei sich die Schneckenelemente (10, 10') paarweise an ihrem gesamten Umfang mit konstantem Spalt abreinigen, oder wobei sich die Schneckenelemente (10, 10') paarweise mit einem Spalt abreinigen, der nicht
20 über den gesamten Umfang konstant ist.
14. Schneckenmaschine, insbesondere Extruder, mit paarweise gleichsinnig drehenden Schneckenwellen (W, W'), wobei die Schneckenwellen Schneckenelemente (10, 10') nach einem der Ansprüche 1 bis 9 oder erzeugt nach Anspruch 10 oder 11 aufweisen.
15. Verfahren zur Extrusion plastischer Massen, dadurch gekennzeichnet, dass Schneckenelemente nach einem der Ansprüche 1 bis 9 oder erzeugt nach Anspruch 13 oder 14 oder eine Schneckenmaschine nach Anspruch 14 verwendet werden.
- 25