

Dosierung von Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren

Thomas Alexander Ottnad

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim Christian Lüth
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Friedrich Zäh

Die Dissertation wurde am 16.10.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.07.2014 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am MiMed, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, der Technischen Universität München (TUM).

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim Christian Lüth, der mir viel Verantwortung, aber auch große Gestaltungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Bereichen übertragen hat. Insbesondere die Freiräume in den wissenschaftlichen Fragestellungen sowie seine Aufgeschlossenheit neuen Ideen gegenüber haben meine Arbeit geprägt.

Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Friedrich Zäh, der mit seinem ganzheitlichen Blick auf das Thema generativer Fertigungsverfahren wichtige Impulse für die Arbeit gegeben hat.

Ich möchte mich bei meinen Kollegen und Studenten für die fruchtbare Zusammenarbeit, den Gemeinschaftsgeist und die freundschaftliche Atmosphäre über die Grenzen beruflicher Aspekte hinweg bedanken. Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Franz Irlinger, Henrik Lüßmann, Jakob Neuhäuser, Kassim Abdul-Sater, Markus Kagerer, Christian Richter, Marcus Fischer, Sebastian Gepp und Markus Vogl, die meine Arbeit durch zahlreiche fachliche Diskussionen und Hilfestellungen unterstützt haben. Gerhard Ribnitzky, Markus Wörl, Christian Kühnau und dem gesamten Team der Werkstatt gebührt ein besonderer Dank für die zuverlässige Fertigung der Bauteile und ihre Ratschläge. Sie haben mir die wahre Bedeutung fertigungsgerechter Gestaltung durch ihre ruhige und fachmännische Arte nahegebracht, ich habe viel von ihnen gelernt und über die Inhalte dieser Arbeit hinaus wesentlich von ihrer Kompetenz profitiert.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich an mein privates Umfeld richten. Meine Familie und meine Freunde haben mir viel Verständnis und Rückhalt entgegengebracht und so einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet. Meine Eltern haben mein Studium und damit die Grundlage für dies Arbeit ermöglicht. Mama und Papa, vielen Dank für alles. Meine Freunde vom Turnen und von Ciabatta, die Unibuben, meiner erste WG und meine ganz alten Freunde haben mich auch in schwierigen Zeiten unterstützt.

München, im Juli 2014

Thomas Ottnad

„I refuse to join any club that would have me as a member.“

Groucho Marx

Kurzfassung

Generative Fertigungsverfahren sind als eine vielversprechende Ergänzung gängiger Produktionsverfahren zu sehen. Ausgehend von der ursprünglichen Idee der schnellen Herstellung von Prototypen hat sich diese Technologie stark gewandelt. Die Entwicklung dieser Technologie reicht von den anfänglichen Anschauungs- und Haptikmodellen über Funktionsprototypen bis hin zu industriell einsetzbaren Produkten. Die Vielfalt und Vielzahl generativer Fertigungsverfahren ist einem großen Wachstum unterlegen und ein Ende dieses Trends scheint aktuell nicht in Sicht. Allen generativen Fertigungsverfahren gemein ist die Tatsache, dass ein Bauteil sukzessive aufgebaut wird und nicht, wie bei vielen klassischen Fertigungsverfahren, durch Materialabtrag erzeugt wird.

Ein bekanntes Verfahren ist das Fused Deposition Modeling (FDM). Dabei werden Kunststoffstränge aufgeschmolzen und derart neben- und aufeinander abgelegt, dass nach dem Erkalten ein fester Stoffverbund entsteht und so dreidimensionale Objekte erzeugt werden. Dieses Verfahren unterliegt Einschränkungen hinsichtlich der Werkstoffe, deren Ausgangsform als Draht oder drahtähnliches Gebilde, sowie Restriktionen beim Austragen hinsichtlich Durchmesser, Geschwindigkeit und Steuerung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Hochdruck- und Hochtemperatur-Dosiersystem, das die Verwendung von Kunststoffgranulat erlaubt, entwickelt und konstruktiv umgesetzt. Das Ausgangsmaterial wird mittels einer Plastifiziereinheit einer Spritzgussmaschine aufgeschmolzen und unter erhöhtem Druck in das eigentliche Dosiersystem gefördert. Kernstück des Dosiersystems ist ein Ventil, über das die Steuerung der Extrusion realisiert wird. Dabei spielt die Betrachtung eines der Funktionselemente, ein flexibles Verschlusselement, innerhalb dieses Ventils eine zentrale Rolle.

Zur mechanischen Beschreibung wird ein analytisches Modell entwickelt, mit realen Messungen abgeglichen und erfolgreich verifiziert. Diese Verifikation ist Ausdruck der korrekten Modellbildung und gleichzeitig der erfolgreichen, gezielten konstruktiven Umsetzung.

Das entwickelte Dosiersystem ermöglicht die Verwendung niederviskoser Fluide wie Wasser bis hin zu hochviskosen Fluiden wie Kunststoffschmelzen. Als Anwendungsbeispiel wird die Dosierung von Kunststoffschmelzen und der Ansatz für ein generatives Fertigungsverfahren durch den Aufbau einfacher, dreidimensionaler Objekte demonstriert.

Abstract

Additive manufacturing techniques show great promise for the ideal complement of conventional production techniques. Starting with the basic idea of rapid prototyping building illustrative models this technology advanced in great leaps driven by the trend of individualisation. Functional prototypes and ready to use products are well established today. The market with its high variety and high number of additive manufacturing techniques is still growing with no end in sight on further progress. All additive manufacturing techniques have in common building parts by adding material instead of removing material as most often done using classical production techniques.

One of the established techniques is the Fused Deposition Modeling (FDM). A plastic filament is melt and extruded through a nozzle controlled in both horizontal and vertical directions. A part is produced by extruding small beads to form layers as the material hardens immediately after extrusion from the nozzle. There are some limitations and restrictions concerning the material, its initial shape, achievable diameters, as well as the speed and control of the extrusion process.

In this work a dosing system working at high pressures and high temperatures is developed and put into practice allowing pellets as initial material. Using a plasticising unit of an injection moulding machine turns the material into a plastic melt and forces it into the dosing system. Crucial part of the dosing system is a valve which enables control of the extrusion process. Investigations concerning one of the fundamental parts of the valve, a flexible closing element, are discussed in detail in this work.

The mechanical behaviour of the flexible closing element is described in an analytic model and compared to real measurements. The successful verification of the model is both proof of correct modeling and proof of proper construction design fulfilling the desired task.

The developed dosing system enables the use of liquids of low viscosity, as for example water, and can be operated using highly viscous fluids as plastic melts. Demonstration of the ability for additive manufacturing techniques is exemplified by building simple, three-dimensional objects using conventional plastics.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung	3
2.1	Prinzip generativer Fertigungsverfahren	4
2.2	Beispiele generativer Fertigungsverfahren	6
2.3	Anwendung generativer Fertigungsverfahren	8
3	Stand der Technik	11
3.1	Verfahrensprinzip	11
3.2	Baustrategie und Genauigkeit	13
3.3	Materialspektrum und Materialvorbereitung	15
4	Kritik am Stand der Technik	17
5	Aufgabe	19
6	Abgrenzung	21
7	Ansatz	23
8	Aufbau des Dosiersystems	29
8.1	Konstruktion des Halters	30
8.2	Konstruktion des Piezotopfs	32
8.3	Konstruktion des Adapters	35
8.4	Gesamtkonstruktion des Dosiersystems	36
8.5	Gesamtkonstruktion des Prüfstands	37
8.6	Konstruktive Umsetzung und Gesamtaufbau	39
9	Modellierung des flexiblen Elements	43
9.1	Allgemeine Kirchhoffsche Plattentheorie	43
9.2	Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie für Vollkreisplatten	49

9.2.1	Vollkreisplatte mit Volllast	52
9.2.2	Vollkreisplatte mit Teillast	52
9.3	Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie auf das flexible Element . .	55
9.3.1	Lastfall im Dosiersystem unter Vernachlässigung von Querschnitts- änderungen	56
9.3.2	Lastfall im Dosiersystem unter Berücksichtigung von Querschnitts- änderungen	57
9.3.3	Beispiele von Plattenproblemen	60
10	Verifikation des Modells durch reale Messungen	63
10.1	Verifikation anhand einer Platte bei Belastung durch das Fluid	63
10.1.1	Vorüberlegungen zur Messung	65
10.1.2	Hypothesen zur Messung	67
10.1.3	Durchführung der Messung	68
10.1.4	Interpretation der Messung	69
10.2	Verifikation anhand einer Platte bei Belastung durch externe Kraft	69
10.2.1	Vorüberlegungen zur Messung	69
10.2.2	Hypothesen zur Messung	72
10.2.3	Durchführung der Messung	74
10.2.4	Interpretation der Messung	76
10.3	Verifikation anhand eines flexiblen Elements bei Belastung durch externe Kraft	83
10.3.1	Vorüberlegungen zur Messung	84
10.3.2	Hypothesen zur Messung	86
10.3.3	Durchführung der Messung	87
10.3.4	Interpretation der Messung	87
10.4	Zusammenfassung der Verifikation	89
11	Dosierbeispiel	91
12	Zusammenfassung und Ausblick	97
	Literaturverzeichnis	101
	Betreute studentische Arbeiten	107
	Eigene Publikationen	109
	Lebenslauf	111

1 Einleitung

Eine der bekanntesten Anwendungen bezüglich der Dosierung von Flüssigkeiten stellt der Tintendruck dar, bei dem kleinste Mengen von Tinte in Tropfenform ausgestoßen werden. Obwohl hierfür eine Vielzahl technischer Umsetzungen existieren, beruhen solcherlei Verfahren größtenteils auf demselben Prinzip: Innerhalb eines Fluidreservoirs werden Druckschwankungen erzeugt, die das Fluid dazu veranlassen, aus einer Austrittsöffnung zu strömen. Die Erzeugung dieser Druckschwankungen, deren Größe und zeitliches Verhalten sowie die Dimensionierung der relevanten Funktionselemente, wie Fluidreservoir und Austrittsöffnung und deren Zusammenspiel, sind ausschlaggebend für die Funktionalität, Grenzen und Genauigkeit eines solchen Systems [5, 16].

Ein anderes alltägliches Beispiel zur Dosierung von Fluiden ist ein einfacher Wasserhahn. Hier wird ein konstanter Druck über die Hausleitung bereitgestellt und durch ein Sperrventil eine Austrittsöffnung gezielt geöffnet und verschlossen, um eine Dosierung vorzunehmen.

Betrachtet man den Tintendruck und den Wasserhahn genauer, so lässt sich feststellen, dass beide Verfahren, mögen sie noch so unterschiedlich erscheinen, auf demselben Prinzip beruhen: In beiden Fällen wird das Fluid aufgrund eines Druckgefälles zum Strömen bewegt und entspricht demnach derselben physikalischen Gesetzmäßigkeit, nämlich dem Bestreben des Fluids, den Zustand kleinstmöglicher Energie einzunehmen, was im Sinne eines Druckgefälles bedeutet, dass jedes Fluid in Richtung des niedrigeren Drucks fließt [46, 57]. Der Unterschied liegt in erster Linie in der Art und Weise, wie das Druckgefälle erzeugt wird.

Sämtliche Verfahren zur Dosierung von Flüssigkeiten beruhen daher auf diesem Prinzip. Die Palette der Anwendungen zur Dosierung von Flüssigkeiten ist weit gefächert - der Tintendruck, das Auftragen von Lacken und Farben, die Formulierung von Radiopharmaka und Kosmetika und die Einspritzung von Treibstoffen sind nur einige Beispiele. Die Verfahren hängen aus technischer Sicht allerdings stark von den Eigenschaften des zu dosierenden Fluids ab. In erster Linie sind dabei die Viskosität und die Oberflächenspannung zu nennen. Die Viskosität beschreibt die Zähflüssigkeit einer Flüssigkeit - je höher die Viskosität einer Flüssigkeit ist, desto größer muss die treibende Energie sein, damit die Flüssigkeit fließt. Die Oberflächenspannung ist eine weitere Materialeigenschaft einer Flüssigkeit, die das Bestreben beschreibt, die Oberfläche gering zu halten. So ist eine Form mit kleinstmöglicher Oberfläche bezogen auf das Volumen aus energetischen Gesichtspunkten angestrebt. Je höher die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit ist, desto eher formt sie sich in kleine Volumina mit günstigem Volumen-Oberflächenverhältnis, etwa in eine Kugel oder einen Tropfen.

Diese unterschiedlichen Materialeigenschaften lassen sich wiederum anhand eines alltäglichen Beispiels illustrieren. Betrachtet man das Verhalten von Wasser und Honig, wenn man diese unterschiedlichen Fluide von einem Löffel fließen lässt, so lässt sich feststellen,

dass Wasser zum einen wesentlich schneller fließt - was hauptsächlich an der geringeren Viskosität liegt - und zum anderen sich wesentlich einfacher in tropfenartige Volumina formt - was mitunter an der größeren Oberflächenspannung liegt.

Die Viskosität von Wasser ist bei Raumtemperatur von 20 °C mit 1 mPa s definiert und weist dabei eine Oberflächenspannung von 72,75 mN/m auf. Für die Oberflächenspannung lässt sich für Honig ein grober Durchschnittswert von 54 mN/m angeben [67]. Die Viskosität bewegt sich in einem Bereich von 460 mPa s bis 21.000 mPa s. Betrachtet man diese Bereichsgrenzen, so wird deutlich, dass die Viskosität von Honig bezogen auf den Minimalwert um einen Faktor von bis zu 45 und somit um mehr als eine Größenordnung innerhalb des Spektrums schwanken kann. Beim Vergleich verschiedener Gruppen von Flüssigkeiten ist also nicht nur die absolute Größe der Viskosität charakteristisch, vielmehr legen die mitunter großen Spektren eine differenzierte Betrachtung nahe.

Kunststoffschmelzen zählen zu den hochviskosen Flüssigkeiten, für die ein Viskositätsbereich von 10^6 mPa s bis 10^{12} mPa s angegeben werden kann. Um ein solches Fluid dosieren zu können, muss eine entsprechend hohe Energie, meist durch Erzeugung von Druck, eingebracht werden, um den hohen Fließwiderstand aufgrund der Viskosität zu überwinden. Durch das Verändern dieser Energie kann das Fließverhalten beeinflusst werden und bei kompletter Unterbrechung der Energiezufuhr eine Dosierung erfolgen. Die Veränderung der treibenden Energie wird im Rahmen dieser Arbeit durch das Schalten von Druckgefällen realisiert.

In gewisser Weise folgt diese Arbeit der Tradition des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik in Bezug auf die kontinuierliche Forschung hinsichtlich der Dosierung unterschiedlichster Flüssigkeiten in unterschiedlichsten Anwendungen. Hierzu zählen beispielsweise die grundlegenden Voraussetzungen geeigneter Aktorprinzipien [27], die konkrete Auslegung und Berechnung spezifischer Dosiersysteme [26, 28] sowie Anwendungen bezüglich der Dosierung kleinster Mengen von Flüssigkeiten [62].

Mit der Entwicklung und Konstruktion eines spezifischen Dosiersystems und der detaillierten Behandlung des entwickelten Ventils zum Schalten von Druckgefällen wird im Rahmen dieser Arbeit die Grundlage für die Dosierung von Kunststoffschmelzen gelegt.

2 Problemstellung

Generative Fertigungsverfahren stellen eine Möglichkeit zur Erzeugung von Bauteilen dar, die sich von klassischen Fertigungsverfahren signifikant unterscheidet. Die Grundidee ist dabei, ein Bauteil durch das Aneinander- und Aufeinander-Fügen von kleinen Materialmengen herzustellen, anstatt durch das Entfernen von Material, wie es beispielsweise bei spanenden Verfahren wie Bohren, Drehen und Fräsen der Fall ist. Das Aneinander- und Aufeinander-Fügen von Material spiegelt damit den aufbauenden bzw. generativen Charakter wider und führt zu der Bezeichnung der generativen Fertigungsverfahren bzw. additiven Fertigungsverfahren. Gerade dieser Begriff verdeutlicht den Unterschied zu den abtragenden, den subtraktiven, Fertigungsverfahren. Prinzipiell ähnelt die Materialmenge, die zur Herstellung eines Bauteils mit generativen Fertigungsverfahren benötigt wird, der tatsächlichen Materialmenge des Bauteils. Dies lässt sich jedoch nicht pauschal für alle generativen Fertigungsverfahren und alle Bauteile so formulieren und ist zudem kein klares Unterscheidungsmerkmal zu anderen Fertigungsverfahren. So wird für ein Bauteil, das im Spritzgießen hergestellt wird, ebenfalls nahezu exakt die tatsächliche Materialmenge für das Bauteil benötigt. Ein deutliches Unterscheidungsmerkmal gegenüber dem Spritzgießen ist die Tatsache, dass bei generativen Fertigungsverfahren keine Formen benötigt werden.

Der Begriff *Generative Fertigungsverfahren* stellt eine sehr allgemeine und umfassende Bezeichnung für diese Klasse von Fertigungsverfahren dar und wird im englischsprachigen Raum meist als *Additive Manufacturing* bezeichnet. Dieser Oberbegriff beinhaltet damit auch weit verbreitete Begriffe wie *3D Druck* und *Rapid Prototyping*. Der Begriff Rapid Prototyping steht dabei auch sinnbildlich für die anfängliche Motivation dieser Technologie, nämlich die schnelle und kostengünstige Fertigung von Prototypen, Modellen und Mustern. Mit der Verwendung dieser Technologie zur Erzeugung von Halbzeugen, Werkzeugen und Endprodukten haben sich die Bezeichnungen *Rapid Tooling* und *Rapid Manufacturing* etabliert. Hersteller und Dienstleister deklarieren ihre Produkte gerne mit dem Zusatz *Rapid*, um die besondere Zeiteffizienz der eigenen Fertigungsanlage in den Vordergrund zu stellen. Doch diese Zeiteffizienz kann nicht pauschal für alle generativen Fertigungsverfahren und beliebigen Bauteile angegeben werden.

Die Klasse der generativen Fertigungsverfahren ist im Vergleich zu klassischen Fertigungsverfahren eine noch sehr junge Technologie mit großen Entwicklungsschritten in kurzer Zeit, in der auch etliche Begriffe und Definitionen generiert wurden. Nicht zuletzt daher hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) die Norm 3404 [74] erarbeitet, in der die rasante Entwicklung und die damit einhergehende Begriffsvielfalt auf diesem Gebiet adressiert werden soll. Die Entwicklung und Anwendung generativer Fertigungsverfahren ist global geprägt und so hat auch das ursprünglich amerikanische und mittlerweile international ausgerichtete Pendant zum Deutschen Institut für Normung (DIN), die ASTM International (ursprünglich American Society for Testing and Materials), eine internatio-

nale Standardisierungsorganisation, mit der ASTM F2792 [2] erste Normierungsversuche auf den Weg gebracht. Die Tatsache, dass seitens Ingenieursvereinigungen und Standardisierungsorganisationen die Notwendigkeit der Normierung gesehen wird, spiegelt die Fortschritte auf diesem Gebiet und das enorme Potential für die zukünftige Herstellung von Produkten wider. Den Einfluss generativer Fertigungsverfahren auf den kompletten Produktentstehungsprozess adressiert unter anderem Andreas Gebhardt, Professor an der Fachhochschule Aachen und Autor zahlreicher Fachbücher auf dem Themengebiet [17, 18, 19, 20]. Die wachsende Bedeutung dieser Technologie wird beispielsweise auch von Michael Zäh, Professor an der Technischen Universität München [80], und von internationalen Forschungsgruppen [24] thematisiert.

Die wachsende Anzahl von Fachbüchern, die steigende Zahl verkaufter Anlagen sowie die Tatsache, dass die komplette Thematik Gegenstand internationaler Forschung ist, unterstreichen die Aussagen bezüglich der zukünftigen Bedeutung dieser Technologie. Aus den ersten, teilweise visionären Ideen für generative Fertigungsverfahren, wie sie etwa in einem US-amerikanischen Patent aus den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts [44] dokumentiert ist, haben sich bis heute zahlreiche, real umgesetzte Verfahren entwickelt. Ein Grund für den enormen Entwicklungsschub generativer Fertigungsverfahren, gerade in den letzten etwa 20 Jahren, ist sicherlich eng mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechner und der durchgängigen Digitalisierung im gesamten Produktentstehungsprozess verknüpft. Die rechnergestützte Beschreibung dreidimensionaler Bauteile ist mittlerweile nicht mehr wegzudenken und bildet eine wichtige Grundlage für alle generativen Fertigungsverfahren. Anstelle einer umfassenden Darstellung sämtlicher Verfahren dieser rasant wachsenden Technologie, sollen das Prinzip generativer Fertigungsverfahren sowie einige Beispiele und Anwendungen im Folgenden kurz erläutert werden.

2.1 Prinzip generativer Fertigungsverfahren

Wie bereits erwähnt, basieren generative Fertigungsverfahren auf dem sukzessiven Aufbau eines Bauteils. Hierfür dient üblicherweise das Zielbauteil als digitales, dreidimensionales Modell, das zunächst in zweidimensionale Beschreibungen transformiert wird. Dies beruht auf dem Schneiden des dreidimensionalen Bauteils mit einer Schnittebene, so dass eine zweidimensionale Kontur entsteht. In Abbildung 2.1 ist dieser Vorgang schematisch anhand eines Bauteils mit einer Schnittebene skizziert.

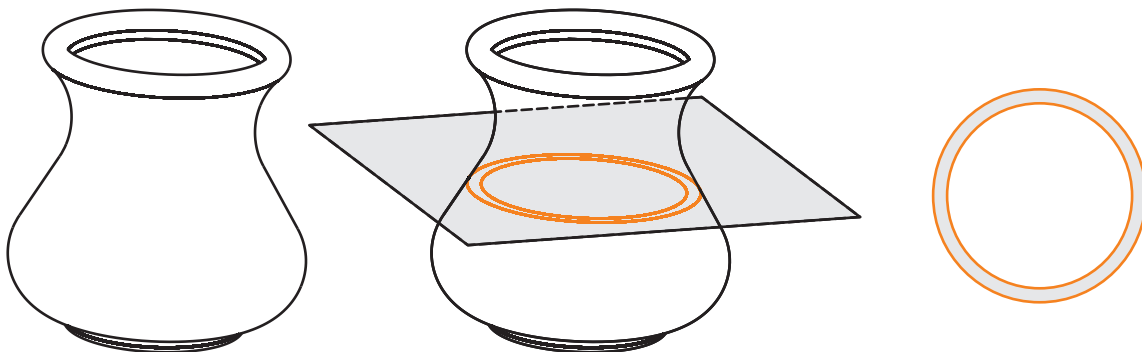


Abbildung 2.1: Dreidimensionales Bauteil mit angedeuteter Schnittebene und resultierender zweidimensionaler Schnittinformation.

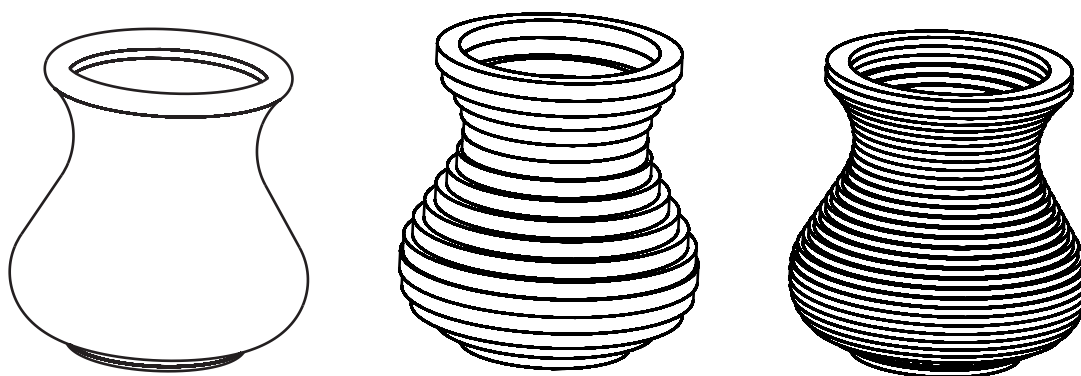


Abbildung 2.2: Dreidimensionales Bauteil und Aufbau dieses Bauteils aus einzelnen Scheiben. Unterschiedliche Scheibendicken beeinflussen die Genauigkeit des dreidimensionalen Bauteils.

Dieser Prozess erfolgt prinzipiell rechnergestützt und wird im deutschsprachigen Raum oftmals als Schichterzeugung bezeichnet. Für diesen Vorgang haben sich allerdings, abgeleitet vom englischen Ausdruck für Scheibe, auch die Begriffe *Slicen* oder *Slicing* etabliert. Diese Begriffe beschreiben damit nicht nur den Vorgang der Konturerzeugung durch Schneiden des Bauteils mit Schnittebenen, sondern beinhalten bereits eine besondere Charakteristik generativer Fertigungsverfahren. Der sukzessive Aufbau eines Bauteils basiert auf dem Auffüllen einer generierten zweidimensionalen Kontur mit dem eigentlichen Baumaterial bis zur nächsten Schnittebene und somit werden Scheiben konstanter Dicke erzeugt. Die Art und Weise, wie aus einer zweidimensionalen Kontur durch Materialauftrag eine dreidimensionale Scheibe aufgebaut wird, hängt vom jeweiligen generativen Fertigungsverfahren ab, das Vorgehensprinzip ist dabei allerdings gleich.

Dieser scheinweise Aufbau führt auch dazu, dass speziell im Falle von Rundungen ein Bauteil im Rahmen von generativen Fertigungsverfahren lediglich eine Annäherung an die exakte Bauteilgeometrie ist. Vor allem die Anzahl der so erzeugten Scheiben beeinflusst die Genauigkeit eines Bauteils deutlich und ist für ein dreidimensionales Bauteil in Abbildung 2.2 veranschaulicht. In Abbildung 2.3 ist ein Schnitt durch das Bauteil zu sehen und der Einfluss der Anzahl der Scheiben bzw. der Scheibendicke wird dort speziell im unteren Bereich des Bauteils deutlich. Der verhältnismäßig große Abstand der einzelnen Schnittebenen in diesem Beispiel führt dazu, dass bestimmte Scheiben nicht aneinander

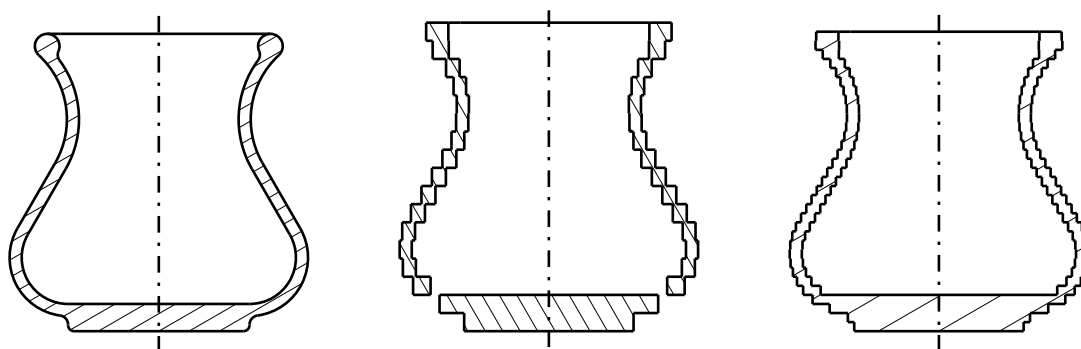


Abbildung 2.3: Schnittdarstellung des dreidimensionalen Bauteils und der Aufbau dieses Bauteils aus einzelnen Scheiben. Unterschiedliche Scheibendicken beeinflussen die Genauigkeit des dreidimensionalen Bauteils.

angrenzen und das Bauteil in diesem Falle so nicht gebaut werden könnte.

Durch Verringerung der Scheibendicke bzw. Erhöhung der Scheibenzahl kann dieser Fehler, wie in Abbildung 2.3 angedeutet, vermieden werden. Um eine dreidimensionale Geometrie so detailgetreu wie möglich aufzubauen, ist daher eine Vielzahl von Scheiben mit geringer Scheibendicke wünschenswert. Eine hohe Anzahl von Scheiben führt jedoch zu verhältnismäßig großen Datenmengen und erhöhter Bauzeit. Wesentlich limitierender für die Scheibendicke ist allerdings die Frage, wie feine Scheiben durch ein generatives Fertigungsverfahren überhaupt hergestellt werden können.

Für die Erzeugung zweidimensionaler Konturen aus einer dreidimensionalen Geometriepäsentation gilt das STL-Format mittlerweile als ein standardmäßiges Austauschformat. Für die Herkunft und die Bedeutung der Bezeichnung STL existieren unterschiedliche Informationen. So wird die Entwicklung und Verbreitung dieses Formats einerseits der amerikanischen Firma 3D Systems zugeschrieben, die die Abkürzung aus dem Namen ihrer Anwendung, der Stereolithographie abgeleitet hat. Andererseits kursieren für dieses Akronym Beschreibungen wie etwa Surface Tessellation Language oder Standard Triangulation Language, was jeweils schon das Prinzip dieser Beschreibungssprache andeutet. Eine dreidimensionale Geometrie wird dabei nämlich durch eine Vielzahl zweidimensionaler, ebener Flächenelemente beschrieben. Bei den Flächenelementen handelt es sich um Dreiecke, die die Oberfläche der dreidimensionalen Geometrie annähern. Jedes dieser Dreiecke wird durch Ortskoordinaten der Eckpunkte und einen Normalenvektor beschrieben. Die Angabe eines Normalenvektors dient als Entscheidungsgrundlage, auf welcher Seite eines solchen Flächenelements Material zu finden ist. STL-Daten lassen sich aus den meisten CAD-Programmen (Computer Aided Design) exportieren und werden in Form von Textdateien mit allen Dreiecksinformationen generiert. STL-Daten lassen sich prinzipiell auch direkt durch die Aneinanderreihung dieser Dreiecksinformationen beispielsweise in einem Texteditor oder durch geeignete Programmierung erstellen [72]. Die zweidimensionalen Konturinformationen des Bauteils innerhalb einer Schnittebene und damit das Grundprofil einer zu generierenden Scheibe wird durch mathematische Operationen rechnergestützt aus diesen STL-Daten gewonnen.

2.2 Beispiele generativer Fertigungsverfahren

Um einen Überblick über Funktionsprinzipien verschiedener generativer Fertigungsverfahren zu gewinnen, werden hier exemplarisch einige Technologien kurz vorgestellt. Detaillierte Informationen dazu sowie zu weiteren generativen Fertigungsverfahren finden sich beispielsweise in Fachbüchern [6, 8, 19, 20]. Verschiedene generative Fertigungsverfahren kann man hinsichtlich der Art und Weise, wie aus der zweidimensionalen Konturinformation eine dreidimensionale Scheibe erzeugt wird, unterteilen. Der vollflächige Auftrag von Baumaterial mit anschließender selektiver Materialbehandlung zum Herbeiführen eines festen Materialverbundes durch Stoffschluss innerhalb des Grundprofils steht dem selektiven Materialauftrag innerhalb des Grundprofils mit anschließender, optionaler Materialbehandlung gegenüber. Eine andere prinzipielle Klassifizierung generativer Fertigungsverfahren kann aufgrund des Zustands des Ausgangsmaterials, aus dem ein Bauteil aufgebaut wird, vorgenommen werden. So kann das Ausgangsmaterial beispielsweise in flüssigem Zustand, als Pulver oder als Festkörper vorliegen.

Einen Vertreter flüssigkeitsbasierter generativer Fertigungsverfahren stellt die Stereoli-

thographie (SL) dar, die von der Firma 3D Systems in den 80er Jahren auf den Markt gebracht wurde. Dabei wird eine photopolymere Flüssigkeit verwendet, die aufgrund der Lichtempfindlichkeit durch die Behandlung mit ultraviolettem Licht (UV) ausgehärtet werden kann. Diese Flüssigkeit wird zunächst vollflächig im gesamten Bauraum der Anlage aufgetragen. In einem gewissen Abstand zur Flüssigkeitsoberfläche ist eine Lichtquelle angebracht, die das Grundprofil der ersten Scheibe abfahren kann. Dadurch wird die Flüssigkeit innerhalb dieses Grundprofils verfestigt und die erste Scheibe erzeugt, wobei die Scheibe von unbehandelter Flüssigkeit umgeben ist. In diesem Fall folgt also auf den vollflächigen Auftrag von Baumaterial die selektive Materialbehandlung, um einen selektiven Materialzusammenhalt hervorzurufen. Nach Erzeugung der ersten Bauteilscheibe wird nach Absenken des Bauraums erneut photopolymere Flüssigkeit aufgetragen und der gesamte Prozess so lange wiederholt, bis alle Scheiben erzeugt sind.

Als ein Beispiel für pulverbasierte generative Fertigungsverfahren kann das 3D-Printing (3DP) genannt werden, ein Verfahren, das Anfang der 90er Jahre aus Arbeiten des Massachusetts Institute of Technology (MIT) hervorgegangen ist. Hierbei wird ein Pulver, etwa ein Gipspulver, zunächst vollflächig im gesamten Bauraum der Anlage aufgetragen. Der selektive Materialzusammenhalt innerhalb des zweidimensionalen Grundprofils wird durch ein Bindemittel erzeugt, das durch Tropfenerzeuger, ähnlich wie bei den bekannten Tintenstrahldruckern, bereitgestellt wird. Durch die Benetzung einzelner Pulverteilchen mit Bindemittel werden diese Pulverteilchen miteinander verklebt. Nach Absenken des Bauraums und dem erneuten Auftrag von Pulver wird das Bauteil so Scheibe für Scheibe aufgebaut.

Das Selektive Lasersintern (SLS) ist ebenfalls ein generatives Fertigungsverfahren, das auf Pulver basiert und kommerziell in den 80er Jahren eingeführt wurde und auf Forschungsarbeiten der University of Texas beruht. Wie beim 3D-Printing wird ebenfalls ein pulverförmiges Ausgangsmaterial zunächst vollflächig aufgetragen. Um einen selektiven Materialzusammenhalt einzelner Pulverteilchen innerhalb des zweidimensionalen Grundprofils zu erzeugen, wird in diesem Fall allerdings eine Aktivierungsenergie benötigt, die die einzelnen Pulverteilchen miteinander verbindet. Die Aktivierungsenergie wird durch einen Laser bereit gestellt und führt zum lokalen Aufschmelzen einzelner Pulverteilchen. Da die Pulverteilchen nicht komplett in den flüssigen Zustand übergehen, sondern nur teilweise aufgeschmolzen werden, wird dieser Prozessschritt durch den Begriff Sintern beschrieben. Nach dem Aushärten einer so erzeugten Scheibe wird wiederum die Bauplattform abgesenkt, neues Pulver aufgetragen und der Prozess wiederholt.

Entsprechend den eingangs beschriebenen Unterteilungs- und Klassifizierungsmöglichkeiten generativer Fertigungsverfahren unterscheidet sich das Fused Deposition Modeling (FDM) von den bisher genannten Beispielen. Anfang der 90er Jahre wurde das Verfahren durch die Firma Stratasys erfolgreich am Markt eingeführt und mittlerweile werden von zahlreichen Firmen Anlagen basierend auf diesem Prinzip angeboten. Die Unterscheidungsmerkmale sind einerseits, dass ein Feststoff als Ausgangsmaterial dient, und andererseits, dass der Materialauftrag selektiv innerhalb des Grundprofils erfolgt. Das Ausgangsmaterial wird meist als Draht, aufgewickelt auf Spulen, einer beheizten Düse zugeführt und dort aufgeschmolzen. Entlang und innerhalb einer zweidimensionalen Bauteilkontur wird das aufgeschmolzene Material auf einer Bauplattform abgelegt und erstarrt dort. Wie bei den anderen Verfahren auch, wird nach dem Abarbeiten einer Scheibe die Bauplattform abgesenkt und dieser Prozess Scheibe für Scheibe wiederholt, bis das komplette Bauteil generiert ist.

2.3 Anwendung generativer Fertigungsverfahren

Die ersten Anwendungen generativer Fertigungsverfahren sind hauptsächlich in der Herstellung von Prototypen zu sehen. Die Unterstützung auch schon in frühen Phasen der Produktentwicklung durch haptische Modelle als Anschauungsobjekte kann als Ausgangspunkt betrachtet werden. Mittlerweile haben sich Bauteile, die mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt werden, jedoch bis hin zu Funktionsbauteilen entwickelt, die nicht mehr zwingend prototypischen Charakter aufweisen. Damit ist die Anwendung generativer Fertigungsverfahren sehr breit gefächert. Durch die zügige Verbreitung von Anlagen, speziell Anlagen, die das Prinzip des Fused Deposition Modeling verwenden, wird der Kreis der Anwender auch stetig größer. Während zu Beginn der noch jungen Technologie lediglich wenige, vergleichsweise große Firmen über eigene generative Fertigungsanlagen verfügten, sind derzeit Tendenzen zu beobachten, die auf die Verbreitung solcher Anlagen im Heimsektor abzielen. Zudem haben sich einige Dienstleister am Markt etabliert, die mit unterschiedlichsten generativen Fertigungsverfahren Auftragsfertigung für Kunden übernehmen. Über Onlineportale ist es heutzutage auch für Kunden, die nicht über professionelle Konstruktionskenntnisse- und werkzeuge verfügen, möglich, ihre eigenen Bauteile zu generieren. Beispielsweise können aus vorgefertigten Vorlagen personalisierte Bauteile generiert werden und eigene Konstruktionen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. In diesem Bereich liegen die Anwendungen vorwiegend im Bereich von Designobjekten.

Beliebte Bauteile, die mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt wurden und die Strukturen aufweisen, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren nicht hergestellt werden können, wie etwa ineinander verschlungene Strukturen, sollen vor allem die Möglichkeiten dieser Technologie aufzeigen. Hersteller von Anlagen für die generative Fertigung wollen damit einerseits das Potential demonstrieren und gleichzeitig für eine gewisse Faszination sorgen. Aus technischer Sicht ist die Bedeutung solcher Objekte allerdings gering.

Von wesentlich größerer Bedeutung aus technischer Sicht sind haptische Modelle. Als Beispiel können Produkte genannt werden, bei denen die Ergonomie eine wichtige Rolle spielt, etwa Griffe von Rasierern oder Skistöcken. So unterschiedlich diese beiden Beispiele sein mögen, so weisen sie doch auf die Bedeutung haptischer Prototypen hin. Trotz der Digitalisierung von Konstruktionen und Produkten mit nahezu real wirkenden Visualisierungsmöglichkeiten stellen reale, anfassbare Modelle eine große Unterstützung für Konstrukteure und Kunden während des Produktentstehungsprozesses dar. Die schnelle Herstellung solcher Modelle, teilweise in verschiedenen Varianten, erleichtert die Entscheidung für das Aussehen des späteren Serienproduktes, auch wenn solche Modelle nicht die eigentliche technische Funktion erfüllen und aus anderen Materialien bestehen. Anwender generativer Fertigungsverfahren erwarten sich davon ein besser am Markt ausgerichtetes Produkt, eine schnellere Produktentwicklung mit weniger Änderungskosten, damit einen früheren Markteintritt und letztlich einen Wettbewerbsvorteil.

Die Herstellung von Modellen mit hohem Detaillierungsgrad ist in vielen Disziplinen ein wichtiger Faktor. Architekten bedienen sich beispielsweise sehr häufig dreidimensionaler Modelle, um Entscheidungsträger von ihrem Entwurf zu überzeugen. Der Einsatz generativer Fertigungsverfahren bietet hierfür eine Möglichkeit, solche Modelle schnell und effizient herzustellen. Ein weiteres Beispiel für die Bedeutung von Modellen ist im Medizinsektor zu sehen. Anatomische Modelle von Organen und Blutgefäßen können hier beispielsweise für Lehrzwecke oder zur Operationsplanung dienen. Im letzteren Fall sind patientenspe-

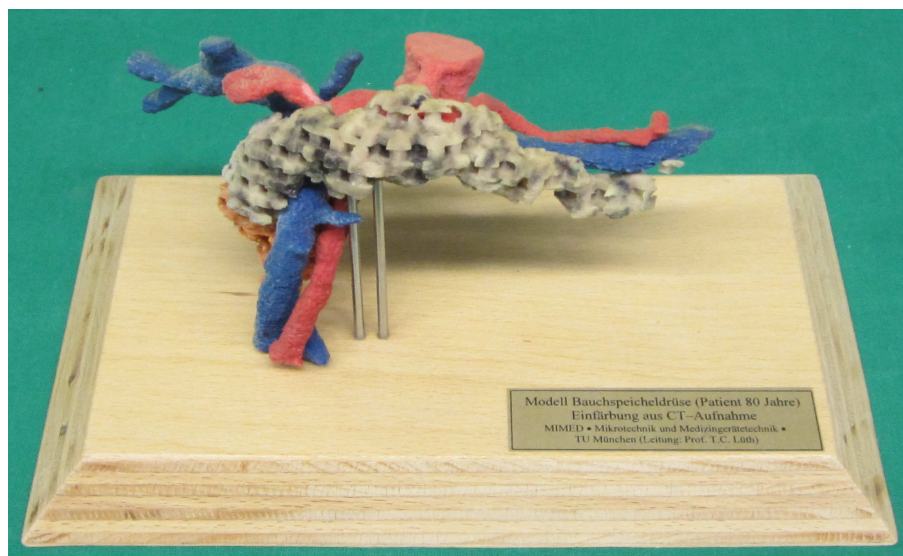


Abbildung 2.4: Patientenspezifisches Modell einer Bauchspeicheldrüse hergestellt mit generativen Fertigungsverfahren (3D-Printing). Das Modell ist Resultat von Forschungsvorhaben unter der Leitung von Professor Tim Lüh [10, 66, 69, 76, 64].

zifische Modelle notwendig, anhand derer sich ein Chirurg ein Bild machen kann. Solche patientenspezifische Modelle lassen sich beispielsweise aus bildgebenden Verfahren wie der Computertomographie digital rekonstruieren und anschließend mit generativen Fertigungsverfahren herstellen. Ein Beispiel hierfür ist ein reales Modell einer Bauchspeicheldrüse, wie es in Abbildung 2.4 zu sehen ist. Dies ist ein Resultat aus Forschungsvorhaben unter der Leitung von Tim Lüh, Professor an der Technischen Universität München, im Rahmen derer eine Vielzahl medizinischer Modelle in unterschiedlichsten Verfahren und Ausführungen entwickelt und umgesetzt wurden [10, 66, 69, 76, 64]. Die Herstellung patientenspezifischer Organmodelle wäre mit herkömmlichen Verfahren nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Hier zeigt sich ein Vorteil generativer Fertigungsverfahren, denn für die Herstellung individueller Produkte in Kleinserien bis hinab zu lediglich einem Exemplar sind generative Fertigungsverfahren sehr geeignet.

Neben der Individualisierung von Produkten stellen generative Fertigungsverfahren auch mehr Freiheiten für Entwickler und Konstrukteure bereit. Als einfaches Beispiel sei ein Gehäuse genannt, in dem elektrische Komponenten mit Platinen, Anschlüssen, Schaltern und dergleichen untergebracht werden. Anstatt sich bei der Auslegung der funktionsrelevanten Komponenten streng an verfügbaren Gehäusen orientieren zu müssen, können Entwickler diese Gehäuse frei gestalten. Dies kann sich nicht nur hinsichtlich eines ansprechenden Designs sondern sich auch in puncto Funktionserfüllung als vorteilhaft erweisen.

Innerhalb der noch jungen Technologie der generativen Fertigungsverfahren ist ein Trend hin zu Bauteilen mit technischer Funktion zu verzeichnen. Dies können Einzelbauteile, aber auch mehrteilige Produkte mit teilweise beweglichen Komponenten sein. Modelle von komplexen Getrieben und Kinematiken als Demonstratoren für spätere Serienprodukte können als Beispiel hierfür genannt werden. Die Herstellung von flexiblen und dünnwandigen Strukturen mit generativen Fertigungsverfahren öffnet zudem neue Möglichkeiten, was die Konstruktion von Bauteilen zur Erfüllung einer speziellen Funktion angeht. Bewegungen von Bauteilen entlang vorgegebener Pfade können ohne spezielle Lagerungen realisiert werden. Dies findet so beispielsweise in einem Operationsroboter Anwendung,

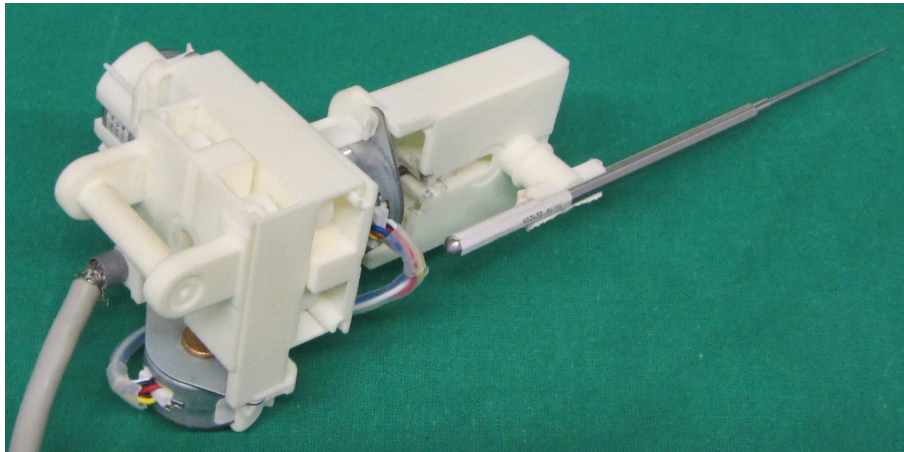


Abbildung 2.5: Einweg Mikromanipulator System (MMS) für die Mittelohrchirurgie. Ein chirurgisches Instrument kann in eine Aufnahme eingeklinkt werden und über flexible Mechanismen im Raum bewegt werden. Die flexiblen Mechanismen werden durch Motoren angetrieben, bestehen aus Kunststoff und sind mit generativen Fertigungsverfahren (SLS) hergestellt. Dieser Operationsroboter ist Resultat von Forschungsvorhaben unter der Leitung von Professor Tim Lüth [13, 40].

den ein Arzt bei der Mittelohrchirurgie verwenden kann. Dabei lässt sich ein chirurgisches Instrument entlang dreier senkrecht zueinander stehender Achsen bewegen. Die Bewegung entlang der Achsen basiert in diesem Fall auf der Verformung flexibler Strukturen, die in einem Stück durch generative Fertigungsverfahren als spielfreie Festkörpergelenke hergestellt werden. In Abbildung 2.5 ist dieser Operationsroboter, ein Mikromanipulator System (MMS), zu sehen, der ein Resultat aus Forschungsvorhaben [13, 40] unter der Leitung von Tim Lüth, Professor an der Technischen Universität München, ist. Die schnelle und vergleichsweise günstige Herstellung der flexiblen Strukturen durch generative Fertigungsverfahren ermöglicht es zudem, diesen Operationsroboter als Einwegprodukt auszulegen, was speziell für medizinische Anwendungen hinsichtlich der Sterilisation von Vorteil ist.

Mit den bislang genannten Beispielen wird an dieser Stelle schon deutlich, wie breit gefächert die Palette der Anwendung generativer Fertigungsverfahren ist. Dies ist auch als Hinweis auf das Zukunftspotential dieser Technologie zu sehen, was Andreas Gebhardt [18] bereits im Jahre 2000 wie folgt formuliert hat:

Rapid Prototyping Verfahren haben sich als Werkzeug zur effektiven Unterstützung des Produktentstehungsprozesses etabliert. Deshalb bedeutet ihr Einsatz keinen Vorsprung vor dem Wettbewerb. Der Umkehrschluß ist richtig: Sie nicht einzusetzen bedeutet, mit stumpfen Waffen zu kämpfen.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der generativen Fertigungsverfahren schreitet weiterhin schnell voran und speziell im Bereich des Fused Deposition Modeling werden immer mehr Anlagen auf dem Markt angeboten und damit auch immer mehr Anwendungsfelder geöffnet.

3 Stand der Technik

Im Kontext der Dosierung von Kunststoffen ist aus der Gruppe der generativen Fertigungsverfahren in erster Linie das Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren zu nennen und soll hier nun detailliert betrachtet werden. Bei der Bezeichnung Fused Deposition Modeling (FDM) handelt es sich um eine geschützte Bezeichnung der Firma Stratasys, die dieses Verfahren auf den Markt gebracht hat. Allgemein lässt sich das zugrundeliegende Verfahren im Sinne der Klassifizierung generativer Fertigungsverfahren als Fused Layer Modeling (FLM) einstufen [20]. Die Bezeichnung FDM hat sich dabei allerdings eingebürgert und neben dem Marktführer Stratasys bieten einige Tochterfirmen und weitere Anbieter, wie etwa Alphacam, Deltatower, Hewlett Packard oder MakerBot solche FDM Maschinen und Anlagen an.

Aufgrund der Vielzahl bestehender Maschinen mit jeweils speziellen Ausprägungen werden im Folgenden die Gemeinsamkeiten ausgehend vom Verfahrensprinzip vorgestellt. Generelle Beschreibungen sowie detaillierte Betrachtungen ausgewählter Verfahren bestimmter Hersteller sind in der Literatur etwa in [8, 60, 17, 18, 19, 20, 24, 77] zu finden. Ebenso wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine ausführliche Beschreibung anderer Dosieranwendungen, wie etwa die Kleinstmengen dosierung von Radiopharmaka, Schmierstoffen und Metallen, sowie deren technische Umsetzungen [27, 26, 28, 62] verzichtet. Der Fokus wird somit auf die Kunststoffdosierung und deren Anwendung in einem speziellen generativen Fertigungsverfahren gerichtet.

3.1 Verfahrensprinzip

Wie eingangs erläutert, handelt es sich bei dem Fused Deposition Modeling um ein generatives Fertigungsverfahren, bei dem ein Bauteil sukzessive aus einzelnen Scheiben bzw. Schichten aufgebaut wird, wobei das Baumaterial für eine Scheibe selektiv aufgetragen wird.

Prinzipiell liegt dabei das Ausgangsmaterial im festen Aggregatzustand in Drahtform mit Durchmessern im Bereich von 1,75 mm bis 3 mm [20, 77] aufgewickelt auf Vorratsspulen vor. Das Ausgangsmaterial wird, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, vom Materialspeicher einem Austragskopf über Antriebsrollen zugeführt. Innerhalb des Austragskopfes wird das feste Ausgangsmaterial zunächst auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur aufgeheizt und geht so in eine zumindest teilweise flüssige Phase über. Durch den Vorschub von festem Material über die Antriebsrollen wird das verflüssigte Material aus einer Extrusionsdüse mit Durchmessern im Bereich von 0,1 mm bis 0,8 mm [20, 77] ausgetragen. Der Austragskopf als Kombination von Antriebsrollen, Schmelzeinheit und Extrusionsdüse, lässt sich innerhalb einer Ebene in x - und y - Richtung verfahren. Dies ermöglicht

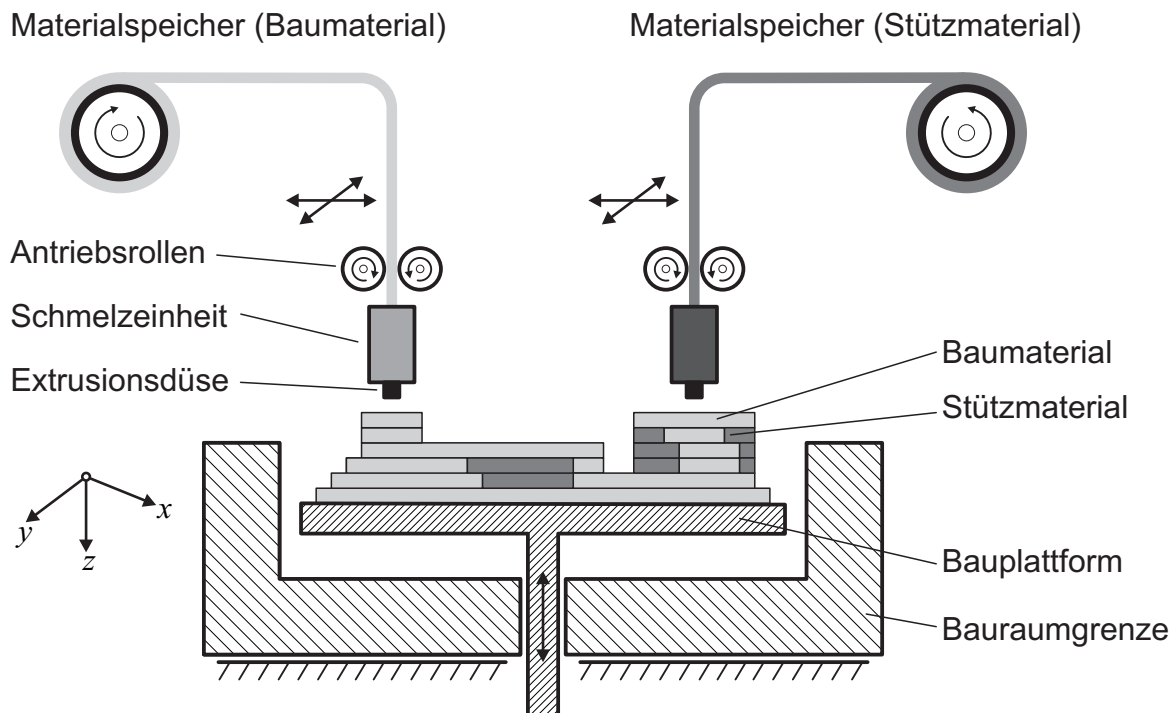


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Prinzips des Fused Deposition Modeling (FDM). Über Antriebsrollen wird Material von einem Materialspeicher einem Austragskopf bestehend aus einer Schmelzeinheit und einer Extrusionsdüse zugeführt. Der Austragskopf lässt sich in einer Ebene parallel zur Bauplattform entsprechend vorgegebener Pfade verfahren und kann Material auf die Bauplattform auftragen. Die Bauplattform kann vertikal positioniert werden und wird nach Abarbeiten einer Scheibe verfahren. Der Bauraum kann optional beheizt werden und der Einsatz mehrerer Austragsköpfe für unterschiedliche Materialien ist prinzipiell möglich.

es, vorgegebene Konturen und Pfade mit der Extrusionsdüse abzufahren und an diesen Stellen somit Material aufzutragen.

Das Material wird auf einer Bauplattform abgelegt, die vertikal in z -Richtung beweglich gelagert ist. Nach der vollständigen Bearbeitung einer einzelnen Scheibe bzw. Schicht wird die Bauplattform abgesenkt und der Bauprozess für die nächste Scheibe bzw. Schicht gestartet. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis das komplette Bauteil generiert ist. Der Bauraum inklusive der darin befindlichen Bauplattform kann prinzipiell beheizt werden und hat je nach Anlage Abmessungen im Bereich von $225 \times 145 \times 150$ mm bis $914 \times 610 \times 914$ mm (Länge \times Breite \times Höhe) [20, 24].

Für die Art und Weise, wie die Bewegung des Austragskopfes relativ zur Bauplattform realisiert wird, bestehen verschiedene Umsetzungen. Neben der beschriebenen Variante einer Bewegung des Austragskopfes in der x - y -Ebene in Kombination mit einer Bewegung der Bauplattform in z -Richtung ist auch eine Bewegung des Austragskopfes in alle drei Raumrichtungen in Kombination mit einer fixierten Lagerung der Bauplattform möglich. Die einzelnen Bewegungen können über verschiedene Linearantriebssysteme wie etwa aktivierte Zahnstangen, Riementriebe und Linearführungen oder über Strukturen aus dem Bereich der Robotik wie etwa Deltakinematiken realisiert werden.

Wie in Abbildung 3.1 angedeutet, ist der Einsatz mehrerer Austragsköpfe bei diesem Verfahren denkbar. So können beispielsweise Materialien mit verschiedenen Farben verwen-

det werden. Aus technischer Sicht wesentlich relevanter ist der Einsatz eines zusätzlichen Austragskopfes, der Stützmaterial bereit stellen kann. Dies ermöglicht die Herstellung von Überhängen und Hinterschnitten. Das Stützmaterial wird durch das selbe Verfahrensprinzip wie das Baumaterial aufgetragen und kann nach dem Bauprozess entfernt werden. Sowohl für den Auftrag des Baumaterials als auch des Stützmaterials wird die Bewegung des Austragskopfes in der x - y -Ebene mit dem Materialvorschub basierend auf vorgegebenen Verfahrenwegen koordiniert.

3.2 Baustrategie und Genauigkeit

Die Berechnung der Verfahrenwege für den Austragskopf basiert auf der rechnergestützten Schichterzeugung und der Ermittlung der Bauteilkonturen aus einer solchen Schichtinformation. Die Art und Weise, wie letztlich die Verfahrenwege generiert werden, ist Teil des jeweiligen Firmenwissens. Als Beispiele für prinzipielle Baustrategien können allerdings die in Abbildung 3.2 gezeigten Möglichkeiten genannt werden. Neben schrumpfenden Konturen können so etwa Schraffurlinien oder andere flächenfüllende Linienzüge verwendet werden [59, 70].

Als Eingangsdaten für die Berechnung dieser Verfahrenwege dienen neben der Information über die zu füllende Bauteilkontur ebenso die möglichen Prozessparameter einer Anlage, wie etwa die minimalen Radien oder die Extrusionsbreite des aufgetragenen Baumaterials. Für reale Bauprozesse spielt die Verbindung einzelner extrudierter Stränge innerhalb einer Ebene sowie zu benachbarten Ebenen eine wichtige Rolle, die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils hat.

Die Orientierung der Ablagemuster wird oftmals von Scheibe zu Scheibe um einen definierten Winkel variiert, um die exakt deckungsgleiche Ausrichtung einzelner Stränge aufeinander zu umgehen. Im Kontext der Baustrategie bei diesem generativen Fertigungsverfahren ist neben dem Ablagemuster auch die Dichte des erzeugten Bauteils, und wie diese beeinflusst wird, zu nennen. Mit der oft als Bahnabstand bezeichneten Distanz der Symmetrieachsen einzelner Stränge lässt sich dies wie in Abbildung 3.3 skizziert einfach

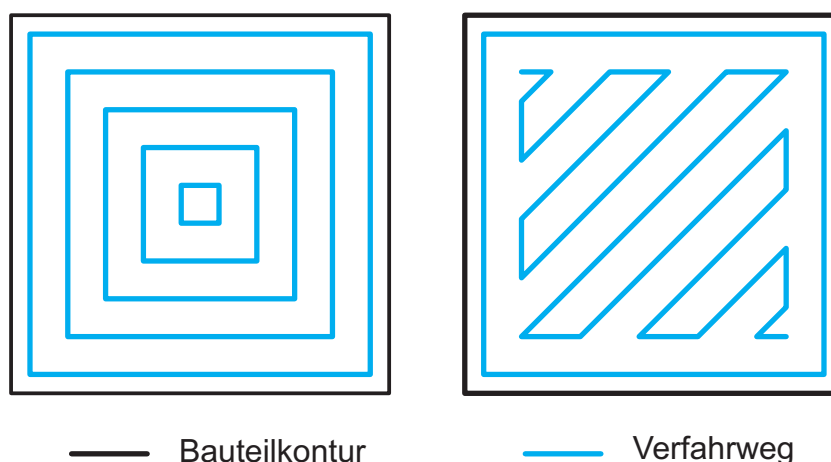


Abbildung 3.2: Beispiele für mögliche Verfahrenwege zur Füllung einer Bauteilkontur: schrumpfende Konturlinien (links) und zusammenhängende Linienzüge innerhalb einer Begrenzungskontur (rechts).

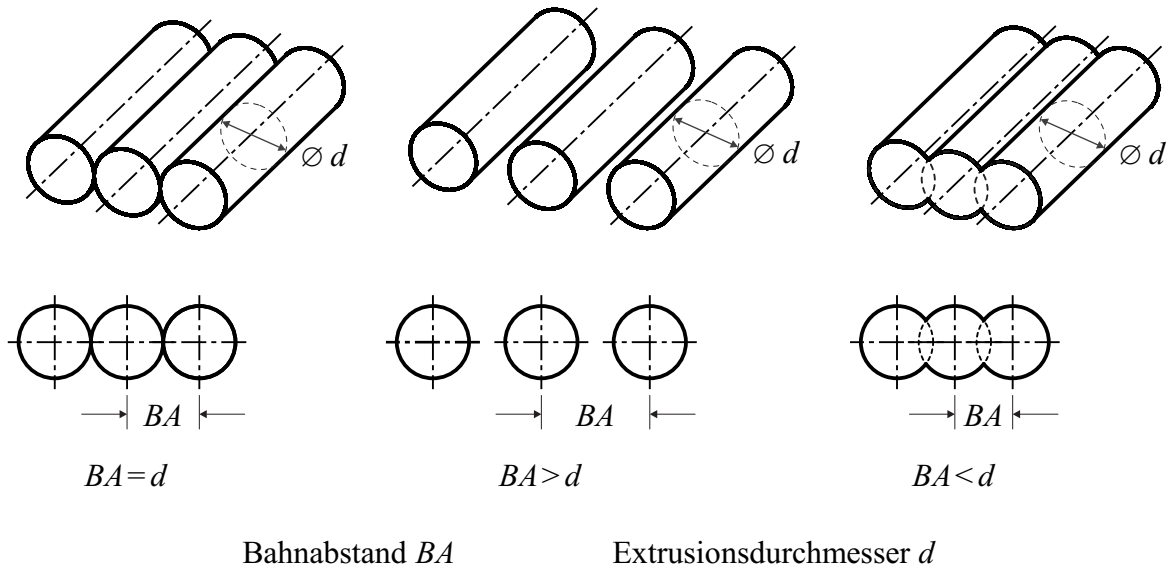


Abbildung 3.3: Beispiele für unterschiedliche Baustrategien hinsichtlich des Bahnabstands BA . Ausgehend von einem Bahnabstand, der dem Strang- bzw. Extrusionsdurchmesser d entspricht (links), kann die Dichte des Bauteils variiert werden. Sowohl die Vergrößerung des Bahnabstands (Mitte) als auch die Verringerung des Bahnabstands (rechts) können eingesetzt werden.

veranschaulichen.

Bei einem Bahnabstand, der dem Strang- bzw. Extrusionsdurchmesser entspricht, liegen die Stränge exakt nebeneinander und berühren sich. Mit wachsendem Bahnabstand wird weniger Material für das Bauteil verwendet und die Dichte sinkt, während entsprechend bei einer Überlappung, also einem negativen Bahnabstand, die Dichte erhöht wird.

Wann welche Baustrategie zielführend für die Herstellung eines definierten Bauteils mit spezifischen Eigenschaften ist, lässt sich nicht pauschal angeben. Die Wahl der geeigneten Baustrategie inklusive der sinnvollen Positionierung und Orientierung des Bauteils im Bauraum erfordert je nach Qualitätsansprüchen mehr oder weniger Erfahrung und Wissen vom Nutzer. So hat etwa die Orientierung des Bauteils Auswirkungen auf die Genauigkeit eines Bauteils, da die meisten FDM-Anlagen unterschiedliche Genauigkeiten in verschiedene Raumrichtungen erzielen können. Innerhalb der x - y -Ebene bewegen sich laut Herstellerangaben der Firma Stratasys Bauteiltoleranzen im Bereich von $\pm 0,09$ mm bis $\pm 0,24$ mm, wohingegen in z -Richtung Werte von $\pm 0,12$ mm bis $\pm 0,33$ mm genannt werden. Die Angaben anderer Hersteller liegen in der selben Größenordnung. Inwieweit dies mit der Positioniergenauigkeit der beweglichen Komponenten korreliert, innerhalb des Bauraums ortsabhängig variiert und auf welche Prüfkörpern diese Daten zurückzuführen sind, wird von Herstellern nicht angegeben. Die Unterschiede in der Genauigkeit in x - und y -Richtung im Vergleich zur z -Richtung sind allgemein jedoch durch das Verfahren an sich zu erklären. Die realisierbaren Extrusionsdurchmesser sind hier als Kriterium für die Auflösung in z -Richtung zu sehen.

3.3 Materialspektrum und Materialvorbereitung

Das Verfahrensprinzip des Fused Deposition Modeling (FDM) ermöglicht die Verwendung verschiedener Materialien. Grundanforderungen an die Materialien sind, dass sie sich für den Extrusionsprozess gezielt aufschmelzen lassen und nach der Extrusion schnell erstarren und dabei die Lage und Form möglichst beibehalten. Üblicherweise handelt es sich bei den Materialien um Kunststoffe, die direkt in Drahtform vom Anlagenhersteller angeboten und vertrieben werden.

Die Herstellung des Materials in Drahtform wird auch als Halbzeuherstellung bezeichnet. Das Ausgangsmaterial wird in Granulatform in einer Plastifiziereinheit einer Spritzgussmaschine aufgeschmolzen und homogenisiert. Etwaige Zusätze wie Aluminium werden in diesem Prozessschritt beigemischt, der Hauptanteil des Gemischs besteht dabei jedoch aus Kunststoff. Unter erhöhtem Druck wird diese Kunststoffschmelze dann durch eine Düse extrudiert, in nachgeschalteten Kühlwannen abgekühlt und mit Abzugsvorrichtungen letztlich auf eine Spule aufgewickelt.

Das so erzeugte Ausgangsmaterial muss neben dem angesprochenen Temperaturverhalten mechanische Anforderungen erfüllen. Da das Material über Antriebsrollen der Extrusionsdüse zugeführt wird und durch den Vorschub der eigentliche Materialaustrag hervorgerufen wird, muss das Ausgangsmaterial im festen Zustand ausreichend stabil sein. Im flüssigen Zustand muss das Material möglichst wenig Fließwiderstand bieten, da zur Extrusion abgesehen vom Nachführen von festem Material und der Temperatur innerhalb der Schmelzeinheit keine zusätzliche Energie eingebracht werden kann.

Bei den gängigen Materialien handelt es sich um Kunststoffe auf Basis von ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat). Dies ist ein Thermoplast, also ein Kunststoff, der beliebig oft durch Erwärmung aufgeschmolzen und abgekühlt werden kann, solange die kritische Zersetzungstemperatur nicht überschritten wird [61]. Die Anteile der einzelnen Monomere, Acrylnitril, Butadien und Styrol, können dabei variieren, so dass viele ABS-Kunststoffe existieren. Hersteller von FDM-Anlagen bieten häufig mehrere Varianten dieser Kunststoffe an, verzichten dabei jedoch auf die Angabe detaillierter Zusammensetzungen. Weitere Materialien stellen Kunststoffe auf Basis von Polycarbonaten (PC) oder Polyphenylensulfid (PPS) sowie teilweise als Biokunststoffe bezeichnete Mischungen auf Basis von Holz oder Milchsäure dar.

4 Kritik am Stand der Technik

Das Ausgangsmaterial für das Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren muss als Halbzeug in Drahtform vorliegen [19, 20, 24, 77]. Hierfür wird festes Material verflüssigt und durch einen urformenden Prozess wiederum in einen festen Zustand umgewandelt [77]. Im eigentlichen FDM-Prozess wird dieses Halbzeug erneut verflüssigt. Der urformende vorangeschaltete Prozess ist daher prinzipiell nicht notwendig und stellt einen gewissen Kosten - und Zeitaufwand dar. Darüber hinaus ist dies auf Thermoplaste beschränkt, Duroplaste, also Kunststoffe, die nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden können, scheiden hierfür daher aus [14, 33, 61]. Im Vergleich zu der Vielzahl technischer Kunststoffe ist das Materialspektrum für FDM-Verfahren damit stark eingeschränkt. Für das eigentliche FDM-Verfahren ist das Material in Drahtform zwingend nötig.

Keine der bestehenden Anlagen bietet die Möglichkeit, Granulat als Ausgangsmaterial zu verwenden.

Zur Herstellung des Halbzeugs sind erhöhte Drücke notwendig, die im FDM-Prozess nicht aufgebracht werden können [24]. Alleine die Tatsache, dass der Austragskopf inklusive der Extrusionsdüse bei bestehenden FDM-Verfahren bewegt wird, schließt den Einsatz von Systemen zur Hochdruckerzeugung aus, da ansonsten große Massen bewegt werden müssten [24]. Hohe Drücke sind allerdings nicht nur für die Herstellung der Halbzeuge notwendig, sondern können auch für die Extrusion durch kleine Düsen benötigt werden. Der Strömungswiderstand aufgrund geometrischer Verhältnisse ist in Kanälen unter anderem abhängig vom Kanaldurchmesser; je kleiner eine Düse ist, desto größer ist der dadurch verursachte Widerstand [46]. Hinzu kommt der Einlaufdruckverlust bei Querschnittsübergängen in kleine Düsen [3, 7, 63]. Neben diesen äußeren Reibungen trägt die innere Reibung, die durch die Viskosität eines Fluids hervorgerufen wird, zum Fließwiderstand einer Flüssigkeit bei [23, 22, 55]. Um geringere Extrusionsdurchmesser im Vergleich zum Stand der Technik zu realisieren bzw. Materialien mit erhöhter Viskosität zu verwenden, ist es daher notwendig, das flüssige Material einem erhöhten Energieniveau auszusetzen, was durch einen erhöhten Druck erreicht werden kann.

Keine der bestehenden Anlagen bietet die Möglichkeit, einen zusätzlichen Druck für die Extrusion bereit zu stellen.

Der Vorschub des Materials und damit der extrudierte Materialstrom im FDM-Prozess wird über die Antriebsrollen zum Nachführen des festen Materials realisiert [19, 20, 24, 77]. Damit ist der Vorschub durch das Aufschmelzverhalten des festen Materials und den Fließwiderstand des verflüssigten Materials limitiert [24]. Die Extrusionsdüse ist während des gesamten Vorgangs geöffnet, was dazu führen kann, dass bereits verflüssigtes Material aufgrund der Gravitation ausfließen kann, ohne festes Material nachzuführen.

Keine der bestehenden Anlagen bietet die Möglichkeit, die Extrusionsdüse gezielt zu öffnen bzw. zu verschließen.

5 Aufgabe

Im Rahmen dieser Arbeit besteht die Aufgabe, ein Dosiersystem zu entwickeln, das Ausgangsmaterial in Form von Kunststoffgranulat verflüssigen und unter erhöhtem Druck durch eine Austrittsdüse extrudieren kann und dabei die Möglichkeit bietet, diese Austrittsdüse gezielt zu öffnen und zu verschließen.

Damit soll die Grundlage für die Dosierung von Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren gelegt werden, bei denen das Ausgangsmaterial nicht in Drahtform vorliegen muss und somit auf die Halbzeuherstellung verzichtet werden kann.

Für die Verflüssigung von Kunststoffgranulat soll eine Plastifiziereinheit einer Spritzgussmaschine verwendet werden, an die ein zu entwickelnder Austragskopf angebunden werden kann. Damit wird es ermöglicht, eine Kunststoffschmelze unter Drücken von bis zu 1000 bar und Temperaturen von bis zu 250 °C in den Austragskopf zu fördern. Dies erlaubt den Einsatz des Dosiersystems zur Verwendung hochviskoser Kunststoffe wie etwa Polypropylen und soll die Verwendung kleiner Austrittsdüsen, auch mit Durchmessern kleiner als 0,1 mm, ermöglichen. Durch den Druck von bis zu 1000 bar wird ein erhöhtes Energieniveau bereit gestellt, so dass die Einlaufdruckverluste in die Austrittsdüse und der Strömungswiderstand innerhalb der Austrittsdüse kompensiert werden können.

Das Dosiersystem soll zugleich dazu in der Lage sein, es mit anderen Medien, die bereits bei Raumtemperatur im flüssigen Zustand vorliegen, zu betreiben. In diesem Fall wird auf die Plastifiziereinheit zur Verflüssigung des Kunststoffgranulats und zur Bereitstellung eines hohen Drucks verzichtet. Stattdessen können Pumpen zur Druckerzeugung verwendet werden, die ein Medium in den Austragskopf fördern.

Das zu dosierende Fluid soll durch die Plastifiziereinheit bzw. eine Pumpe mit einem Druck oberhalb des Umgebungsdrucks beaufschlagt werden. Dadurch soll ein Druckunterschied zwischen dem Einlass in das Dosiersystem und der Systemgrenze, gekennzeichnet durch die Austrittsdüse, erzeugt werden. Dieser Druckunterschied ruft die Strömung des Fluids und somit einen Volumenstrom hervor. Durch den Verschluss der Austrittsdüse soll das System in ein abgeschlossenes System überführt werden, das keine Ausgangsgrößen besitzt und somit auch den Volumenstrom unterbindet. Der Wechsel zwischen geöffneter und geschlossener Austrittsdüse stellt somit das Schalten eines Druckgefälles dar, mit dem ein Volumenstrom gesteuert werden kann.

Das Schalten dieses Druckgefälles soll durch ein Ventil ermöglicht werden, das den Anforderungen von Drücken von bis zu 1000 bar und Temperaturen von bis zu 250 °C standhält. Hierfür soll im Rahmen dieser Arbeit ein Ventil entwickelt werden, das auf der Deformation eines Verschlusselements beruht. Das Verschlusselement soll durch einen externen Aktor derart verformt werden können, dass ein Verschluss der Austrittsdüse ermöglicht wird. Wird der Aktor nicht betätigt, ist die Austrittsdüse geöffnet.

Wesentlicher Teil dieser Arbeit ist die Beschreibung des mechanischen Verhaltens des Verschlusselements. Neben der konstruktiven Umsetzung soll daher zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens des Verschlusselements ein analytisches Modell erarbeitet werden. Die Verifikation des Modells soll anhand von durchgeführten Messungen erfolgen. Für die Durchführung solcher Messungen soll ein geeigneter Messaufbau entwickelt werden, der valide Messungen erlaubt. Neben der Modellverifikation sollen so Erkenntnisse gewonnen werden, die als Grundlage für etwaige Auslegungen des Verschlusselements dienen können.

Die Betätigung des Ventils soll das gezielte Starten und Stoppen eines Volumenstroms ermöglichen und damit die Extrusion von Kunststoff gezielt starten und stoppen können. Dies soll unter Verwendung von Polypropylen demonstriert werden.

6 Abgrenzung

Für die Dosierung von Kunststoffen wird im Rahmen dieser Arbeit ein neues Prinzip vorgestellt, das auf der Extrusion von Kunststoffen durch eine Austrittsdüse beruht und das für generative Fertigungsverfahren eingesetzt werden kann. Die Umsetzung eines generativen Fertigungsverfahrens basierend auf diesem Prinzip ist dabei nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Dies bedeutet, dass Themen wie die rechnergestützte Steuerung des Extrusionsprozesses und die Positionierung der Austrittsdüse relativ zu einer Bauplatattform nicht behandelt werden. Ebenso ist es nicht Gegenstand der Arbeit, als Resultat des Extrusionsprozesses frei fliegende oder diskrete Volumina zu erzeugen. Somit erfolgt keine quantitative Beschreibung der Geometrie oder der Oberflächenbeschaffenheiten der extrudierten Kunststoffe.

Für die Dosierung der Kunststoffe wird in dieser Arbeit die Grundlage durch das Öffnen und Verschließen einer Austrittsdüse gelegt. Der Extrusionsprozess kann durch das Öffnen und Verschließen der Austrittsdüse gestartet und gestoppt werden, was einer qualitativen Steuerung des Förderns von Material entspricht. Es erfolgt dabei keine Dosierung im Sinne der Definition der Dosierung, wie sie in Abbildung 6.1 illustriert ist, entsprechend

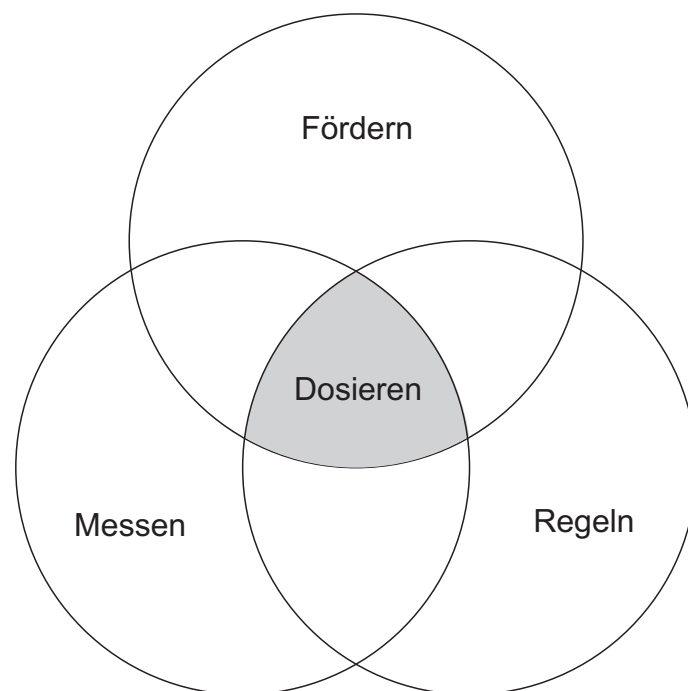


Abbildung 6.1: Definition des Dosierens als Kombination von Fördern, Messen und Regeln. Angelehnt an [75].

der Kombination von Fördern, Messen und Regeln.

Das Modell zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens des Verschlusselements sowie die Messung zur Verifikation dieses Modells beruht auf statischen Belastungen und Betrachtungen. Dynamische Prozesse werden somit nicht abgebildet und das dynamische Verhalten des Extrusionsprozess ist daher nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Als Kunststoff wird im Rahmen dieser Arbeit Polypropylen, ein teilkristalliner Thermoplast, mit der Bezeichnung Moplen HP 501 N verwendet. Von diesem Kunststoff existieren zahlreiche ähnliche Varianten, die in der Industrie in verschiedensten Bereichen eingesetzt werden. Mit dem Begriff Kunststoff wird jedoch eine enorme Anzahl an Materialien bezeichnet, so dass die Dosierung von Kunststoffen im Rahmen dieser Arbeit nicht auf alle Kunststoffvariationen zwingend übertragen werden kann.

7 Ansatz

Das Prinzip zum Dosieren von Kunststoffen basiert auf der Idee, Kunststoff zu verflüssigen und diese Kunststoffschmelze, oder allgemein ein Fluid, mit einem konstanten Druck oberhalb des Umgebungsdrucks zu beaufschlagen und in ein Fluidreservoir zu fördern. Das Fluidreservoir verfügt über einen Einlass, über den das Fluidreservoir gespeist werden kann. Darüberhinaus verfügt das Fluidreservoir über eine Austrittsöffnung, über die die Dosierung erfolgt. Die Austrittsöffnung ist durch einen kleinen Durchmesser gekennzeichnet und wird im Folgenden auch als Düse bezeichnet.

Bei unbehinderter Austrittsöffnung führt die Differenz zwischen dem Druck des Fluids am Einlass des Fluidreservoirs und dem Umgebungsdruck dazu, dass das Fluid aus der Austrittsöffnung strömt. Dies beruht auf dem Bestreben eines Fluids, den Zustand geringstmöglicher Energie anzunehmen, also entlang eines Druckgefälles in Richtung des geringeren Drucks zu fließen.

Die Austrittsöffnung kann über ein Ventil geschlossen werden. Im geschlossenen Zustand existiert kein Druckgefälle innerhalb der gültigen Systemgrenzen zwischen dem Ventil und der Austrittsöffnung und somit findet auch kein Ausfließen des Fluids statt.

Ein Wechsel zwischen geöffneter und geschlossener Austrittsöffnung stellt ein Schalten eines Druckgefälles dar. Ein zeitlich gesteuertes Schalten dieses Druckgefälles führt demnach zu einem zeitlich gesteuerten Flüssigkeitsaustritt und damit zu einer Dosierung. Das Schalten von Druckgefällen wird im Rahmen dieser Arbeit mit einem Dosiersystem bzw. Austragskopf realisiert. Die wesentlichen Komponenten sind dabei

- das **Fluidreservoir** (auch als *Halter* oder *Halterung* bezeichnet),
- die **Austrittsöffnung** (auch als *Düse* bezeichnet) und
- das **Ventil** (realisiert über ein aktuiertes *flexibles Element*).

Die Düse und das flexible Element sind wie in Abbildung 7.1 angedeutet im Halter gelagert. Zwischen dem unteren Ende des flexiblen Elements und der Düse besteht in der Einbausituation ein Spalt.

Durch Zufuhr von Flüssigkeit in das Fluidreservoir und Beaufschlagung durch Druck p wird das flexible Element wie in Abbildung 7.2 verformt. Dabei vergrößert sich der Spalt zwischen dem Ende des flexiblen Elements und der Düse und Flüssigkeit kann aufgrund des Druckgefälles hin zum Umgebungsdruck p_0 austreten.

Wird das flexible Element durch eine externe Kraft in die entgegengesetzte Richtung verformt, bis ein Kontakt zwischen dem Ende des flexiblen Elements und der Düse herrscht, wie in Abbildung 7.3 skizziert, tritt keine Flüssigkeit mehr aus. Zur Verformung des flexiblen Elements wird ein piezoelektrischer Aktor (auch Piezoaktor oder Piezo) verwendet.

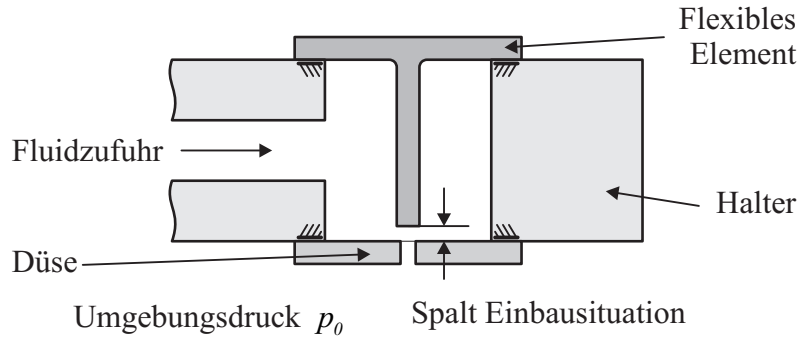


Abbildung 7.1: Prinzip des Dosiersystems im Einbauzustand: es besteht ein Spalt zwischen der Düse und dem unteren Ende des flexiblen Elements.

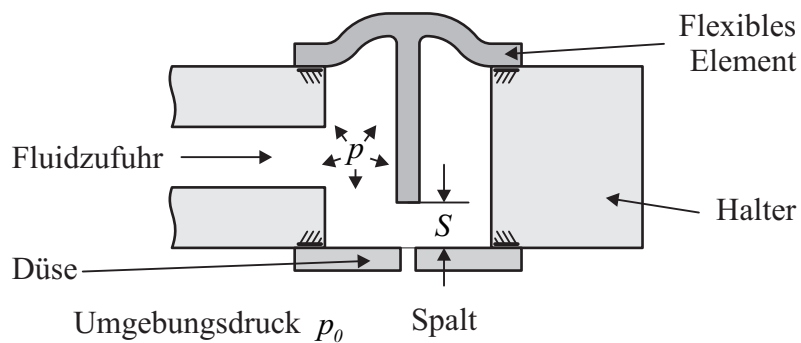


Abbildung 7.2: Prinzip des Dosiersystems im geöffneten Zustand: die Zufuhr von Flüssigkeit unter Druck führt zu einer Deformation des flexiblen Elements, einer Vergrößerung des Spalts und dem Austritt von Flüssigkeit.

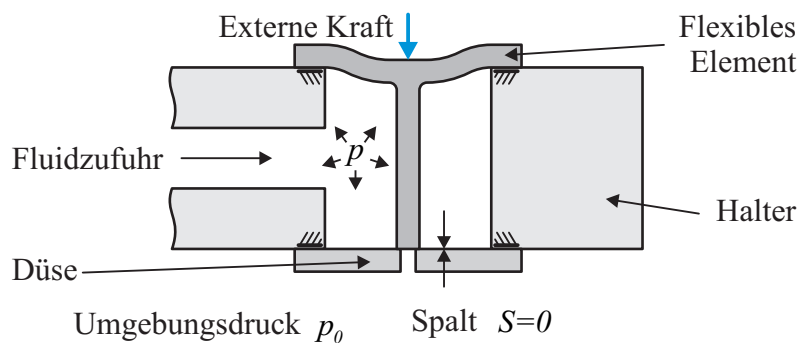


Abbildung 7.3: Prinzip des Dosiersystems im geschlossenen Zustand: durch Aufbringen einer externen Kraft wird das flexible Element ausgelenkt, bis kein Spalt mehr existiert und keine Flüssigkeit mehr austritt.

Bei dem Piezoaktor handelt es sich um einen Stapelaktor, der in einer gesonderten Konstruktion gelagert ist und darüber mit der Halterung verbunden wird. Wird keine externe Kraft mehr durch den Piezoaktor aufgebracht, so geht das flexible Element in seine vorherige Position (vgl. Abbildung 7.1) zurück und der Spalt zwischen dem Ende des flexiblen Elements und der Düse vergrößert sich somit wieder.

Der Wechsel zwischen geöffneter und geschlossener Austrittsöffnung wird somit über den Piezoaktor gesteuert. Für das Dosiersystem wird der Aufbau aus Halterung, Düse und flexiblem Element wie in Abbildung 7.4 gezeigt, um einen Piezotopf (Lagerung für den Piezoaktor), den Piezoaktor selbst und eine Kraftmessdose erweitert.

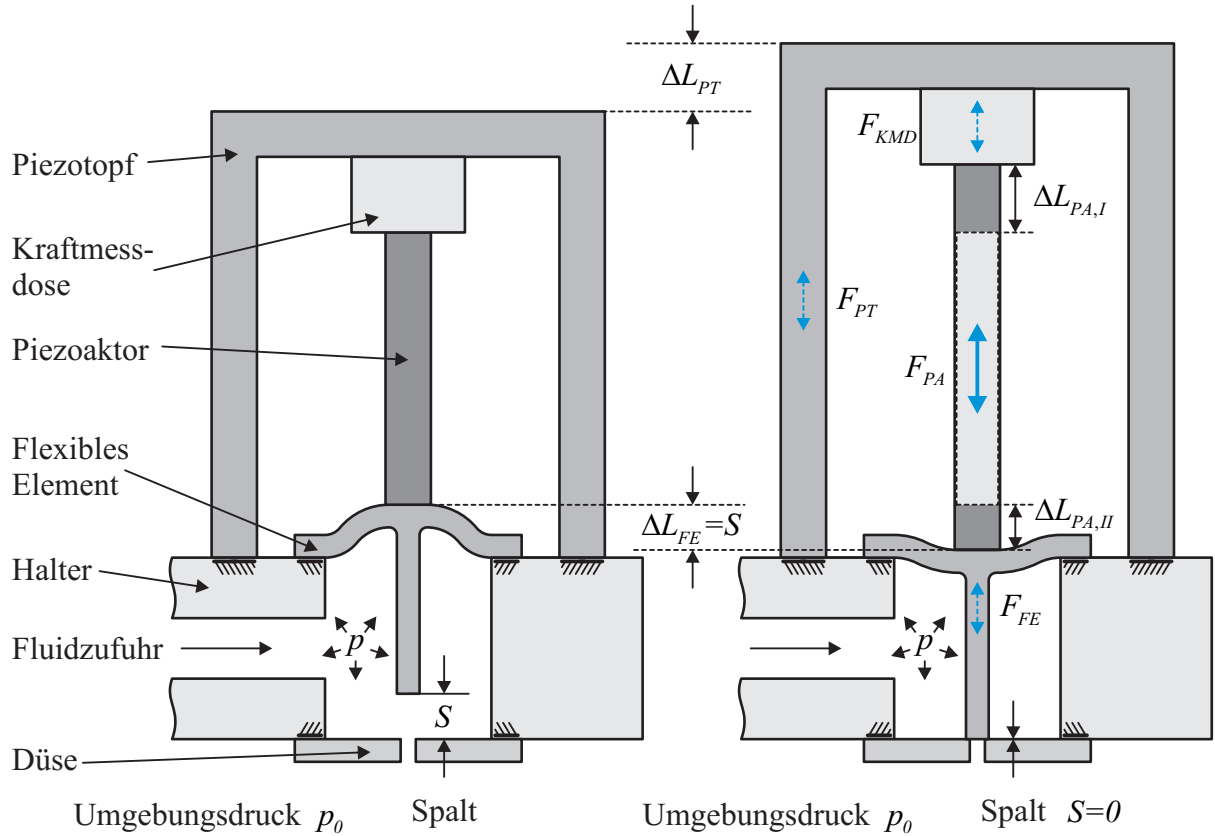


Abbildung 7.4: Prinzip des Dosiersystems im geöffneten und geschlossenen Zustand. Ausgehend vom unbelasteten Fall (links) ruft die externe Kraft und der Hub des Piezoaktors im belasteten Fall (rechts) eine Auslenkung des flexiblen Elements hervor, bis die Austrittsöffnung geschlossen ist.

Wird der Piezoaktor betätigt, also der piezoelektrische Aktor mit elektrischer Spannung versorgt, führt dies zu einer Längenänderung des Piezoaktors ΔL_{PA} begleitet von der Erzeugung der Kraft F_{PA} . Die Komponenten Kraftmessdose, Piezoaktor und das flexible Element sind in Reihe geschaltet und daher sind die wirkenden Kräfte in der Kraftmessdose F_{KMD} und im flexiblen Element F_{FE} identisch. Durch Freischneiden des Systems ist ersichtlich, dass ebenso die Kraft im Piezotopf F_{PT} gleich sein muss und es gilt:

$$F_{PA} = F_{KMD} = F_{FE} = F_{PT} \quad (7.1)$$

Wie in Abbildung 7.4 angedeutet, teilt sich der Hub des Piezoaktors auf verschiedene Komponenten auf. Betrachtet man die Lagerung des Piezotopfes und des flexiblen Elements als ortsfest und vernachlässigt die Längenänderungen des Halter und der Kraftmessdose gemäß

$$\Delta L_{Halter} \approx 0 \quad ; \quad \Delta L_{KMD} \approx 0 \quad , \quad (7.2)$$

können die relevanten Längenänderungen im Dosiersystem bestimmt werden:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_{PA} &= \Delta L_{PA,I} + \Delta L_{PA,II} \\ \Delta L_{PT} &= \Delta L_{PA,I} \\ \Delta L_{FE} &= S = \Delta L_{PA,II} \end{aligned} \right\} \Delta L_{FE} = \Delta L_{PA} - \Delta L_{PT} \quad (7.3)$$

Die Längenänderung des flexiblen Elements ist dabei durch eine Durchbiegung charakterisiert, während die Längenänderung des Piezotopfes aufgrund von Zug bzw. Druck hervorgerufen wird. Der Hub des Piezoaktors teilt sich in die Durchbiegung des flexiblen Elements und eine Längenänderung des Piezotopfes auf. Der Hub des Piezoaktors ist somit nicht mit der Auslenkung des flexiblen Elements gleichzusetzen.

Der Zustand der Austrittsöffnung bzw. des Ventils verfügt über Zwischenstufen, die den Übergang von geöffnet zu geschlossen bzw. umgekehrt darstellen. Die Art und Weise, wie diese Zustände erreicht werden, etwa abhängig von der Geschwindigkeit, beeinflusst die Art und Weise des resultierenden Druckgefälles. Der geöffnete Zustand ist zudem abhängig vom anliegenden Druck des Fluids, da dieser Druck für die initiale Verformung des flexiblen Elements verantwortlich ist.

Der Spalt zwischen dem Ende des flexiblen Elements und der Düse charakterisiert damit den Zustand der Austrittsöffnung bzw. des Ventils. Die Größe des Spalts ist ebenfalls für den Widerstand, den das Fluid beim Ausströmen erfährt, verantwortlich. Ein kleiner Spalt stellt einen größeren Widerstand dar als ein großer Spalt. Aufgrund etwaiger hoher Temperaturen von bis zu 250 °C und hoher Prozessdrücke von bis zu 1000 bar ist eine direkte Messung des Spalts nicht ohne Weiteres möglich, zumal der Spalt durch Flüssigkeit gefüllt ist.

Für eine indirekte Bestimmung des Zustands der Austrittsöffnung bzw. des Ventils, also die indirekte Bestimmung des Spalts, können entsprechend Gleichung (7.3) die Längenänderungen des Piezoaktors und des Piezotopfes verwendet werden. Durch den Einsatz eines Piezoaktors mit integriertem Wegsensor lässt sich dessen Längenänderung ermitteln. Die Bestimmung der Längenänderung des Piezotopfes ist durch zusätzliche Sensoren, etwa Dehnmessstreifen möglich.

Eine andere Art der indirekten Bestimmung des Spalts beruht auf der Kenntnis der mechanischen Eigenschaften des flexiblen Elements. Als charakteristische mechanische Kenngröße kann die Steifigkeit des flexiblen Elements herangezogen werden. Diese Steifigkeit c_{FE} beschreibt die Auslenkung des flexiblen Elements ΔL_{FE} , die durch eine eingebrachte Kraft ΔF_{FE} hervorgerufen wird:

$$c_{FE} = \frac{\Delta F_{FE}}{\Delta L_{FE}} \quad (7.4)$$

Daraus lässt sich mit Gleichung (7.1) und Gleichung (7.3) direkt die Auslenkung des flexiblen Elements und damit der Spalt bzw. Zustand des Ventils berechnen:

$$\Delta L_{FE} = S = \frac{\Delta F_{KMD}}{c_{FE}} \quad (7.5)$$

Um diese charakteristische, mechanische Kenngröße zu ermitteln, wird das Dosiersystem ohne Flüssigkeit betrieben. Dies ermöglicht die Integration eines externen Messtasters,

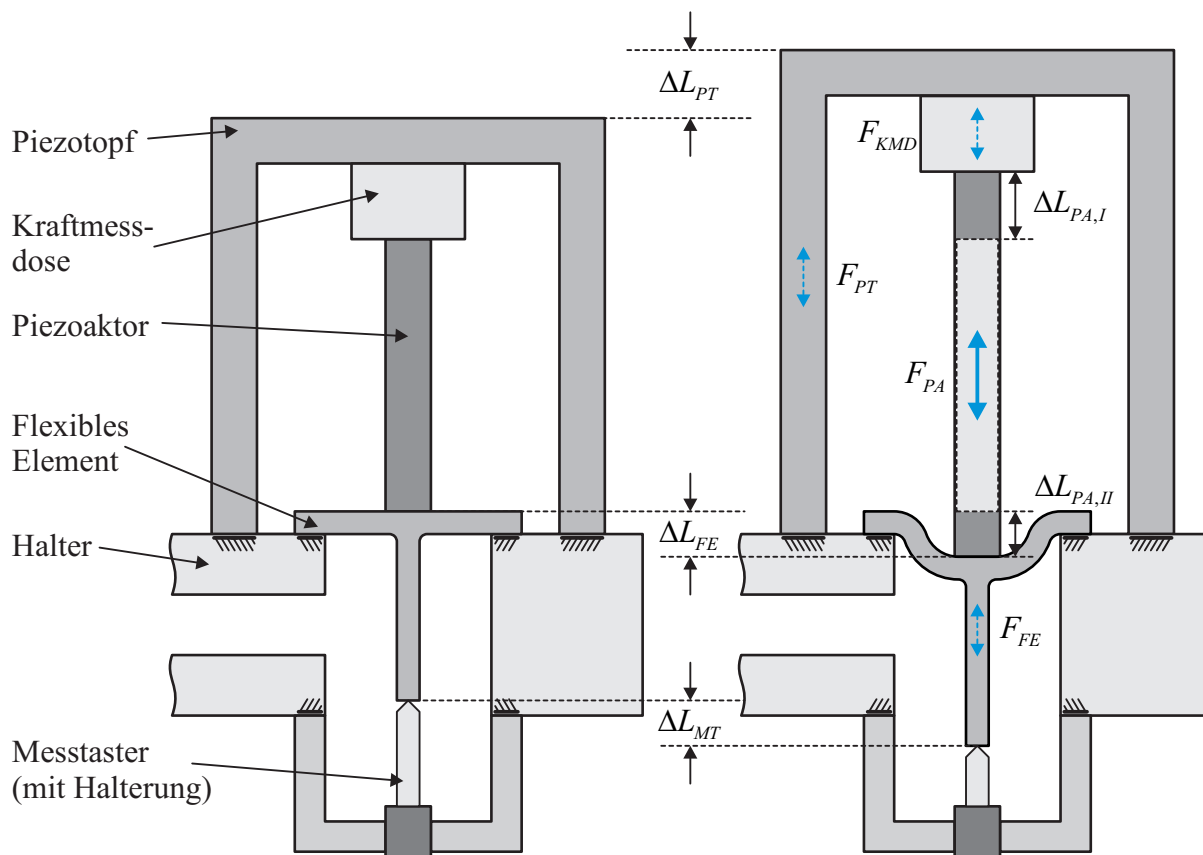


Abbildung 7.5: Prinzip zur messtechnischen Bestimmung der Steifigkeit des flexiblen Elements. Ausgehend vom unbelasteten Fall (links) ruft die externe Kraft und der Hub des Piezoaktors im belasteten Fall (rechts) eine Auslenkung des flexiblen Elements hervor. Die erzeugte Kraft wird durch eine Kraftmessdose und die resultierende Auslenkung durch einen Messtaster ermittelt.

der anstelle der Düse in das Dosiersystem montiert werden kann. Damit kann, mit der Annahme einer ortsfesten Lagerung des Messtasters und Gültigkeit von Gleichung (7.2), direkt die Auslenkung des flexiblen Elements gemessen werden.

$$c_{FE} = \frac{\Delta F_{KMD}}{\Delta L_{MT}} \quad \text{mit} \quad \Delta L_{MT} = \Delta L_{FE} \quad (7.6)$$

Das mechanische Verhalten des flexiblen Elements, insbesondere die Steifigkeit bei definierter Belastung, kann zudem über ein Modell berechnet werden. Ein erfolgreicher Abgleich von Modell und Messung ermöglicht neben der Bestimmung des Ventilzustands im eigentlichen Betrieb des Dosiersystems zudem die Auslegung des flexiblen Elements, des Piezoaktors und deren Zusammenspiel mit den Prozessparametern, wie etwa dem anliegenden Druck.

Wesentlicher Teil dieser Arbeit ist der Abgleich von realen Messungen der Steifigkeit mit einem analytischen Modell. Hierfür wird durch die Konstruktion des eigentlichen Dosiersystems die Basis gelegt. Die Konstruktion ermöglicht die Integration verschiedener Messmittel, ohne das Konstruktionsprinzip des Dosiersystems zu variieren. Die Konstruktion muss neben der Auslegung hinsichtlich der auftretenden Belastungen einen Beitrag

zur Validität der Messung leisten, also sicherstellen, die zu messende Größe tatsächlich zu messen. Erst damit ist eine sinnvolle Interpretation und Nutzen der Messung gegeben. Das analytische Modell beinhaltet die Randbedingungen aus dem Dosiersystem und ermöglicht die Variation der Geometrie des flexiblen Elements sowie die Größe und Art der Lasteinleitung in das flexible Element. Ein solches analytisches Modell bietet zudem die Möglichkeit, weitere, evtl. zukünftig relevante, Kenngrößen zu ermitteln. Ist die Gültigkeit des analytischen Modells durch Messungen bestätigt, kann dies zur Auslegung des flexiblen Elements verwendet werden und auf weitere Modelle, etwa aufwendige numerische Methoden wie finite Element Analysen, verzichtet werden.

Der Abgleich von Modell und Messung erfolgt anhand der Untersuchung verschiedener Lastfälle mit Variation der Geometrie des flexiblen Elements. Die Abbildung variabler Eigenschaften des flexiblen Elements innerhalb des Modells und deren Auswirkung auf die Steifigkeit des flexiblen Elements stellt im Sinne der VDI Richtlinie 3633 [73] die Simulation der Steifigkeit dar.

Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Voraussetzung zur Übertragung der Erkenntnisse auf die Wirklichkeit ist eine korrekte Modellbildung, wobei für ein Modell entsprechend der VDI Richtlinie 3633 [73] gilt:

Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.

Im Sinne der VDI Richtlinie 3633 [73] gleicht die Messung der Durchführung von Experimenten, bei denen als Input bzw. Eingangsgröße die Belastung auf das flexible Element und als Output bzw. Ausgangsgröße die resultierende Auslenkung des flexiblen Elements als Reaktion des Systems ermittelt wird.

Wissenschaftliches Experiment: Es wird ein Input festgelegt, auf den das zu untersuchende System reagiert, was sich durch einen beobachtbaren Output bemerkbar macht. Aus dem Verhältnis von Input zu Output läßt sich auf das interne Verhalten des Systems schließen.

8 Aufbau des Dosiersystems

Eines der zentralen Funktionselemente des gesamten Dosiersystems stellt wie beschrieben das Ventil mit den Kernkomponenten Düse und flexibles Element dar, die beide im zentralen Halter gelagert sind. Die Aktuierung des flexiblen Elements erfolgt über einen piezoelektrischen Aktor, der in einer gesonderten Konstruktion, dem Piezotopf, gelagert ist. Das komplette Dosiersystem kann an eine Fluidzufuhr, etwa eine Pumpe oder eine Plastifiziereinheit, montiert werden und besteht daher wie schematisch in Abbildung 8.1 dargestellt aus den drei Baugruppen,

- dem **Halter** als zentrale Aufnahme für das *flexible Element* und die *Düse*,
- dem **Piezotopf**, montiert an den Halter, mit integriertem *Piezoaktor* und *Kraftmessdose* und
- dem **Adapter** als Schnittstelle zur Fluidzufuhr.

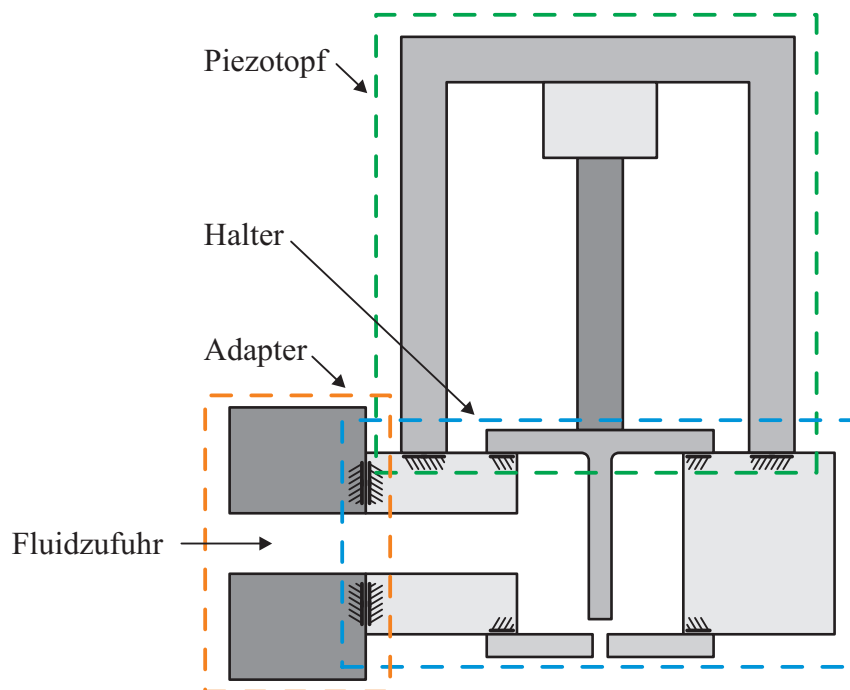


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten des Dosiersystems.

Die Konstruktion der einzelnen Baugruppen mit den jeweiligen Teilkomponenten wird im folgenden kurz vorgestellt. Sofern nicht anders angegeben, bestehen die Komponenten aus handelsüblichem Stahl und wurden in der Feinmechanik Werkstatt des Lehrstuhls MiMed gefertigt.

8.1 Konstruktion des Halters

Die beiden Hauptfunktionselemente zur Realisierung des Ventils stellen das flexible Element und die Düse dar. Zentrale Aufgabe des Halters ist die Aufnahme dieser beiden Elemente. Neben der zentrierten Lagerung beider Elemente zueinander und deren Fixierung im Halter spielt die Möglichkeit einer zentrierten Krafteinleitung durch den Piezoaktor in das flexible Element eine entscheidende Rolle.

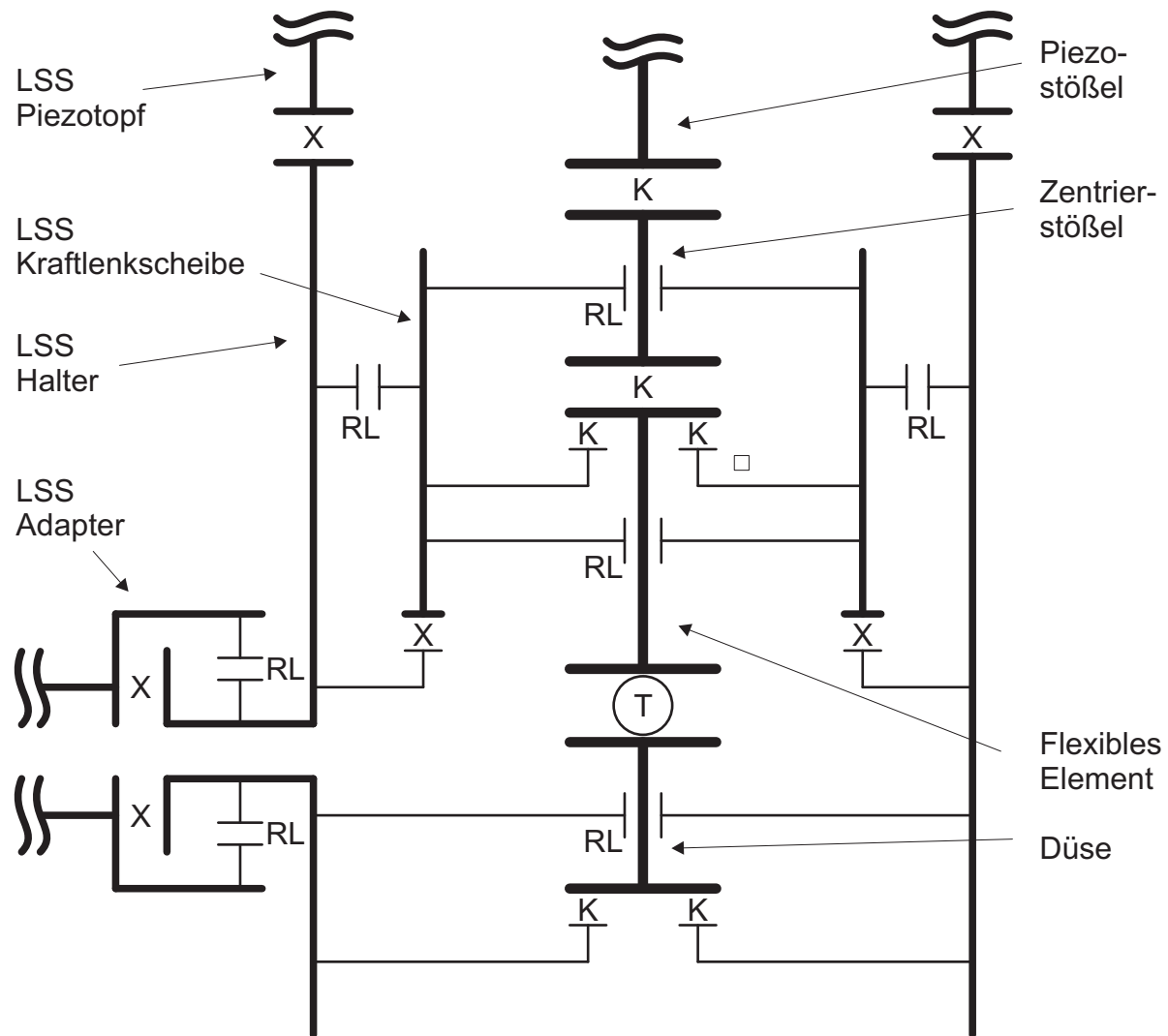


Abbildung 8.2: Konstruktionsprinzip des Halters mit relevanten Leitstützstrukturen (LSS) und Wirkflächenpaaren (WFP) als Radiallager (RL), Klemmungen (K) und Verschraubungen (X).

In Anlehnung an das Konzept von Wirkflächen und Wirkflächenpaaren (Contact and Channel Model, C&CM) [42] wurde das in Abbildung 8.2 dargestellte Konstruktionsprinzip entwickelt und daraus die Konstruktion aus Abbildung 8.3 generiert. In den Halter als zentrale Leitstützstruktur (LSS) ist eine Kraftlenkscheibe als weitere Leitstützstruktur integriert und bildet mit ihr über Radiallager (RL) ein Wirkflächenpaar (WFP). Über weitere Radiallager und Klemmungen (K), letztendlich realisiert durch Schraubverbindungen (X), sind die einzelnen Komponenten miteinander verbunden und ermöglichen so

den Austausch von Stoff, Energie und Information im Sinne des Systemmodells der Konstruktion [12]. Zwischen flexiblem Element und Düse wird durch die Kraftübertragung des Piezoaktors ein zeitlich abhängiges Wirkflächenpaar (T) erzeugt.

Beide Funktionselemente, das flexible Element und die Düse, sind im Halter über Passungen zentriert und somit auch zentriert zueinander gelagert. Bei den Passungen handelt es sich um Spielpassungen der Toleranzklasse H7/g6 gemäß den bekannten ISO Toleranzen [9], bei denen die Bohrungen im Halter in einer Aufspannung durch einen Drehprozess gefertigt werden und die jeweiligen Wellen daran angepasst werden. Während die Düse mittels einer Düsenklemmplatte axial fixiert wird, ist das flexible Element in einem Träger gelagert. Dieser Träger wiederum ist im Halter über eine Passung zentriert und dient der einfachen Variation der Geometrie des flexiblen Elements. Durch Austausch des Trägers unter Beibehaltung des Außendurchmessers und Variation des Innendurchmessers können so einfach flexible Elemente unterschiedlichen Durchmessers verwendet werden, ohne den gesamten Halter anzupassen.

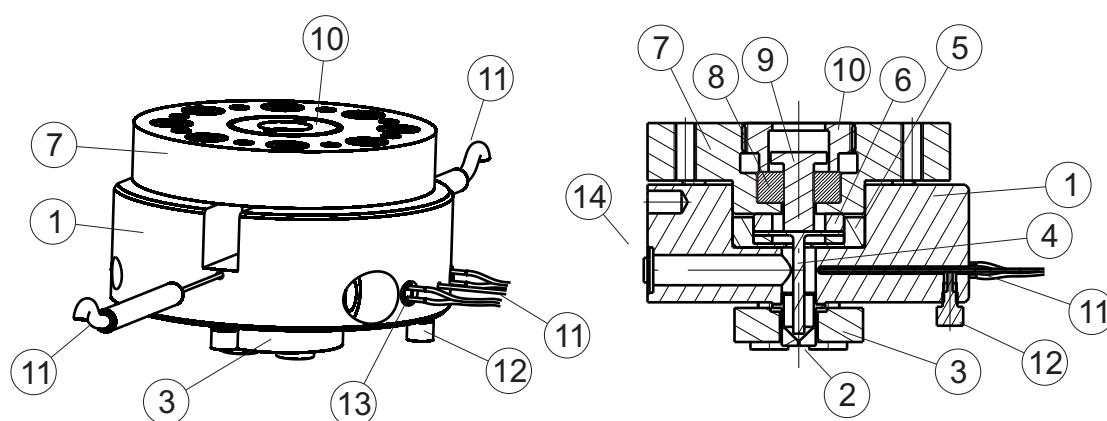


Abbildung 8.3: Konstruktion des Halters in isometrischer Darstellung und Schnittdarstellung mit Halter (1) zur Lagerung der Düse (2), montiert über eine Düsenklemmplatte (3) und Aufnahme für das flexible Element (4), gelagert in einem Träger (5) mit Klemmscheiben (6). Axiale Fixierung über eine Kraftlenkscheibe (7), in der über eine Gleitlagerbuchse aus Graphit (8) ein Zentrierstößel (9) geführt wird und mit einem Deckel (10) gesichert wird. Temperatursensoren (11) mit Fixierungsschrauben (12) zur Temperaturüberwachung bei Aufheizung durch Heizpatronen (13). Über die Schnittstelle (14) wird der Halter an die Fluidzufuhr angebunden.

Klemmrings unterhalb und oberhalb des flexiblen Elements erlauben durch Dicken- und Durchmesseranpassung zudem Dicken- und Lagervariationen des flexiblen Elements. Das flexible Element wird axial über die Kraftlenkscheibe fixiert. Darin ist eine Gleitlagerbuchse aus Graphit über einen Zylinderpressverband integriert. Im Zusammenspiel mit einem Zentrierstößel ermöglicht dieses Gleitlager eine zentrierte Krafteinleitung in das flexible Element. Der optionale Deckel dient der Sicherung gegen Herausfallen des Zentrierstößels bei Montage und Demontage des Systems. In den Halter sind zudem Heizelemente und Temperatursensoren integriert, die den Betrieb des Dosiersystems bei erhöhten Temperaturen ermöglichen.

Das flexible Element besteht aus einer biegeweichen Platte mit einem einseitig ausgeprägten Stößel. Als einfaches Drehteil aus Federstahl sind dabei Dicken- und Durchmesseranpassungen möglich. Die Austrittsdüse verfügt über eine Querschnittsverengung vor

dem eigentlichen Düsenkanal, der mit Mikrobohrern oder durch Laserablation hergestellt werden kann und Durchmesser im Bereich von 50 μm bis 250 μm aufweist. Die Dimensionierung der relevanten Bauteile ist an die Anforderungen hinsichtlich Temperaturen von bis zu 400 °C und Drücken von bis zu 1000 bar entsprechend bekannter Konstruktionsrichtlinien [4, 78] angepasst. Der Halter stellt gleichzeitig die Schnittstelle zu den weiteren Baugruppen, dem Piezotopf und dem Adapter zur Fluidzufuhr, dar.

Details zur Konstruktion, deren Methodik und Auslegung und der letztlich umgesetzten Konstruktion sind in Publikationen [21, 22, 23, 51, 52, 54, 53] und den im Rahmen dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeiten zu finden [35, 38, 39, 79].

8.2 Konstruktion des Piezotopfs

Für die Aktuierung des flexiblen Elements wird ein piezoelektrischer Aktor eingesetzt. Die Hauptfunktion des Piezotopfes ist die Lagerung des Piezoaktors, so dass dessen Kraft auf das flexible Element übertragen werden kann. Diese Kraft wird mit einer Kraftmessdose vom Typ 9311B der Firma Kistler Instrumente GmbH gemessen, die koaxial zum Piezoaktor angeordnet ist. Zum Ausgleich von Fertigungstoleranzen wird der Piezoaktor über eine Vorspannschraube axial vorgespannt und ermöglicht so eine direkte Kraftübertragung auf das flexible Element. Zur Montage der Kabelführungen der Spannungsversorgung von Piezoaktor und Kraftmessdose ist der Piezotopf in zwei Leitstützstrukturen aufgeteilt. In Abbildung 8.4 ist das entwickelte Konstruktionsprinzip C&CM skizziert, das als Basis für die Ausgestaltung der Konstruktion dient.

Der verschleißfreie, hochfrequente Betrieb von Piezoaktoren mit relativ großen Stellkräften stellt gegenüber anderen Aktoren wie etwa Hydraulikaktoren einen Vorteil dar. Durch die Verwendung von Stapelaktoren kann der vergleichsweise geringe Hub eines Piezoaktors deutlich vergrößert werden. Im Rahmen dieser Arbeit kommt ein Piezoaktor vom Typ P-845.60 der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG mit einem maximalen Hub von etwa 90 μm zum Einsatz und kann dabei eine Kraft von etwa 3 kN erzeugen. Der Piezoaktor verfügt zudem über einen integrierten Wegsensor und kann weggeregelt betrieben werden. Allerdings unterliegt der Betrieb von Piezoaktoren gewissen Einschränkungen hinsichtlich der zulässigen Temperatur. Zudem muss aufgrund der spröden Eigenschaften von Piezokeramiken eine torsionsfreie Krafteinleitung sichergestellt werden. Daher ist der Piezoaktor im Piezotopf durch eine interne Zentrierung bezüglich einer Vorspannschraube gelagert und gegen Verdrehung aufgrund von Reibung beim Anziehen der Vorspannschraube über ein Axiallager mit einer Verdrehsicherung gesichert. Die Kraftmessdose ist über axial flach aufliegende Flächen über Verbindungselemente verschraubt und über die Verbindungselemente durch radiale Lagerungen mit der Verdrehsicherung und dem Piezoaktor verbunden. Am unteren Ende des Piezoaktors wird dieser durch einen Piezozentriererring im Halter radial gelagert. Sämtliche radiale Lagerungen sind durch Spielpassungen der Toleranzklasse H7/g6 realisiert. Zur Kraftübertragung vom Piezoaktor in den Zentrierstößel wird ein Piezostößel verwendet, der auf den Piezoaktor aufgeschraubt ist.

Um sicherzustellen, den Piezoaktor stets im zulässigen Temperaturbereich von maximal 150 °C zu betreiben, wird dieser zum einen intern und extern durch Spülluft gekühlt, zum andern durch aktiv gekühlte Wärmeentkopplungselemente aus Glaskeramik vom Halter, der Temperaturen von bis zu 400 °C annehmen kann, isoliert. Die Temperatur des Piezoaktors wird über einen integrierten Sensor überwacht.

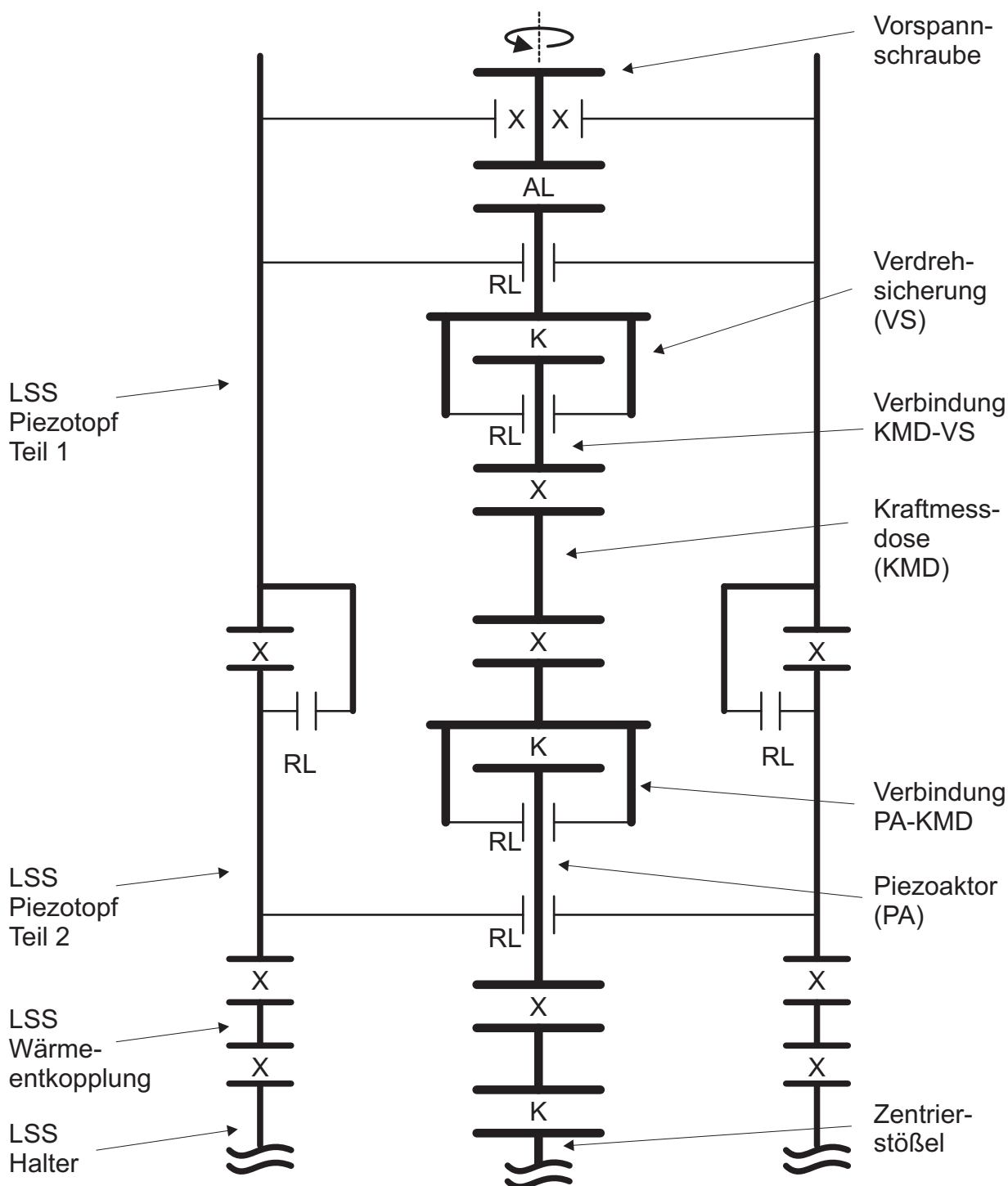


Abbildung 8.4: Konstruktionsprinzip des Piezotopfs mit relevanten Leitstützstrukturen (LSS) und Wirkflächenpaaren (WFP) als Radiallager (RL), Axiallager (AL) und Verschraubungen (X).

Zur Montage des Piezotopfes an den Halter sowie der einzelnen Piezotöpfe zueinander dienen gängige Zylinderkopfschrauben erhöhter Zugfestigkeit. Die auf Basis des Konstruktionsprinzips aus Abbildung 8.4 entwickelte und umgesetzte Konstruktion ist in Abbildung 8.5 dargestellt.

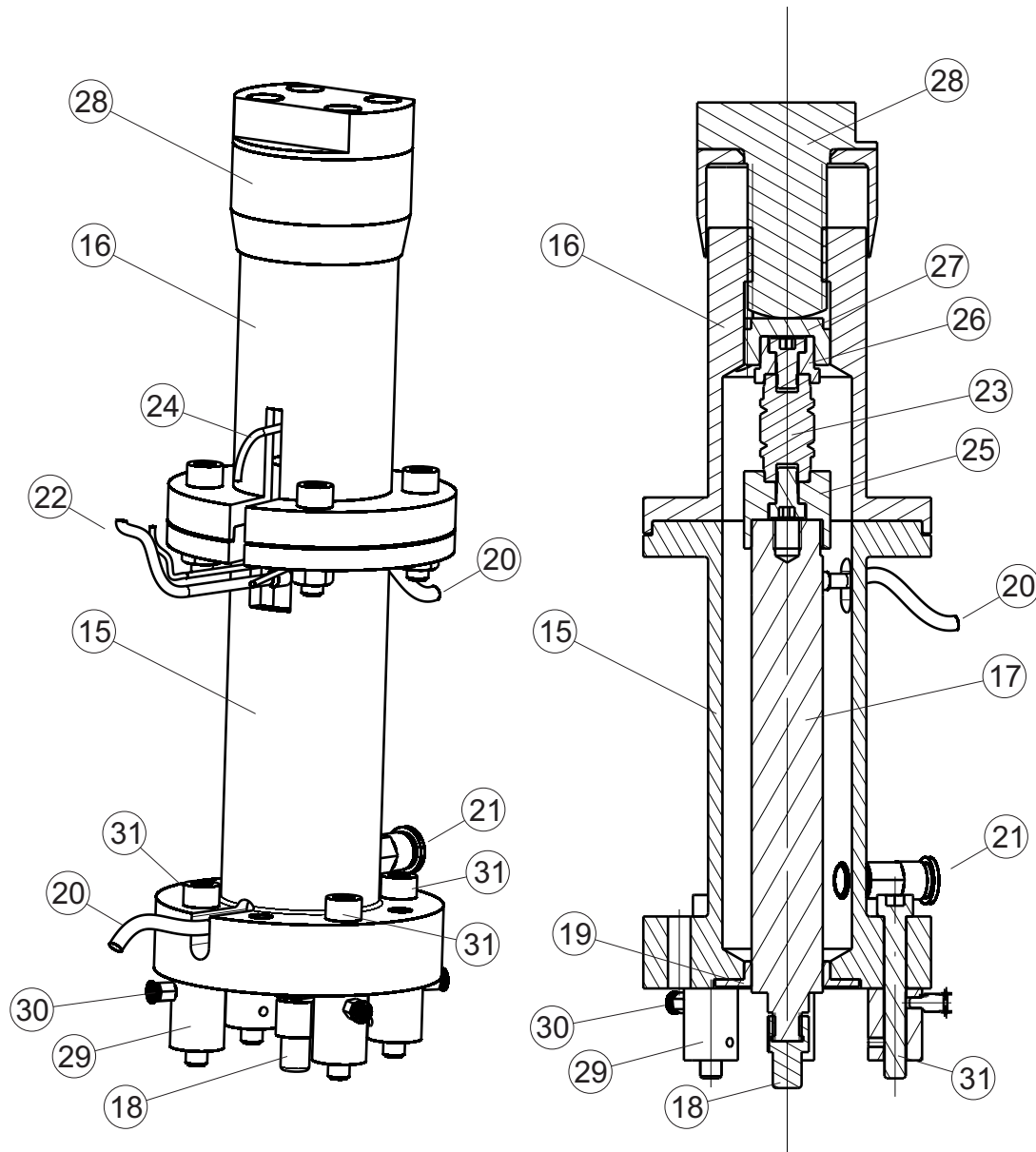


Abbildung 8.5: Konstruktion des Piezopotfs in isometrischer Darstellung und Schnittdarstellung mit unterem Piezopotf (15) oberem Piezopotf (16) zur Lagerung des Piezoaktors (17) mit Piezostößel (18) zur Kraftübertragung in den Zentrierstößel. Piezozentrierung (19) zur unteren radialen Lagerung des Piezoaktors, Druckluftanschlüsse für interne Spülluft (20) und externe Spülluft (21) zur Kühlung des Piezoaktors sowie elektrische Kontaktierungen (22). Kraftmessdose (23) mit elektrischer Kontaktierung (24) mit Verbindung zum Piezoaktor (25) und Verbindung zur Verdrehsicherung (26). Die Verdrehsicherung (27) verhindert die Rotation des Piezoaktors beim Anziehen der Vorspannschraube (28). Zur Wärmeentkopplung des Piezopotfs werden Keramikzylinder (29) mit Druckluftanschlüssen (30) zur aktiven Kühlung verwendet. Der Piezopotf wird über Verbindungsschrauben (31) an den Halter montiert.

Details zur Konstruktion, deren Methodik und Auslegung und der letztlich umgesetzten Konstruktion sind in Publikationen [51, 53] und den im Rahmen dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeiten zu finden [29, 34, 43].

8.3 Konstruktion des Adapters

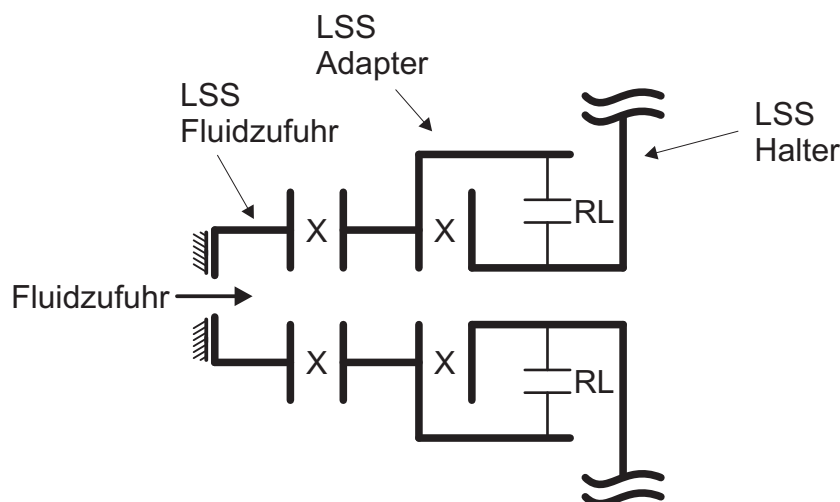


Abbildung 8.6: Konstruktionsprinzip des Adapters mit relevanten Leitstützstrukturen (LSS) und Wirkflächenpaaren (WFP) als Radiallager (RL) und Verschraubungen (X).

Die einfachste Baugruppe des gesamten Dosiersystems stellt der Adapter an eine Fluidzufuhr dar. Dies kann entweder ein direkter Anschluss an eine Platifiziereinheit sein oder ein Anschluss an eine andere Fluidzufuhr, etwa eine Pumpe. Das Konstruktionsprinzip ändert sich dabei nicht. Der Halter wird, wie in Abbildung 8.6 angedeutet, über die Adapterplatte montiert und diese Adapterplatte wiederum mit der jeweiligen Fluidzufuhr verschraubt.

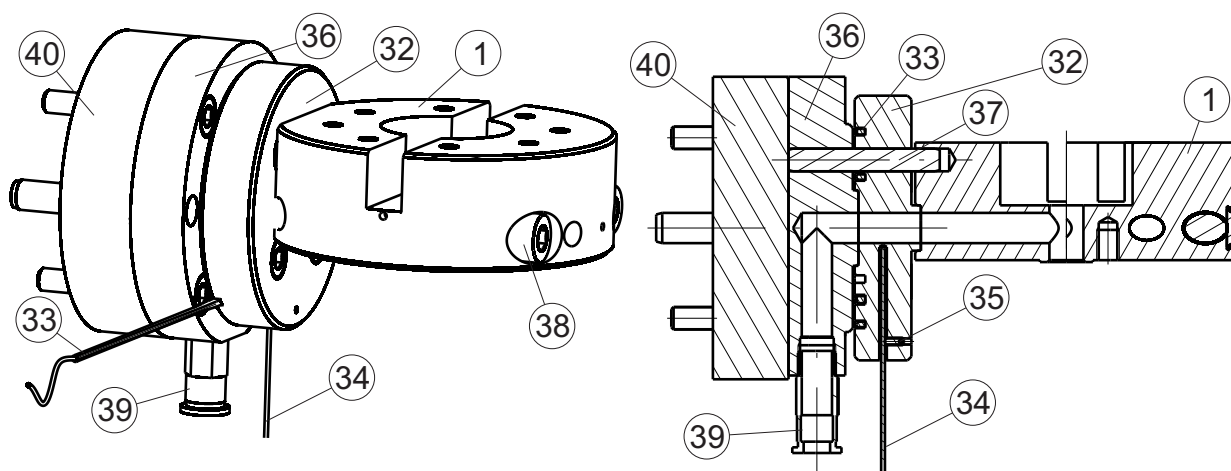


Abbildung 8.7: Konstruktion des Adapters in isometrischer Darstellung und Schnittdarstellung. Als Anschluss an den Halter (1) wird eine Adapterplatte (32) mit integrierter Heizwendel (34), zugehörigem Temperatursensor (34) und Fixierung (35) an eine Fluidzufuhr (36) über einen Zylinderstift (37) und Verbindungsschrauben (38) montiert. Die Fluidzufuhr erfolgt über den Adapter (39) und kann an einer Aufnahme (40) befestigt werden.

Anstelle der Fluidzufuhr, wie in Abbildung 8.7 angedeutet, kann das Dosiersystem direkt an eine Platifiziereinheit montiert werden.

8.4 Gesamtkonstruktion des Dosiersystems

Die beschriebenen Baugruppen Halter, Piezotopf und Adapter werden über die Schnittstellen der relevanten Leitstützstrukturen mit Schrauben verbunden und in seiner Gesamtheit lässt sich das Dosiersystem wie in Abbildung 8.8 darstellen. Durch die modularisierte

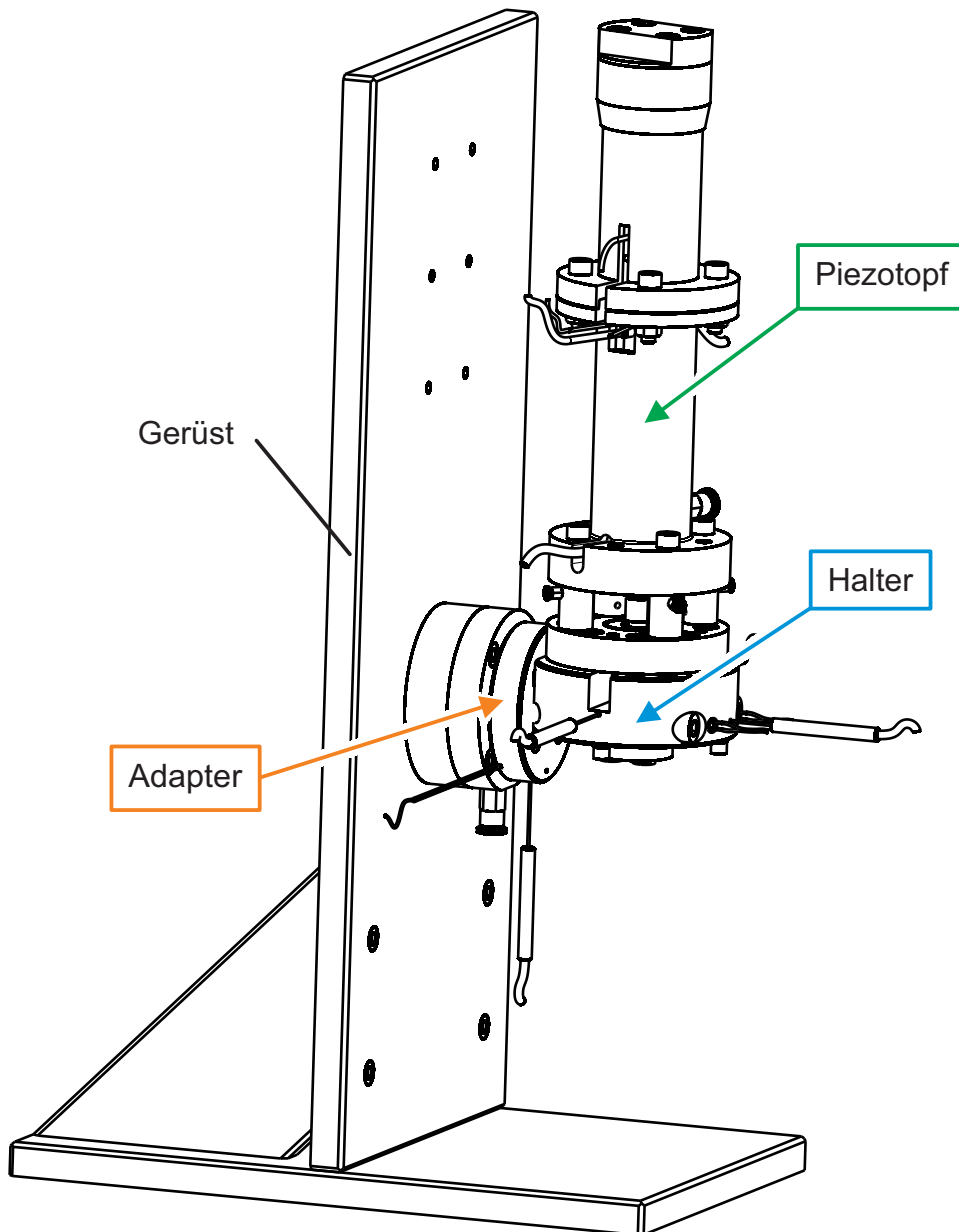


Abbildung 8.8: Konstruktion des Dosiersystems in isometrischer Darstellung aus den Hauptkomponenten Halter, Piezotopf und Adapter, montiert an ein Gerüst.

Konstruktion können verschiedene Düsen und flexible Elemente verwendet werden. Bei Nutzung eines anderen Piezoaktors oder einer anderen Kraftmessdose kann die Konstruktion durch einfache Geometrieadjustierungen der einzelnen Bauteile weiter genutzt werden, ohne das Konstruktionsprinzip ändern zu müssen.

8.5 Gesamtkonstruktion des Prüfstands

Für Untersuchungen zum mechanischen Verhalten des flexiblen Elements wird das Dosiersystem ohne Flüssigkeit betrieben. Dies ermöglicht es, auf die Düse zu verzichten und stattdessen einen Messtaster zentriert zum flexiblen Element einzubauen. Mit dem Messtaster vom Typ MT1281 der Firma DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH kann so die Auslenkung des flexiblen Elements aufgrund der Belastung durch den Piezoaktor ermittelt werden, ohne funktionsrelevante konstruktive Änderungen am Dosiersystem vorzunehmen.

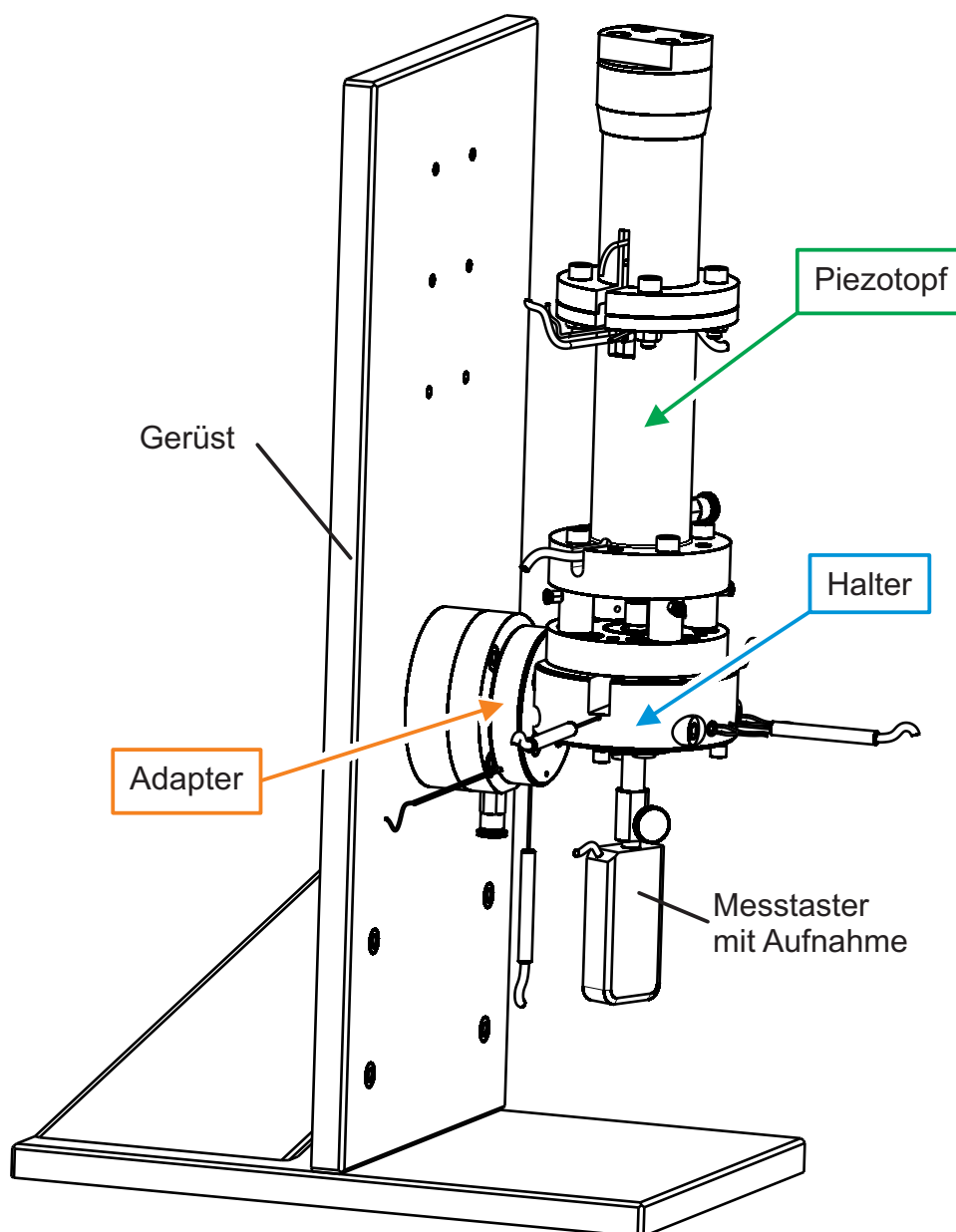


Abbildung 8.9: Konstruktion des Dosiersystems in isometrischer Darstellung aus den Hauptkomponenten Halter, Piezotopf und Adapter, montiert an ein Gerüst zur Verwendung als Prüfstand. Anstelle der Düse wird ein Messtaster zur Ermittlung der Auslenkung des flexiblen Elements verwendet.

Die Auslenkung des flexiblen Elements aufgrund des wirkenden Drucks des Fluids kann

durch Anpassung des Aufbaus erzielt werden. Durch Verschluss der Austrittsdüse mittels einer Blinddüse kann im Innern des Dosiersystems ein statischer Druck aufgebaut werden. Um die Auslenkung des flexiblen Elements aufgrund des Flüssigkeitsdrucks zu bestimmen, kann der Messtaster durch eine weitere Aufnahme anstelle des Piezotopfes montiert werden.

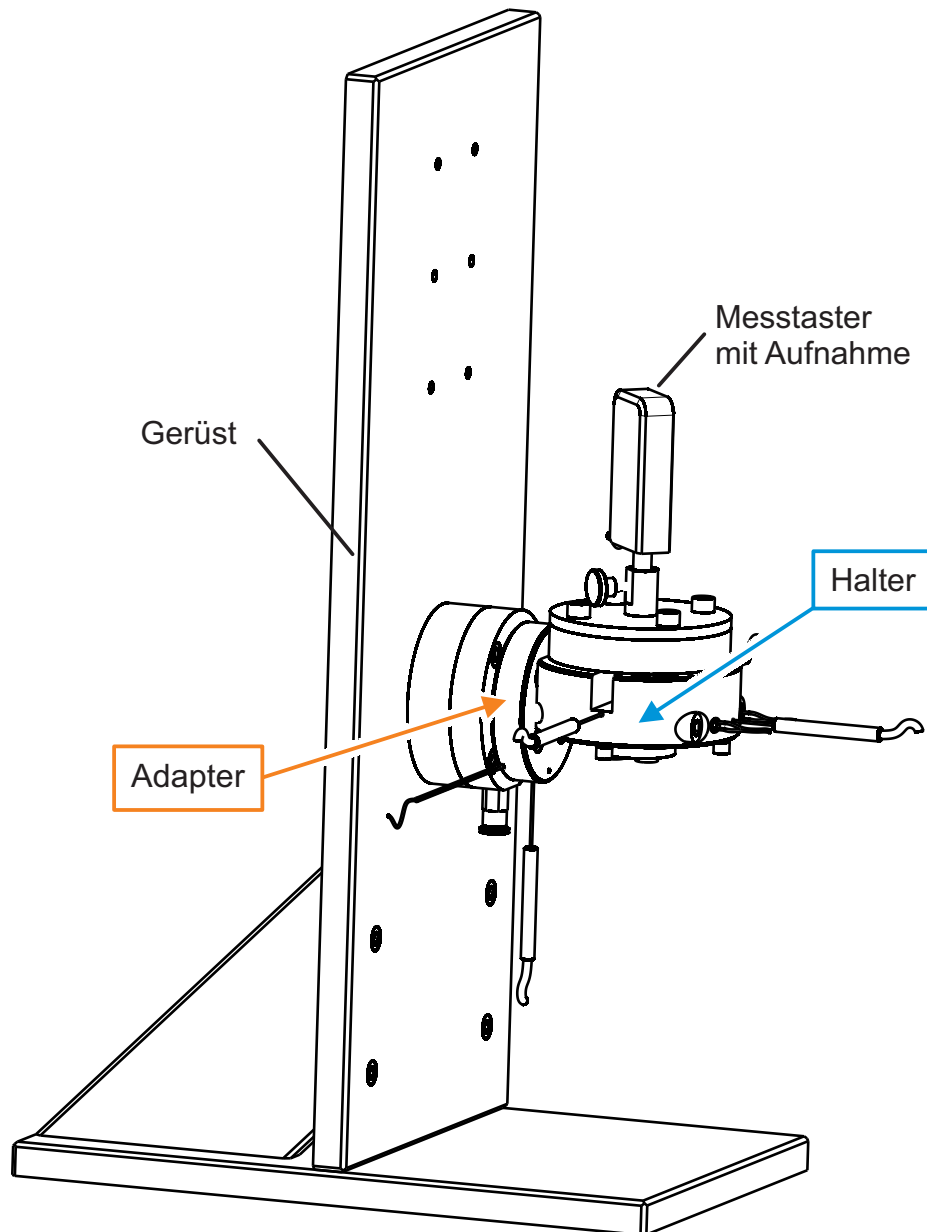


Abbildung 8.10: Konstruktion des Dosiersystems in isometrischer Darstellung aus den Hauptkomponenten Halter und Adapter, montiert an ein Gerüst zur Verwendung als Prüfstand. Anstelle der Düse wird eine Blinddüse zum Verschluss des Dosiersystems eingesetzt und anstelle des Piezotopfes ein Messtaster zur Ermittlung der Auslenkung des flexiblen Elements verwendet.

8.6 Konstruktive Umsetzung und Gesamtaufbau

Die zentrale Funktion im Dosiersystem ist die Aktuierung des flexiblen Elements, das

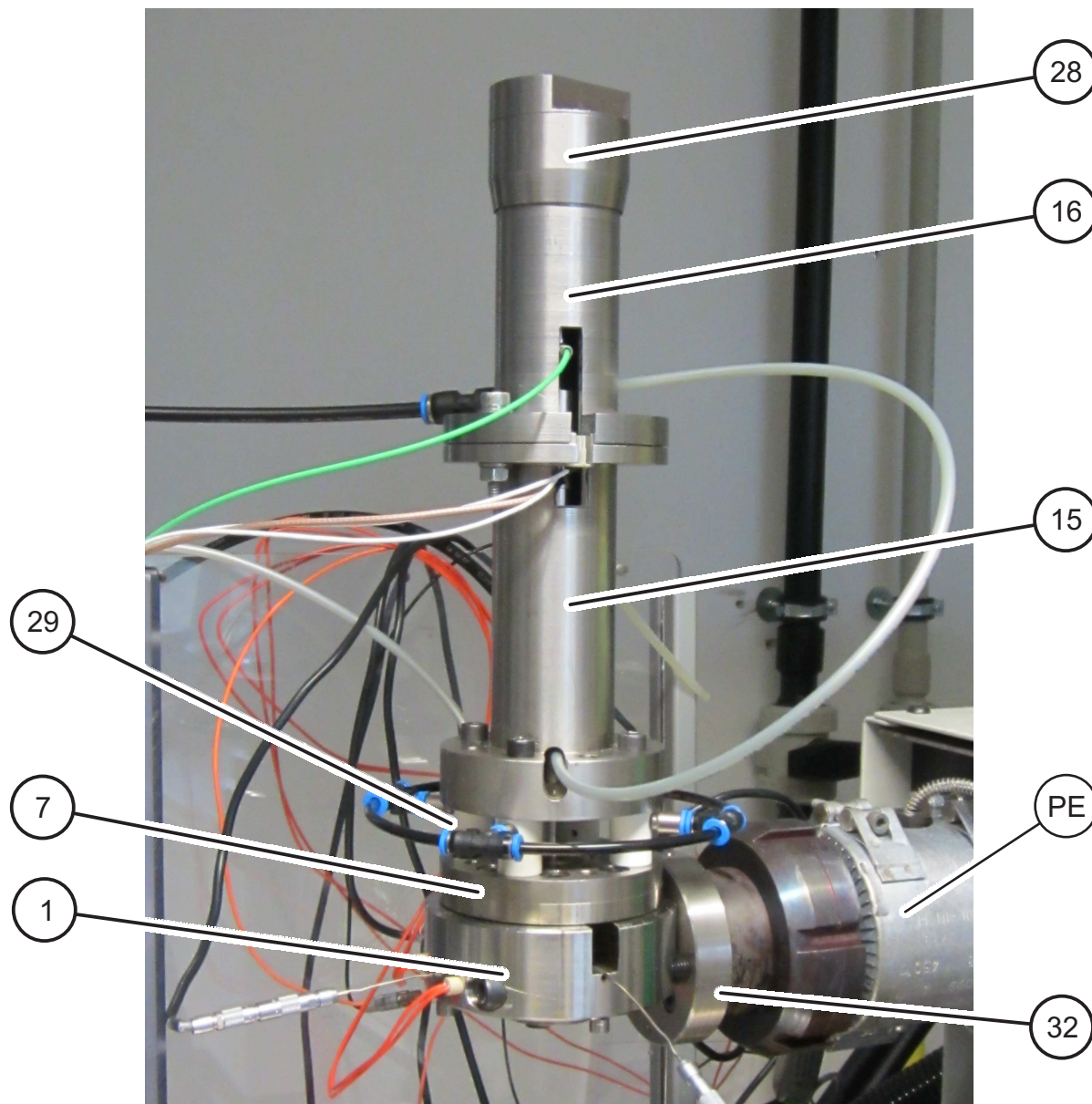


Abbildung 8.11: Konstruktive Umsetzung des Dosiersystems mit Halter (1) zur Lagerung der Düse und des flexiblen Elements mit Kraftlenkscheibe (7) mit integriertem Gleitlager und Zentrierstößel zur Übertragung der Kraft des Piezoaktors. Der Piezoaktor ist im unteren Piezotopf (15) und oberen Piezotopf (16) gelagert und kann über eine Vorspannschraube (28) vorgespannt werden. An den Piezoaktor ist über Verbindungselemente eine Kraftmessdose montiert. Die Kombination aus Piezoaktor und Kraftmessdose wird über eine Verdrehsicherung vor der Rotation und damit der Torsion durch die Vorspannschraube geschützt. Zur Wärmeentkopplung des Piezotopfs werden Keramikzylinder (29) mit Druckluftanschlüssen zur aktiven Kühlung verwendet. Über eine Adapterplatte (32) wird das Dosiersystem an eine Plastifiziereinheit (PE) montiert.

gemeinsam mit der Düse das zentrale Ventil darstellt. In diesem Sinne sind Fluidzufuhr und Temperaturkontrolle Nebenfunktionen des Dosiersystems.

Durch die Konstruktion des Halters als Drehteil können die beiden Funktionselemente, die Düse (Abbildung 8.12) und das flexible Element (Abbildung 8.13), im Rahmen der verwendeten Passungstoleranzen zentriert zueinander angeordnet werden. Für eine reproduzierbare Krafteinleitung in das flexible Element ist eine zentrierte Positionierung des Piezoaktors relativ zum flexiblen Element notwendig. Der Piezoaktor ist im Piezotopf gelagert und durch Schraubverbindungen mit dem Halter verbunden. Die daraus resultierenden radialen Abweichungen zwischen Piezoaktor und flexiblem Element werden durch den Einsatz der Kraftlenkscheibe mit einem integrierten Gleitlager aufgehoben. Damit ist eine zentrierte Krafteinleitung im Rahmen der verwendeten Passungstoleranz möglich und dies ist vor allem im Hinblick auf Messungen der Auslenkung des flexiblen Elements relevant. Dadurch kann sichergestellt werden, den gewünschten Lastfall tatsächlich in der Realität abzubilden und somit einen Beitrag zur Validität der Messung zu leisten.



Abbildung 8.12: Beispiele für Düsen. Bei gleicher Grundgeometrie kann der Düsenkanal variiert werden. Links ist eine Düse mit großem Durchmesser von 2 mm, rechts mit deutlich kleinerem Durchmesser von 100 μm zu sehen.

Zur Messung der Auslenkung des flexiblen Elements wird ein Messtaster Typ MT1281 der Firma DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH mit einer Systemgenauigkeit von $\pm 0,2 \mu\text{m}$ bei einem Messweg von 0 mm bis 12 mm verwendet. Die Messgröße wird über die Positionsanzeige ND 287 des gleichen Herstellers gewandelt und an einen Auswertecomputer übertragen.

Zur Aktuierung des flexiblen Elements wird der Piezoaktor vom Typ P-845.60 der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG verwendet, der über ein Piezokontrollmodul vom gleichen Hersteller, bestehend aus Leistungsverstärker, Positionsregelmodul und Bedieneinheit, angesteuert wird. Die Modulkomponenten sind auf den Piezoaktor abgestimmt und ermöglichen im geregelten Betrieb eine Positionsgenauigkeit von $\pm 1,8 \text{ nm}$ bei einem maximalen Stellweg von 90 μm . Die Daten des integrierten Wegsensors und des Temperatursensors im Piezoaktor können über das Piezokontrollmodul ausgelesen und ebenfalls an einen Auswertecomputer übertragen werden. Im Falle der Temperatur geschieht dies über einen gesonderten Messdatenwandler, da das Piezokontrollmodul die Temperatur lediglich zur Sicherheitsabschaltung des Piezoaktors bei kritischen Werten

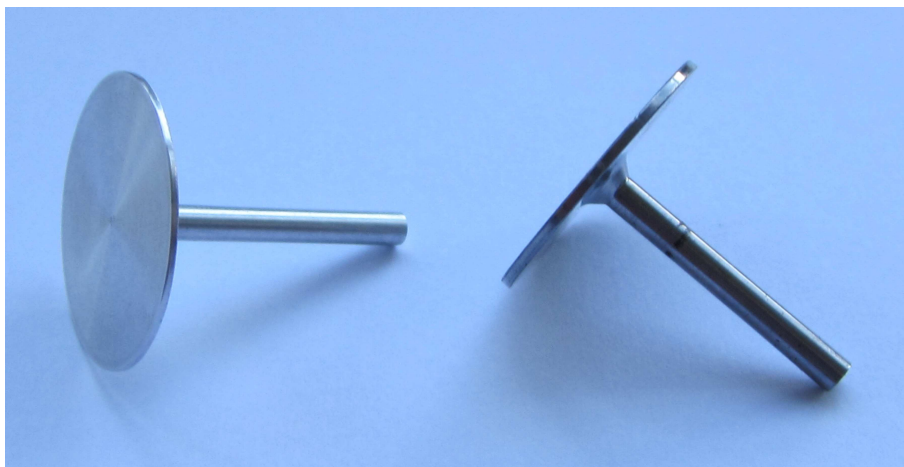


Abbildung 8.13: Beispiele für flexible Elemente. Bei gleicher Geometrie kann die Dicke der Grundplatte variiert werden. Links ist ein flexibles Element mit einer Dicke von 0,5 mm und rechts mit einer Dicke von 1 mm zu sehen.

verwendet. Zur Kühlung bzw. zum Einstellen einer konstanten Temperatur des Piezoaktors wird Kühlluft verwendet, die zunächst über verschiedene Filter in einer Druckluftaufbereitung die Druckluft aus der Hausleitung reinigt und diese dann als interne Kühlung als Spülluft ins Innere des Piezoaktors mit maximal 0,5 bar fördert. Die externe Kühlung des

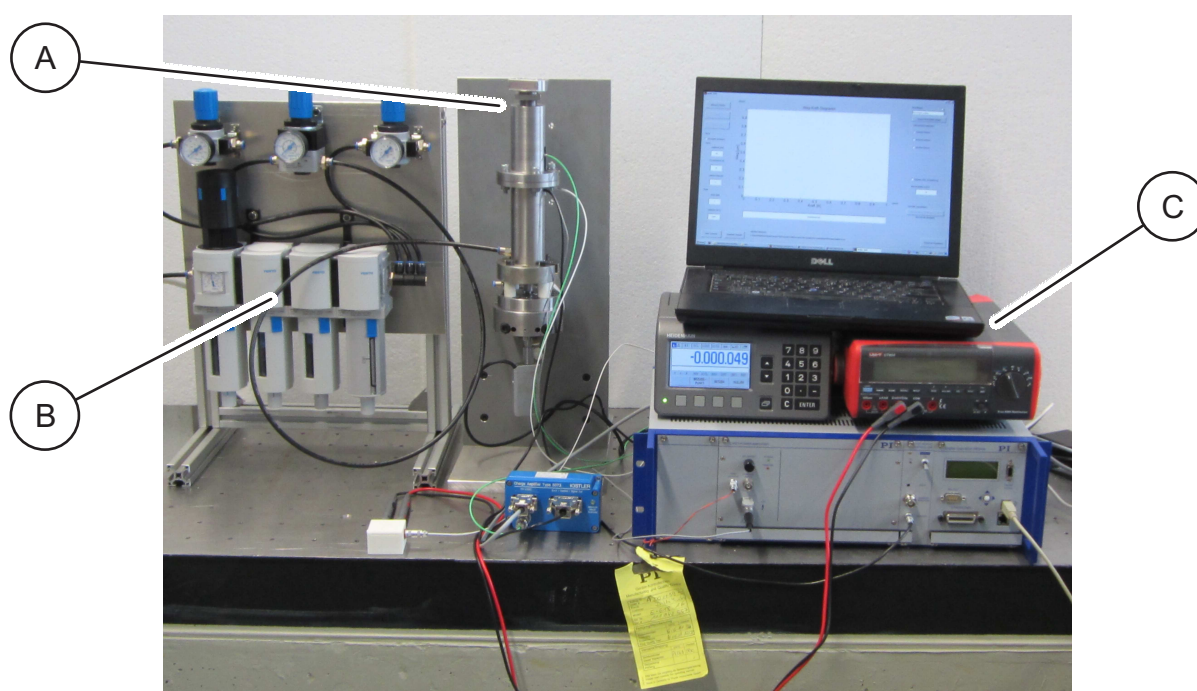


Abbildung 8.14: Aufbau des Dosiersystems in der Verwendung als Prüfstand zur Messung der Durchbiegung des flexiblen Elements. Das Dosiersystem (A) mit eingebautem Piezoaktor, Kraftmessdose und Messtaster ist an einem Gerüst befestigt. Mit der Drucklufteinheit (B) wird zur Kühlung des Piezoaktors Luft über verschiedene Filter aufbereitet und der Druck über Ventile eingestellt. Über einen Auswerterechner werden den Steuer- und Sensorkomponenten (C) Stellwerte vorgegeben bzw. Messdaten erfasst.

Piezoaktors sowie die aktive Kühlung der Wärmeentkopplungselemente werden ebenfalls über die Druckluftaufbereitung gespeist und manuell eingestellt.

Zur Erfassung der wirkenden Kraft wird eine Kraftmessdose vom Typ 9311B der Firma Kistler Instrumente GmbH mit einem Messbereich von ± 5 kN eingesetzt. Die Kraftinformation wird über den Ladeverstärker vom Typ 5073A111 des selben Herstellers mit einer resultierenden Genauigkeit von ± 15 N an den Auswertecomputer übertragen.

Zur Beheizung des Dosiersystems im Falle der Dosierung von Kunststoffen dienen die integrierten Heizpatronen und die Temperatursensoren. Zur Regelung der Temperatur wird die interne Steuerung der Plastifiziereinheit ARBURG Allrounder der Firma ARBURG GmbH + Co KG verwendet.

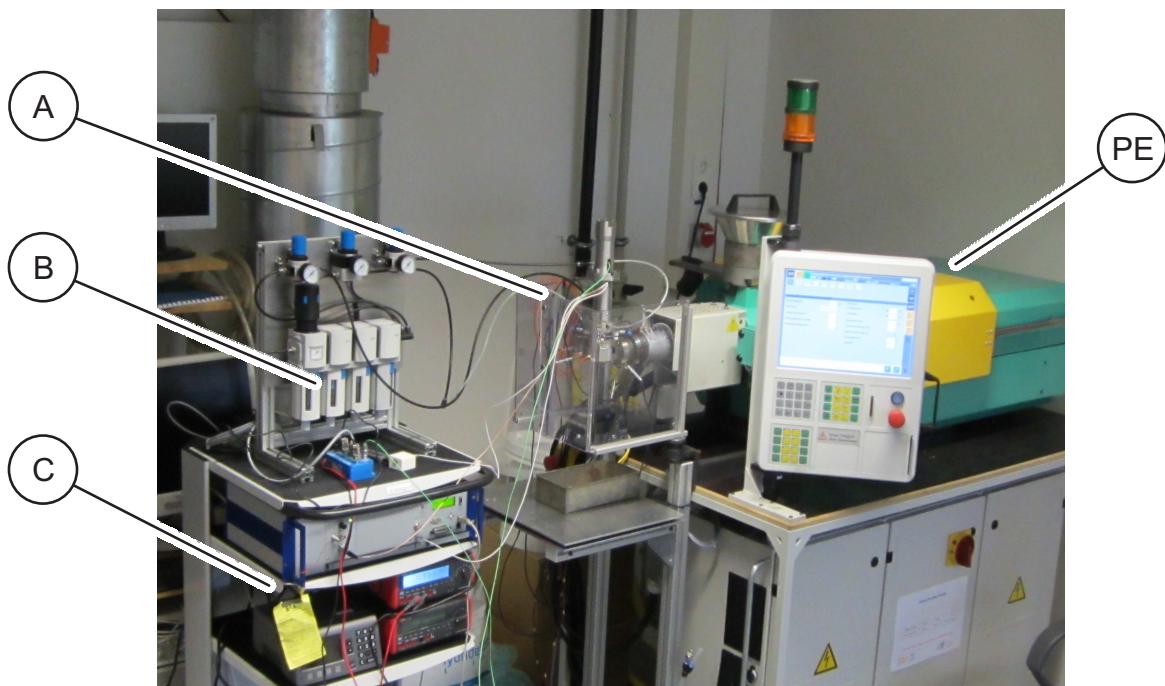


Abbildung 8.15: Aufbau des Dosiersystems mit einer Fluidzufuhr für Kunststoff. Das Dosiersystem (A) mit eingebautem Piezoaktor, Kraftmessdose und Düse ist über eine Adapterplatte an eine Plastifiziereinheit (PE) montiert. Mit der Drucklufteinheit (B) wird zur Kühlung des Piezoaktors Luft über verschiedene Filter aufbereitet und der Druck über Ventile eingestellt. Die Temperatur des Dosiersystems wird über die interne Regelung der Plastifiziereinheit eingestellt. Über einen Auswerterechner werden den Steuer- und Sensorkomponenten (C) Stellwerte vorgegeben bzw. Messdaten erfasst.

9 Modellierung des flexiblen Elements

Die Beschreibung des mechanischen Verhaltens des flexiblen Elements als einem der zentralen Funktionselemente des Dosiersystems beruht auf der Modellierung einer charakteristischen Kenngröße. Als solche Kenngröße eignet sich die Steifigkeit c des flexiblen Elements, die eine Kombination aus geometrischen Eigenschaften, Werkstoffeigenschaften und Belastung darstellt und im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert wird:

Die Steifigkeit eines spezifischen flexiblen Elements ergibt sich aus dem Verhältnis aus der eingebrachten Belastung und der daraus resultierenden Deformation.

Unter den geometrischen Eigenschaften des flexiblen Elements sind Abmessungen wie Dicke und Durchmesser zu sehen, während die Werkstoffeigenschaften in erster Linie durch den Elastizitätsmodul E und die Querkontraktion ν beschrieben werden. Bekannte geometrische Eigenschaften und Werkstoffeigenschaften eines Bauteils, die auch als Bauteileigenschaften bezeichnet werden können, sind entsprechend dieser Definition jedoch noch keine hinreichenden Bedingungen für die Bestimmung der Bauteilsteifigkeit. Sowohl Art als auch Ort der Belastung spielen hierfür eine entscheidende Rolle. So führen unterschiedliche Belastungen, etwa konzentrierte Einzellasten im Vergleich zu verteilten Flächenlasten zu unterschiedlichen Deformationen. Ebenso hängt die Steifigkeit ebenfalls vom Ort ab, an dem die relevante Deformation hervorgerufen wird. Bei einer Steifigkeit handelt es sich daher allgemein nicht um eine reine Bauteileigenschaft, sondern um die Kombination aus Bauteileigenschaften, definierten Belastungen und der resultierenden Deformation. Im Rahmen dieser Arbeit wird das flexible Element als ideal rotationssymmetrisches Bauteil mit konstanten Werkstoffeigenschaften betrachtet, bei dem Belastungen stets zentrisch eingebracht werden und bei dem die relevante Deformation stets in der Bauteilmitte erfolgt. Der Modellierung der Steifigkeit des flexiblen Elements liegt die Kirchhoffsche Plattentheorie zugrunde, die im Folgenden näher erläutert wird. Im Anschluss an eine kurze, allgemeine Herleitung wird die Anwendung dieser Theorie auf das zugrundeliegende Problem skizziert.

9.1 Allgemeine Kirchhoffsche Plattentheorie

Die Kirchhoffsche Plattentheorie wurde von Gustav Kirchhoff 1850 [36] formuliert und basiert auf Arbeiten zahlreicher namhafter Wissenschaftler wie Leonhard Euler, Ernst Florens Friedrich Chladni, Jakob II Bernoulli, Sophie Germain und Siméon Denis Poisson um nur wenige zu nennen. Die Kirchhoffsche Plattentheorie stellt gewissermaßen die Erweiterung der Bernoullischen Balkentheorie (oftmals allgemein als Balkentheorie bezeichnet) um eine Dimension - von eindimensionalen Linienelementen auf zweidimensionale

Flächenelemente - dar. Das flexible Element wird als ebenes Flächentragwerk angesehen, bei dem eine Abmessung klein gegenüber den anderen Abmessungen ist. Im vorliegenden Fall wird das flexible Element als eine rotationssymmetrische Vollkreisplatte angesehen, bei der die Plattendicke h klein gegenüber dem Plattendurchmesser D ist, und es gilt:

$$\frac{h}{D} \leq 0,1 \quad (9.1)$$

Die Durchbiegung w der Platte bei Belastung wird ebenfalls als klein angenommen und bezogen auf die Plattendicke gilt als Richtwert:

$$\frac{w}{h} \leq 0,2 \quad (9.2)$$

Darüber hinaus erfolgt die Modellierung des flexiblen Elements entsprechend der Tragwerkstheorie 1. Ordnung, bei der die Voraussetzung geometrischer und physikalischer Linearität gilt. Dies bedeutet, dass zur Beschreibung von Verzerrungen und Krümmungen lediglich lineare Anteile berücksichtigt werden und das verallgemeinerte Hookesche Gesetz uneingeschränkt gültig ist. Aufgrund der Kleinheit aller Verformungen können die Gleichgewichtsbedingungen von inneren und äußeren Belastungen an der unverformten Platte formuliert werden. Zusätzlich werden die Gleitungen und Dehnungen in Dickenrichtung der Platte vernachlässigt und das flexible Element wird somit als schubstarre Platte angesehen. Veranschaulicht bedeutet dies, dass sich die Plattendicke auch nach erfolgter Durchbiegung nicht ändert.

Zur Herleitung der Kirchhoffschen Plattentheorie bestehen verschiedenen Ansätze [1, 25, 36, 41, 58, 68, 71]. In dieser Arbeit erfolgt die Herleitung nach folgendem Schema: Durch äußere Belastungen der Platte werden innere Spannungen hervorgerufen. Diese Spannungen können zum einen durch Ersatzkräfte (Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente) und zum anderen durch Verformungen (über Elastizitäts- und Stoffgesetze) ausgedrückt werden. Damit lassen sich die Ersatzkräfte mit den Verformungen in Beziehung setzen und es resultiert eine Bestimmungsgleichung für die Durchbiegung der Platte. Dabei handelt es sich um eine Differentialgleichung 4. Ordnung, deren Lösung jeweils an den vorliegenden Lastfall angepasst werden kann. Die Herleitung der Kirchhoffschen Plattentheorie erfolgt im Folgenden in kartesischen Koordinaten und die Lösung wird anschließend für die Behandlung rotationssymmetrischer Probleme in Polarkoordinaten transformiert.

Betrachtet wird zunächst eine dünne Rechteckplatte wie in Abbildung 9.1 mit den Abmessungen $L_1 \times L_2 \times h$ (Länge \times Breite \times Höhe), die durch eine Flächenlast $p(x, y)$ belastet wird. Schneidet man aus ihr ein Element mit den Abmessungen $dx \times dy \times h$ heraus und geht von einem ebenen Spannungszustand aus ($\sigma_{zi} \approx 0$), können die wirkenden Spannungen σ_{xi} und σ_{yi} veranschaulicht werden. Dabei handelt es sich um Spannungen, die aufgrund der differentiellen Elementabmessungen über die Elementlängen dx und dy konstant sind und lediglich über die Plattendicke h veränderlich sind.

Um diese inneren Spannungen zu ermitteln, werden Ersatzkräfte (Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente) eingeführt, die jeweils dem Integral der Spannungen über eine differentielle Elementlänge dz entsprechen. Integriert man die Spannungen über die gesamte Plattendicke und lässt die Ersatzkräfte an der Plattenmittelfläche angreifen, so stellen diese Ersatzkräfte Schnittgrößen dar, die anders als die Spannungen nun konstant über die Plattendicke sind. Die auf die Schnittlängen dx und dy bezogenen Ersatzkräfte haben

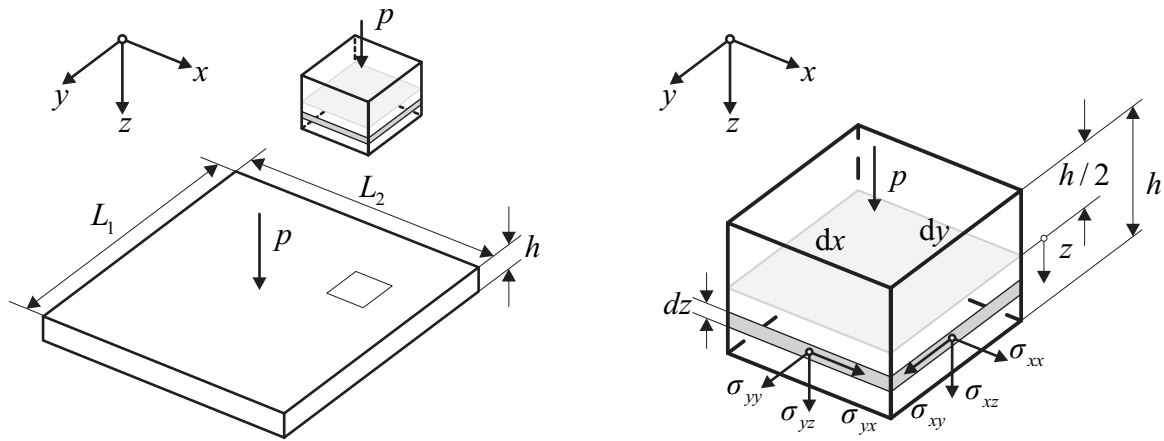


Abbildung 9.1: Dünne Rechteckplatte (links) und ausgeschnittenes differentielles Plattenelement mit wirkenden Spannungen (rechts).

die Dimension Kraft/Länge für die Querkräfte und Moment/Länge für die Biege- und Torsionsmomente.

$$q_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xz} dz \qquad q_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yz} dz \qquad (9.3a)$$

$$m_{xx} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} z dz \qquad m_{yy} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yy} z dz \qquad (9.3b)$$

$$m_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xy} z dz \qquad m_{yx} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yx} z dz \qquad (9.3c)$$

Die Schnittgrößen ändern entlang den Koordinatenachsen wie in Abbildung 9.2 angedeutet ihre Größe um die differentielle Zunahme dq_i für die Querkräfte bzw. um dm_{ij} für die Biege- und Torsionsmomente. Diese differentielle Zunahme lässt sich entsprechend Gleichung (9.4) vereinfachen:

$$dq_i \approx \frac{\partial q_i}{\partial i} di \qquad \text{bzw.} \qquad dm_{ij} \approx \frac{\partial m_{ij}}{\partial i} di \qquad (9.4)$$

Betrachtet man nun ein solches differentielles Plattenelement, auf dessen Fläche dA die Flächenlast p mit der Annahme

$$dA = dx dy \neq 0 \qquad (9.5)$$

wirkt, können Kräfte- und Momentenbilanzen aufgestellt werden. Im Falle der Kräfte in

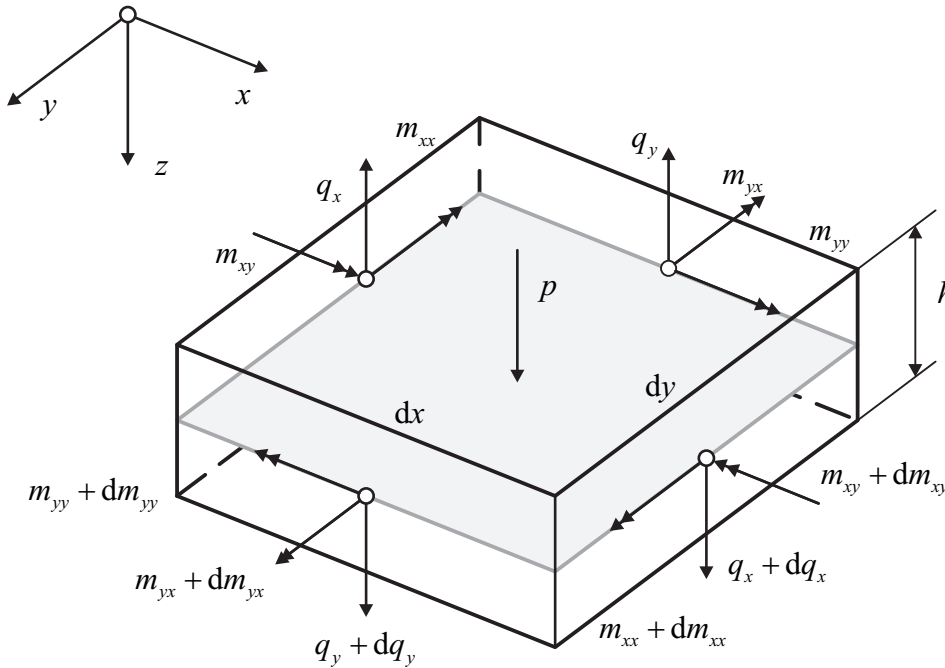


Abbildung 9.2: Differentielles Plattenelement mit den aus einer Belastung p hervorgerufenen Ersatzkräften.

z -Richtung lautet diese ausführlich:

$$\begin{aligned}
 \sum F_z = 0 &= p \, dx \, dy \\
 &- q_x \, dy + \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \, dx \right) \, dy \\
 &- q_y \, dx + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \, dy \right) \, dx \\
 &= p \, dx \, dy + \frac{\partial q_x}{\partial x} \, dx \, dy + \frac{\partial q_y}{\partial y} \, dx \, dy \\
 \rightarrow \sum F_z = 0 &= p + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \tag{9.6}
 \end{aligned}$$

und für die Momentenbilanz in x -Richtung:

$$\begin{aligned}
 \sum M_x = 0 &= m_{xy} \, dy - \left(m_{xy} + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} \, dx \right) \, dy \\
 &+ m_{yy} \, dx - \left(m_{yy} + \frac{\partial m_{yy}}{\partial y} \, dy \right) \, dx \\
 &+ q_y \, dx \, \frac{1}{2} \, dy + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \, dy \right) \, dx \, \frac{1}{2} \, dy \\
 &= - \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} \, dx \, dy - \frac{\partial m_{yy}}{\partial y} \, dx \, dy + q_y \, dx \, dy \\
 \rightarrow \sum M_x = 0 &= \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial m_{yy}}{\partial y} - q_y \tag{9.7}
 \end{aligned}$$

Hierbei werden Terme, die von höherer Ordnung klein sind, vernachlässigt. Dies macht

sich in Gleichung (9.7) durch die Vernachlässigung des Anteils

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} dy dx \frac{1}{2} dy \approx 0 \quad (9.8)$$

bemerkbar. Analog zu der Momentenbilanz in x -Richtung kann die Momentenbilanz in y -Richtung gebildet werden:

$$\sum M_y = 0 = \frac{\partial m_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial m_{xx}}{\partial x} - q_x \quad (9.9)$$

Dies ermöglicht die Formulierung einer Bestimmungsgleichung aus Kombination der Gleichungen (9.6), (9.7) und (9.9) mit $m_{xy} = m_{yx}$ zu:

$$0 = p + \frac{\partial^2 m_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 m_{yy}}{\partial y^2} \quad (9.10)$$

Mit der Annahme der uneingeschränkten Gültigkeit des verallgemeinerten Hookeschen Gesetzes als Stoffgesetz können die Spannungen σ_{ij} mit den Dehnungen ϵ_{ij} und Gleitungen γ_{ij} in Beziehung gesetzt werden:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_{xx} + \nu \epsilon_{yy}) \quad (9.11a)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\epsilon_{yy} + \nu \epsilon_{xx}) \quad (9.11b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1 - \nu)} \tau_{xy} \quad (9.11c)$$

Für den vorliegenden ebenen Verzerrungszustand mit kleinen Verformungen können über kinematische Gleichungen diese Dehnungen ϵ_{ij} und Gleitungen γ_{ij} mit den Verschiebungen u in x -Richtung und v in y -Richtung verknüpft werden und ist in Abbildung 9.3 skizziert:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (9.12a)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (9.12b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (9.12c)$$

Damit lassen sich die Schnittgrößen in der Bestimmungsgleichung (9.10) nun vollständig durch Werkstoffeigenschaften und die Durchbiegung w ausdrücken, was beispielhaft

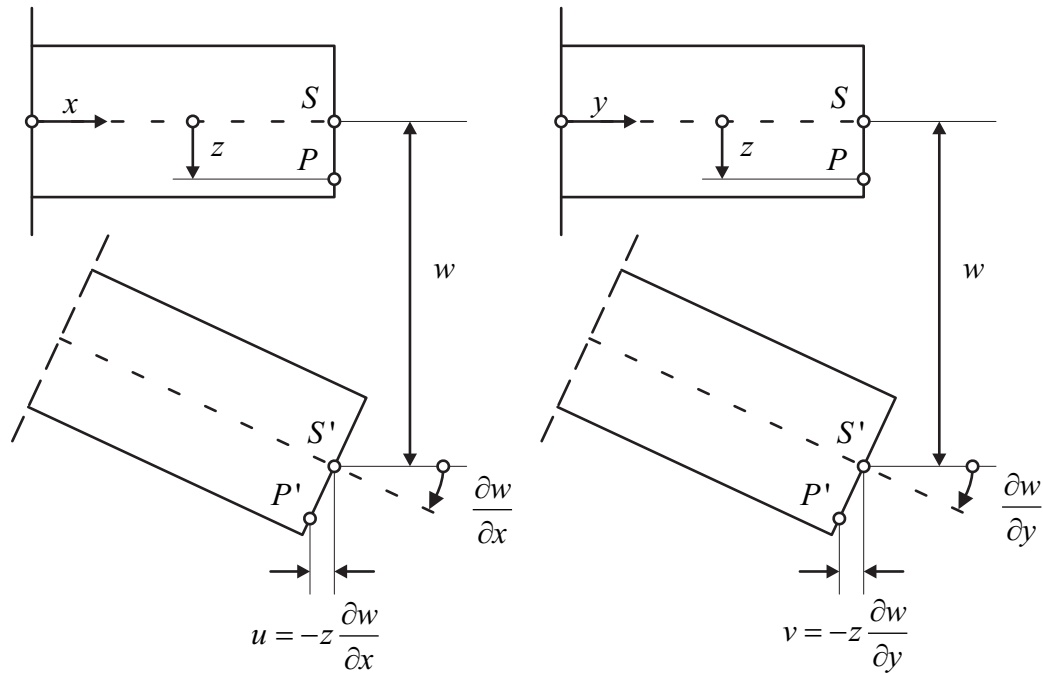


Abbildung 9.3: Verschiebung u und v eines Punktes P in Abhängigkeit der Verschiebung w der Plattenmittelfläche.

anhand des Biegemoments m_{xx} in Gleichung (9.13) gezeigt ist:

$$\begin{aligned}
 m_{xx} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} z \, dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_{xx} + \nu \epsilon_{yy}) z \, dz \\
 &= - \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{(1-\nu^2)} z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) z \, dz \\
 &= - \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \int_{-h/2}^{h/2} z^2 \, dz \\
 m_{xx} &= - \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \tag{9.13}
 \end{aligned}$$

Mit Einführung der Abkürzung K für die Biegesteifigkeit der Platte (Plattenbiegesteifigkeit)

$$K = \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h^3}{12} \tag{9.14}$$

werden die Werkstoffeigenschaften E und ν sowie eine charakteristische Größe der Platte, die Plattendicke h , kombiniert und die Schreibweise verkürzt. Die Plattenbiegesteifigkeit ist dabei nicht zu verwechseln mit der Steifigkeit der Platte, wie sie zu Anfang des Kapitels eingeführt wurde, da hier keine Belastungen berücksichtigt werden. Nach Einsetzen der Schnittgrößen in die Bestimmungsgleichung (9.10) folgt eine Differentialgleichung 4. Ordnung, die eine Durchbiegung w der Platte in Abhängigkeit der Schnittgrößen aufgrund

einer Belastung p beschreibt:

$$p = -\frac{\partial^2 m_{xx}}{\partial x^2} - 2\frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 m_{yy}}{\partial y^2} \quad (9.15)$$

$$= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[K \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] + 2\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[K (1 - \nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[K \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right]$$

Unter Verwendung des Laplace-Operators Δ und eines Differentialoperators $L(K, w)$ kann mit der Einschränkung einer konstanten Querkontraktionszahl ν nun Gleichung (9.15) in kompakter Schreibweise notiert werden:

$$p = \Delta(K \Delta w) - (1 - \nu) L(K, w) \quad (9.16)$$

Dabei gilt für den Laplace-Operator Δ und den Differentialoperator $L(K, w)$ in kartesischen Koordinaten:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (9.17a)$$

$$L(K, w) = \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2\frac{\partial^4 K}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (9.17b)$$

Gleichung (9.16) stellt die allgemeine Plattengleichung der Kirchhoffschen Plattentheorie dar.

9.2 Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie für Vollkreisplatten

Um die Kirchhoffsche Plattentheorie auf das flexible Element anzuwenden, ist es zweckmäßig, die Plattengleichung (9.16) in Polarkoordinaten abhängig vom Radius r und Winkel φ anzugeben. Aus der kompakten Schreibweise der Differentialgleichung ist ersichtlich, dass hierfür lediglich der Laplace-Operator Δ und der Differentialoperator $L(K, w)$ einer Koordinatentransformation unterworfen werden müssen. Hierfür gilt in Polarkoordinaten allgemein:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \quad (9.18a)$$

$$L(K, w) = \frac{\partial^2 K}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial K}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 K}{\partial \varphi^2} \right) - 2\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial K}{\partial \varphi} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \quad (9.18b)$$

Mit Berücksichtigung der Rotationssymmetrie des flexiblen Elements sind alle Ausdrücke unabhängig von φ und somit nur noch abhängig von r und es folgt:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (9.19a)$$

$$L(K, w) = \frac{\partial^2 K}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial K}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial K}{\partial r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (9.19b)$$

Eine weitere, deutlich stärkere Vereinfachung, kann durch die Annahme einer konstanten Plattendicke h und somit einer konstanten Plattenbiegesteifigkeit K getroffen werden. Damit lautet die Plattengleichung für den Fall von Rotationssymmetrie abhängig vom Radius r :

$$p = K \Delta \Delta w$$

$$\rightarrow \Delta \Delta w(r) = \frac{p(r)}{K} = \frac{\partial^4 w}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3 w}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial w}{\partial r} \quad (9.20)$$

Die Schnittgrößen lassen sich nun direkt aus Gleichung (9.13) bzw. analogen Überlegungen formulieren. Die Spannungen aus (9.11), für die ein Stoffgesetz existiert, zeigen einen linearen Verlauf über die Plattendicke h , während für die Spannung $\sigma_{rz}(r, z)$ aus Gleichgewichtsbedingungen ein parabolischer Spannungsverlauf resultiert:

$$m_{rr}(r) = -K \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad \sigma_{rr}(r, z) = z \frac{12}{h^3} m_{rr}(r) \quad (9.21a)$$

$$m_{\varphi\varphi}(r) = -K \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) \quad \sigma_{\varphi\varphi}(r, z) = z \frac{12}{h^3} m_{\varphi\varphi}(r) \quad (9.21b)$$

$$m_{r\varphi}(r) = 0 \quad \sigma_{r\varphi}(r, z) = 0 \quad (9.21c)$$

$$q_r(r) = -K \frac{\partial}{\partial r} (\Delta w) \quad \sigma_{rz}(r, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \frac{12}{h^3} q_r(r) \quad (9.21d)$$

$$q_\varphi(r) = 0 \quad \sigma_{\varphi z}(r, z) = 0 \quad (9.21e)$$

Die Annahme einer konstanten Plattenbiegesteifigkeit K stellt zwar eine entscheidende Einschränkung dar, erscheint allerdings in verschiedenen Punkten als zweckmäßig. Zum einen bedeutet dies nicht, dass ausschließlich Platten konstanter Dicke betrachtet werden können, sondern lediglich, dass eine Platte abschnittsweise konstante Dicken aufweisen muss, wie in Abbildung 9.4 skizziert. Zum anderen ist die Differentialgleichung 4. Ordnung

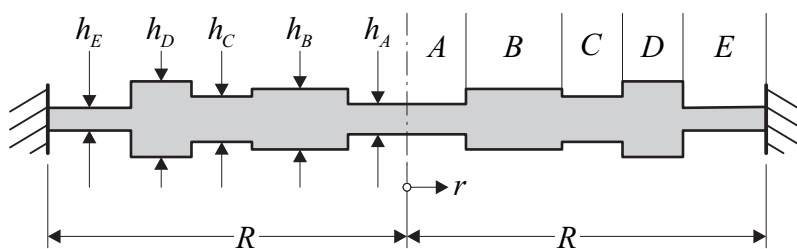


Abbildung 9.4: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand mit abschnittswisen konstanten Plattendicken.

(9.20) nur für ausgewählte Dickenprofile analytisch lösbar. Dazu zählen etwa bestimmte Dickenprofile, die durch Exponentialfunktionen oder kubische Funktionen beschrieben werden können. Beispiele hierfür sind Lösungen für lineare oder quadratisch veränderliche Plattenbiegesteifigkeiten, wie sie in den 30er und 40er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt worden sind [11, 15, 47, 48, 49]. Die daraus resultierenden Dickenprofile sind allerdings für wenige technische Anwendungen von tatsächlichem Interesse, denn lineare Dickenänderungen oder kreisförmige Nuten in einer Platte können damit nicht beschrieben werden. Solcherlei Profile können allerdings durch abschnittsweise definierte Platten,

mit jeweils konstanter Plattendicke pro Abschnitt, angenähert werden. Um diese Profile hinreichend genau zu beschreiben, müssen die Abschnitte hinreichend klein sein und hierfür sind, da es sich ohnehin um eine Näherungslösung handelt, numerische Methoden analytischen Methoden vorzuziehen.

Da im Falle des flexiblen Elements lediglich einfache Querschnittsänderungen auftreten, können diese mit analytischen Methoden in guter Näherung abgebildet werden. Ein Vorteil der analytischen Lösung entsprechend der Kirchhoffschen Plattentheorie besteht in diesem Fall auch darin, Einflussparameter direkt zu identifizieren. Dies wird im Folgenden, ausgehend von einer einfachen Vollkreisplatte konstanter Dicke und abschnittsweise definierten Platten, gezeigt.

Zur Beschreibung der Durchbiegung einer Platte bei Belastung muss zunächst die Differentialgleichung (9.20) gelöst werden. Dafür eignet es sich, die Lösung in einen homogene Lösung w_h und eine partikuläre Lösung w_p aufzuteilen.

$$w(r) = w_h(r) + w_p(r) \quad (9.22a)$$

$$w_h(r) = 0 \quad (9.22b)$$

$$w_p(r) = p(r) \quad (9.22c)$$

Durch Umformen des Ausdrucks $\Delta\Delta w$ aus der Differentialgleichung (9.20) kann die homogene Lösung durch direkte Integration ermittelt werden:

$$\begin{aligned} \Delta\Delta w_h(r) = 0 &= \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw_h(r)}{dr} \right) \right] \right\} \\ &\vdots \\ w_h(r) &= C_1 + C_2 r^2 + C_3 \ln(r) + C_4 r^2 \ln(r) \end{aligned} \quad (9.23)$$

Für die Anpassung der Lösung an eine definierte Belastung wird zunächst der dimensionslose Radius $\rho = r/R$ eingeführt und die Lösung für eine in diesem Fall konstante Belastung $p(\rho) = p = \text{konst.}$ durch schrittweise Integration ermittelt:

$$\begin{aligned} \Delta\Delta w_p(\rho) &= \frac{R^4}{K} \int \frac{1}{\rho} \left\{ \int \rho \left[\int \frac{1}{\rho} \left(\int p(\rho) \rho d\rho \right) d\rho \right] d\rho \right\} d\rho \\ &\vdots \\ w_p(\rho) &= \frac{pR^4}{64K} \rho^4 \end{aligned} \quad (9.24)$$

Die vollständige Lösung lautet dann entsprechend

$$w(\rho) = w_h(\rho) + w_p(\rho) = C_1 + C_2 \rho^2 + C_3 \ln(\rho) + C_4 \rho^2 \ln(\rho) + \frac{pR^4}{64K} \rho^4 \quad (9.25)$$

Dieses Vorgehen eignet sich auch für die Abbildung veränderlicher Lasten, etwa Belastungen, die über den Radius einen linearen oder quadratischen Verlauf zeigen. Um die gefundenen Lösungen für die Berechnung der Plattendurchbiegung anzuwenden, müssen noch die Integrationskonstanten aus Gleichung (9.25) angepasst werden.

9.2.1 Vollkreisplatte mit Volllast

Für den Fall einer Vollkreisplatte mit konstanter Flächenlast und fester Einspannung am Rand, wie in Abbildung 9.5 dargestellt, müssen die Integrationskonstanten C_3 und C_4 den Wert Null annehmen, um eine endliche Durchbiegung in der Plattenmitte für $r = 0$ bzw. $\rho = 0$ sicherzustellen. Die Integrationskonstanten C_1 und C_2 können durch Formulierung der Durchbiegung und deren Änderung am eingespannten Rand für $\rho = 1$ ermittelt werden

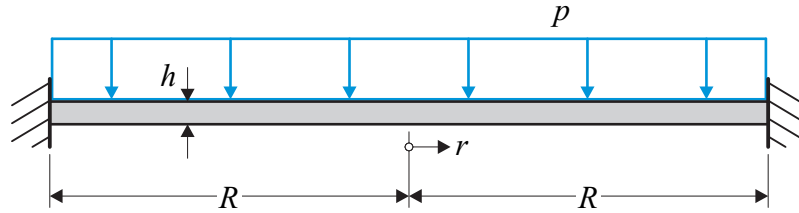


Abbildung 9.5: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Vollflächenlast.

$$w(\rho) = C_1 + C_2 \rho^2 + \frac{pR^4}{64K} \rho^4 \quad w(\rho = 1) = 0 = C_1 + C_2 + \frac{pR^4}{64K} \quad (9.26a)$$

$$w'(\rho) = C_2 \frac{2}{R} \rho + \frac{pR^3}{16K} \rho^3 \quad w'(\rho = 1) = 0 = C_2 \frac{2}{R} + \frac{pR^3}{16K} \quad (9.26b)$$

und für den einfachen Fall konstanter Flächenlast p ergibt sich die Durchbiegung der Platte zu:

$$w(\rho) = \frac{pR^4}{64K} (1 - \rho^2)^2 \quad (9.27)$$

Im Sinne der Definition der Steifigkeit c der Platte anfangs des Kapitels kann die relevante Durchbiegung für $\rho = 0$ mit der eingebrachten Kraft F , die aus der Flächenlast p resultiert, verknüpft werden:

$$c = \frac{F}{w_{rel}(\rho)} = \frac{p\pi R^2}{w(\rho = 0)} \rightarrow c = \frac{64\pi K}{R^2} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (9.28)$$

9.2.2 Vollkreisplatte mit Teillast

Im Falle einer abschnittsweise definierten Belastung einer Platte, wie in Abbildung 9.6 angedeutet, wird ein sehr ähnliches Herangehen zur Bestimmung der Lösung verfolgt. Auch hier bildet die allgemeine Lösung aus Gleichung (9.25) den Ausgangspunkt. Jedoch muss die Lösung aufgrund der Unstetigkeit in der Belastung am Abschnittübergang b in zwei Gebiete aufgeteilt werden - in einen belasteten Abschnitt A mit $p_A = p = \text{konst.}$ und einen unbelasteten Abschnitt B mit $p_B = 0$. Im Falle einer gleichen, konstanten Plattendicke in beiden Abschnitten gilt $K_A = K_B = K$ und mit der dimensionslosen Abschnittsgrenze $\beta = b/R$ folgt zunächst:

$$w(\rho) = \begin{cases} w_A(\rho) & 0 \leq \rho < \beta \\ w_B(\rho) & \beta \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (9.29)$$

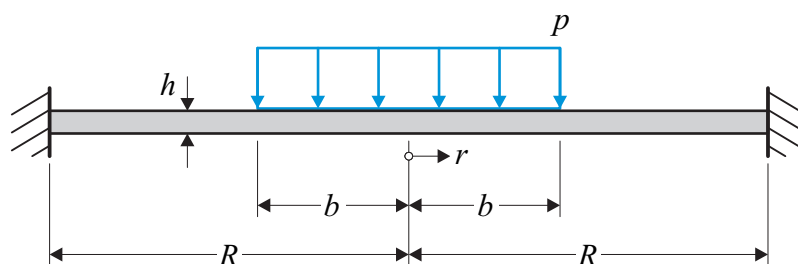


Abbildung 9.6: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand unter konstanter, zentrischer Teilflächenlast.

Für die jeweiligen Abschnitte gilt demnach mit den Integrationskonstanten A_i und B_i :

$$w_A(\rho) = A_1 + A_2\rho^2 + \frac{pR^4}{64K}\rho^4 \quad (9.30a)$$

$$w_B(\rho) = B_1 + B_2\rho^2 + B_3 \ln(\rho) + B_4\rho^2 \ln(\rho) \quad (9.30b)$$

Für die Bestimmung der Integrationskonstanten dienen zum einen die Stetigkeitsbedingungen an der Abschnittsgrenze $\rho = \beta$ und zum anderen die Randbedingungen für die Durchbiegung und deren Änderung am Rand für $\rho = 1$

$$w_A(\rho = \beta) = w_B(\rho = \beta) \quad (9.31a)$$

$$w'_A(\rho = \beta) = w'_B(\rho = \beta) \quad (9.31b)$$

$$m_{A_{rr}}(\rho = \beta) = m_{B_{rr}}(\rho = \beta) \quad (9.31c)$$

$$q_{Ar}(\rho = \beta) = q_{Br}(\rho = \beta) \quad (9.31d)$$

$$w_B(\rho = 1) = 0 \quad (9.31e)$$

$$w'_B(\rho = 1) = 0 \quad (9.31f)$$

und es folgt als Lösung für den skizzierten Lastfall:

$$w(\rho) = \begin{cases} \frac{pR^4}{64K} [\beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4) - 2\beta^2 (\beta^2 - 4 \ln \beta) \rho^2 + \rho^4] & 0 \leq \rho < \beta \\ \frac{pR^4}{32K} \beta^2 [(2 + \beta^2) (1 - \rho^2) + 2(\beta^2 + 2\rho^2) \ln \rho] & \beta \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (9.32)$$

Für die Steifigkeit c der Platte ergibt sich nun mit der relevanten Durchbiegung für $\rho = 0$ und der eingebrachten Kraft F , die aus der Flächenlast p resultiert, eine von β abhängige Gleichung. Für den Fall $\beta \rightarrow 1$ geht der Lastfall in eine Platte unter Volllast über, was auch direkt anhand der Steifigkeit zu sehen ist.

$$c = \frac{F}{w_{rel}(\rho)} = \frac{p\pi\beta^2 R^2}{w_A(\rho = 0)} \rightarrow c = \frac{64\pi K}{R^2} \frac{1}{(\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (9.33)$$

Hier zeigt sich ein wichtiger Vorteil der analytischen Lösung, bei der der logarithmische Einfluss der Teilflächenbelastung direkt erkennbar ist.

Mit den bisher vorgestellten Lösungen ausgewählter Plattenprobleme lassen sich durch Superposition viele weitere Lastfälle berechnen. Anhand Abbildung 9.7 ist etwa eine Ringflächenlast auf eine Platte konstanter Plattendicke h gezeigt, die durch die Addition bzw. Subtraktion zweier Platten mit Teilflächenbelastung berechnet werden kann.

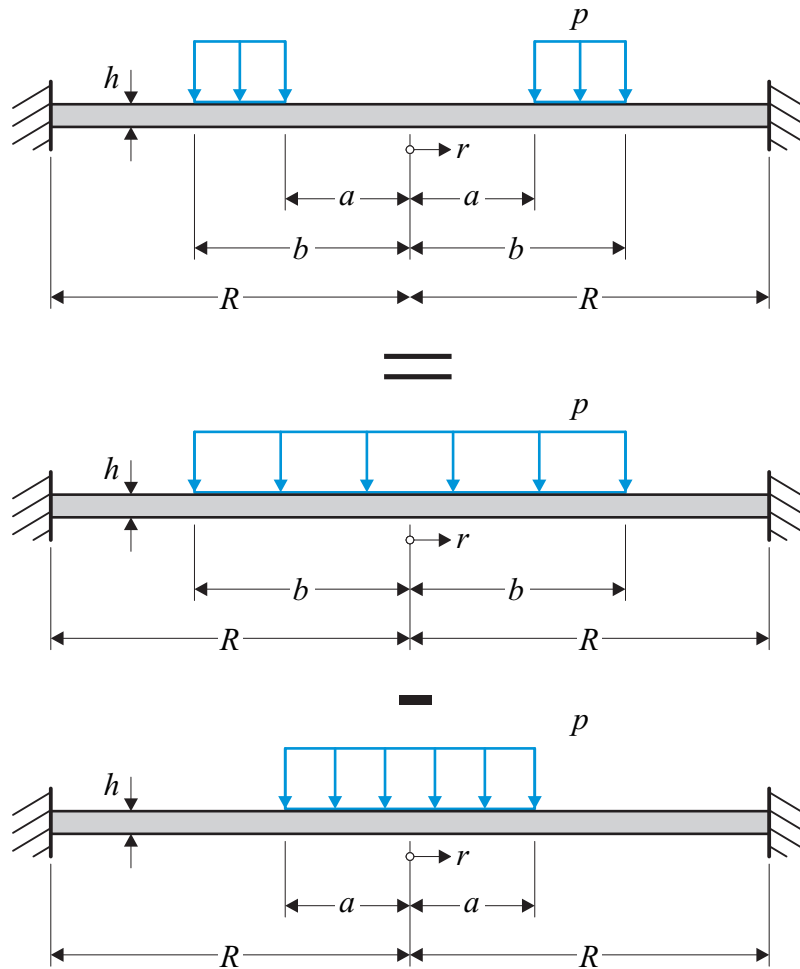


Abbildung 9.7: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand unter konstanter, zentrischer Ringflächenlast (oben). Durch Superposition (mittig und unten) lässt sich dies aus rotationssymmetrischen Vollkreisplatten mit fester Einspannung am Rand unter konstanter, zentrischer Teilflächenlast beschreiben.

Um die Durchbiegung der Platte sowie wirkende Ersatzkräfte und Spannungen auch an Abschnittübergängen geschlossen beschreiben zu können, ist es jedoch zweckmäßig, die Lösung vor Bestimmung der Integrationskonstanten in Abschnitte zu unterteilen. Insgesamt führt dies in diesem Fall wie in Abbildung 9.7 angedeutet zu einer abschnittsweise definierten Platte mit drei Abschnitten A , B , und C mit den dimensionslosen Abschnittsgrenzen $\alpha = a/R$ und $\beta = b/R$ und es gilt allgemein:

$$w(\rho) = \begin{cases} w_A(\rho) & 0 \leq \rho < \alpha \\ w_B(\rho) & \alpha \leq \rho < \beta \\ w_C(\rho) & \beta \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (9.34)$$

Wiederum muss zur Bestimmung der endgültigen Lösung ein Gleichungssystem der Form von Gleichung (9.31) gelöst werden. Die Anzahl der Integrationskonstanten n_{IK} , die bestimmt werden müssen, und somit die Anzahl notwendiger Gleichungen eines solchen

Gleichungssystemen werden direkt durch die Anzahl der Abschnitte n_{Sek} definiert.

$$n_{IK} = 4n_{Sek} - 2 \quad (9.35)$$

Mit Hilfe rechnergestützter Algorithmen können solche Gleichungssysteme auch allgemein gelöst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dies mit MATLAB, einer kommerziellen Software des Unternehmens The MathWorks, Inc., umgesetzt. Zwar liegen die Stärken von MATLAB vorwiegend in der Behandlung numerischer Probleme, doch reichen die Möglichkeiten des symbolischen Rechnens für solche linearen Gleichungssysteme aus. So kann das Gleichungssystem (9.31) auf ein Plattenproblem mit drei Abschnitten angepasst werden und allgemein, das heißt mit den Annahmen beliebiger Plattendicken und somit beliebiger Plattenbiegesteifigkeit K_i und abschnittsweise definierter Belastungen p_i , gelöst werden.

Die resultierenden Lösungen sind aufgrund der hohen Anzahl von Parametern nicht immer übersichtlich darstellbar. Mit der Annahme von $K_A = K_B = K_C = K$ sowie $p_A = 0$, $p_B = p = konst.$ und $p_C = 0$ ergibt sich die Durchbiegung der gesamten Platte zu:

$$w_A(\rho) = \frac{pR^4}{64K} \left[4(\beta^2 - \alpha^2) - 3(\beta^4 - \alpha^4) + 4(\beta^4 \ln \beta - \alpha^4 \ln \alpha) - \{2(\beta^4 - \alpha^4) + 8(\alpha^2 \ln \alpha - \beta^2 \ln \beta)\} \rho^2 \right] \quad (9.36a)$$

$$w_B(\rho) = \frac{pR^4}{64K} \left[4\beta^2(1 + \ln \beta) - 2\alpha^2(\alpha^2 + 2)(1 - \rho^2) - \beta^4(3 - 2\rho^2) + 8\beta^2 \ln \beta \rho^2 - 4\alpha^2(\alpha^2 + 2\rho^2) \ln \rho + \rho^4 \right] \quad (9.36b)$$

$$w_C(\rho) = \frac{pR^4}{32K} (\beta^2 - \alpha^2) \left[4(\rho^2 - 1) \ln \rho + (2 + \alpha^2 + \beta^2)(1 - \rho^2 + 2 \ln \rho) \right] \quad (9.36c)$$

In Analogie zu der Steifigkeit aus Gleichung (9.28) bzw. (9.33) für die Plattenprobleme mit einem bzw. zwei Abschnitten lässt sich dementsprechend formulieren:

$$c = \frac{F}{w_{rel}(\rho)} = \frac{p\pi(\beta^2 - \alpha^2)R^2}{w_A(\rho = 0)} \rightarrow c = \frac{64\pi K}{R^2} \frac{(\beta^2 - \alpha^2)}{(4(\beta^2 - \alpha^2) - 3(\beta^4 - \alpha^4) + 4(\beta^4 \ln \beta - \alpha^4 \ln \alpha))} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (9.37)$$

Dabei ist zu bemerken, dass sich die Durchbiegung aufgrund der in Abbildung 9.7 illustrierten Belastung zwar durch Superposition kombinieren lässt, die einzelnen Steifigkeiten jedoch nicht aus deren Superposition auf die Gesamtsteifigkeit führen. Der Grund hierfür sind die unterschiedlichen Belastungen, die geschlossen berücksichtigt werden müssen.

9.3 Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie auf das flexible Element

Das prinzipielle Vorgehen zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften einer Platte, unter anderem deren Steifigkeit, wurde anhand der Herleitung der Kirchhoffschen Plattentheorie und deren Anwendung auf ausgewählte Plattenprobleme gezeigt. Die real auftretenden Lastfälle im Dosiersystem werden im Folgenden zusammengefasst.

9.3.1 Lastfall im Dosiersystem unter Vernachlässigung von Querschnittsänderungen

Unter Vernachlässigung von Querschnittsänderungen im flexiblen Element, also der Vernachlässigung der Dickenänderung durch den Stößel, wird das flexible Element als einfache Platte konstanter Dicke angesehen. Die Belastung des flexiblen Elements im Dosiersystem setzt sich aus dem Druck p_{FL} , unter dem ein Fluid steht, und der externen Belastung p_{EB} , die dem Druck entgegen wirkt, zusammen.

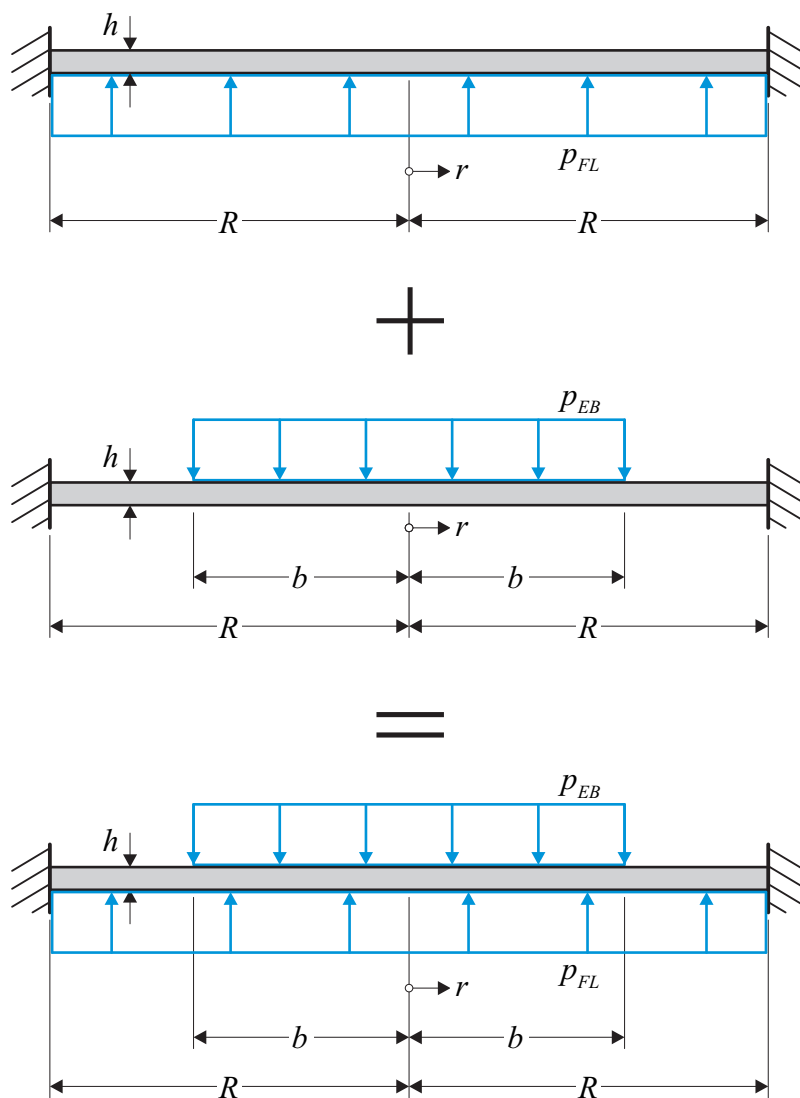


Abbildung 9.8: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Vollflächenlast (oben), entgegen gerichteter Teilflächenlast (mittig) und kombinierter Belastung durch Superposition (unten).

Isoliert voneinander lassen sich die jeweiligen Steifigkeiten c_{FL} und c_{EB} der einzelnen

Lastfälle direkt mit den Gleichungen (9.28) und (9.33) beschreiben.

$$\begin{aligned}
 w_{FL}(\rho = 0) &= \frac{R^4}{64K} p_{FL} \\
 F_{FL} &= \pi R^2 p_{FL} \\
 \rightarrow c_{FL} &= \frac{F_{FL}}{w_{FL}(\rho = 0)} = \frac{64\pi K}{R^2}
 \end{aligned} \tag{9.38a}$$

$$\begin{aligned}
 w_{EB}(\rho = 0) &= \frac{R^4}{64K} p_{Eb} \beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4) \\
 F_{EB} &= \pi R^2 p_{EB} \beta^2 \\
 \rightarrow c_{Eb} &= \frac{F_{EB}}{w_{EB}(\rho = 0)} = \frac{64\pi K}{R^2} \frac{1}{(\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)}
 \end{aligned} \tag{9.38b}$$

Unter Berücksichtigung einer abschnittsweise definierten Platte mit dem dimensionslosen Abschnittsübergang $\beta = b/R$ mit unterschiedlichen Belastungen bzw. durch die Anwendung des Prinzips der Superposition folgt für den in Abbildung 9.8 skizzierten, kombinierten Lastfall für das Dosiersystem die Steifigkeit c_{DO} . Insgesamt ergibt sich somit:

$$\begin{aligned}
 w_{DO}(\rho = 0) &= \frac{R^4}{64K} (p_{FL} + p_{EB} \beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)) \\
 F_{DO} &= \pi R^2 (p_{FL} + p_{EB} \beta^2) \\
 \rightarrow c_{DO} &= \frac{F_{DO}}{w_{DO}(\rho = 0)} = \frac{64\pi K}{R^2} \frac{(p_{FL} + p_{EB} \beta^2)}{(p_{FL} + p_{EB} \beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4))}
 \end{aligned} \tag{9.39}$$

Die prinzipielle Herleitung wurde bereits anschaulich erläutert. In Gleichung (9.39) wird deutlich, dass das Prinzip der Superposition auf die Durchbiegung der Platte, jedoch wiederum nicht auf die Gesamtsteifigkeit angewendet werden kann. Die in Abbildung 9.8 angedeuteten gegeneinander wirkenden Belastungen p_{FL} und p_{EB} dienen in erster Linie der Veranschaulichung des kombinierten Lastfalls. Die einzelnen Steifigkeiten c_{FL} und c_{EB} bleiben davon unberührt, da die Wirkrichtungen von jeweiliger Belastung und jeweiliger resultierender Deformation jeweils identisch sind. Im Falle der kombinierten Betrachtung werden die Belastungen p_{FL} und p_{EB} in der analytischen Lösung zweckmäßigerweise zunächst allgemein formuliert. Für die numerische Beschreibung eines solchen Lastfalls lassen sich unterschiedliche Wirkrichtungen durch unterschiedliche Vorzeichen der jeweiligen Belastungen berücksichtigen.

Die hier vorgestellten analytischen Überlegungen dienen zum Abgleich mit Messungen an einem flexiblen Element ohne Stößel - also einer einfachen Platte konstanter Dicke. Gleichzeitig liefert diese analytische Beschreibung erste Hinweise auf das mechanische Verhalten des flexiblen Elements unter Berücksichtigung des Stößels.

9.3.2 Lastfall im Dosiersystem unter Berücksichtigung von Querschnittsänderungen

Unter Berücksichtigung der Querschnittsänderung des flexiblen Elements durch den Stößel ergibt sich eine andere Art einer abschnittsweise definierten Platte. Im einfachsten Fall

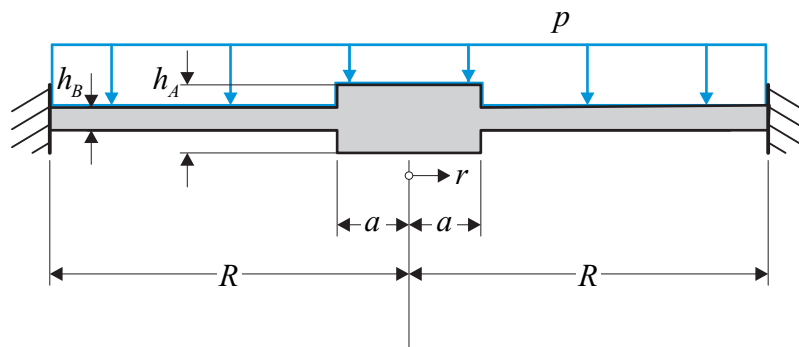


Abbildung 9.9: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit abschnittsweise definierten, konstanten Plattendicken mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Vollflächenlast.

einer Platte unter Vollast mit einer Dickenänderung entlang des Querschnitts lässt sich dies wie in Abbildung 9.9 skizzieren.

Der Stößel, der real im Falle des flexiblen Elements einseitig ausgeprägt ist, wird hierbei im Sinne der Kirchhoffschen Plattentheorie symmetrisch zur Plattenmitte modelliert. Durch die Annahme unterschiedlicher Plattendicken h_A und h_B in den Abschnitten A und B folgt für die jeweilige Plattenbiegesteifigkeiten $K_A \neq K_B$. Die prinzipielle Lösung dieses Plattenproblems gleicht dem vorgestellten Vorgehen durch Aufstellen eines Gleichungssystems aus Übergangs- und Randbedingungen. Mit dem dimensionslosen Abschnittsübergang $\alpha = a/R$ sowie $K_A = nK$ und $K_B = K$ gilt

$$w(\rho) = \begin{cases} w_A(\rho) & 0 \leq \rho < \alpha \\ w_B(\rho) & \alpha \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (9.40)$$

und die Deformation der Platte in den einzelnen Abschnitten lautet ausführlich:

$$w_A(\rho) = \frac{pR^4}{64K} \left[1 + \alpha^2 (4 \ln \alpha - \alpha^2) + \frac{(\alpha^2 - \rho^2)^2}{n} - \frac{4\rho^2 (1 - \alpha^2) + 8\alpha^2 \ln \alpha}{2 + (n-1)(1 - \alpha^2)(\nu + 1)} \right] \quad (9.41a)$$

$$w_B(\rho) = \frac{pR^4}{64K} \left[(1 - \rho^2)^2 + 2\alpha^2 (1 - \rho^2 + 2 \ln \rho) - \frac{4\alpha^2 (2 \ln \rho - \rho^2 + 1)}{2 + (n-1)(1 - \alpha^2)(\nu + 1)} \right] \quad (9.41b)$$

Inwieweit allerdings diese Querschnittsüberhöhung zur Berechnung der Steifigkeit berücksichtigt werden muss, soll durch den Vergleich zweier Platten unterschiedlicher Geometrie bei gleicher Belastung betrachtet werden. Hierfür dient eine Platte konstanter Plattendicke mit der Durchbiegung w_K als Referenz gegenüber einer Platte mit abschnittsweise unterschiedlichen Plattendicken mit $K_A = nK$ und $K_B = K$ und der Durchbiegung w_{nK} . Die relevanten Deformationen der jeweiligen Platten für $\rho = 0$ folgen aus den Gleichungen (9.41a) bzw. (9.27):

$$w_{nK}(\rho = 0) = \frac{pR^4}{64K} \left[1 + \alpha^2 (4 \ln \alpha - \alpha^2) + \frac{\alpha^4}{n} - \frac{8\alpha^2 \ln \alpha}{2 + (n-1)(1 - \alpha^2)(\nu + 1)} \right] \quad (9.42a)$$

$$w_K(\rho = 0) = \frac{pR^4}{64K} \quad (9.42b)$$

Setzt man diese Deformationen ins Verhältnis $V_{w,nK/K} = w_{nK}/w_K$ und führt eine Grenzwertbetrachtung für die Querschnittsüberhöhung durch, so wird deutlich, dass der Grenzwert lediglich vom Abschnittsübergang α abhängt:

$$V_{w,nK/K}(\rho = 0) = \frac{w_{nK}(\rho = 0)}{w_K(\rho = 0)} \quad (9.43a)$$

$$= 1 + \alpha^2 (4 \ln \alpha - \alpha^2) + \frac{\alpha^4}{n} - \frac{8\alpha^2 \ln \alpha}{2 + (n-1)(1-\alpha^2)(\nu+1)}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (V_{w,nK/K}(\rho = 0)) = 1 + \alpha^2 (4 \ln \alpha - \alpha^2) \quad (9.43b)$$

Dies lässt sich direkt auf das Verhältnis der Steifigkeiten $V_{c,nK/K} = c_{nK}/c_K$ beider betrachteten Platten übertragen und es gilt:

$$V_{c,nK/K} = \frac{c_{nK}}{c_K} = \frac{1}{V_{w,nK/K}(\rho = 0)} \quad (9.44a)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (V_{c,nK/K}) = \frac{1}{1 + \alpha^2 (4 \ln \alpha - \alpha^2)} \quad (9.44b)$$

Neben der Tatsache, dass eine Querschnittsüberhöhung in der analytischen Lösung nicht unendlich berücksichtigt wird, stellt dies eine Möglichkeit dar, empirisch ermittelte Daten auf Plausibilität zu überprüfen.

Diese Überlegungen bezüglich des Einflusses der Querschnittsüberhöhung lassen sich auf ein Plattenproblem wie in Abbildung 9.10 skizziert übertragen. Eine Vollkreisplatte mit dem dimensionslosen Abschnittsübergang $\alpha = a/R$ für unterschiedliche Dicken wird durch eine Teilflächenlast mit der dimensionslosen Abschnittsgrenze $\beta = b/R$ belastet.

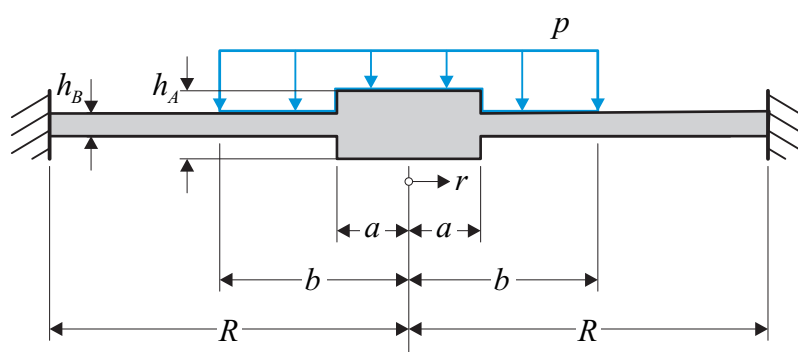


Abbildung 9.10: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit abschnittsweise definierten, konstanten Plattendicken mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Teilflächenlast.

Durch den zusätzlichen Abschnitt mit unterschiedlichen Belastungen und der Annahme von $K_A \neq K_B$ wird die Lösung des linearen Gleichungssystems zur Bestimmung der Integrationskonstanten jedoch deutlich komplizierter und die Durchbiegung der Platte lässt sich nicht mehr übersichtlich durch einfache Formeln darstellen.

Allerdings lässt sich die vorangehende Überlegung bezüglich des Einflusses der Querschnittsüberhöhung durch den Stößel auf dieses Plattenproblem übertragen. Bezogen auf

eine Platte konstanter Dicke unter Teilflächenbelastung lässt sich eine Grenzwertbetrachtung für die Querschnittsüberhöhung durchführen und resultiert in folgendem Zusammenhang:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (V_{w,nK/K}(\rho = 0)) = 1 + \frac{4\alpha^2 \ln \alpha}{\beta^2 (\alpha^2 - 1)} - \frac{\alpha^2 (\alpha^2 (\alpha^2 - 1) + 4 (\beta^2 (\beta^2 - 3) - \alpha^2 + 4) \ln \alpha)}{\beta^2 (\alpha^2 - 1) (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)} \quad (9.45)$$

Wiederum lässt sich feststellen, dass die analytische Lösung konvergiert. Dieser Grenzwert kann durch numerische Berücksichtigung von Werten für α und β wiederum zur Plausibilitätsprüfung empirisch ermittelter Daten verwenden.

9.3.3 Beispiele von Plattenproblemen

Zur Veranschaulichung der vorgestellten, ausgewählten Plattenprobleme werden im Folgenden kurz Beispiele für die Durchbiegung und die wirkenden Spannungen erläutert. Betrachtet man den einfachsten Fall einer Vollkreisplatte konstanter Dicke unter Vollast, kann die Durchbiegung der Platte bezogen auf die maximale Durchbiegung in der Plattenmitte wie in Abbildung 9.11 dargestellt werden.

Aus Gleichung (9.27) ist die Durchbiegung in Abhängigkeit vom dimensionslosen Radius $\rho = r/R$ bereits bekannt. Bezogen auf die maximale Durchbiegung $w_{max}(\rho)$ lautet die dimensionslose Durchbiegung $\bar{w}(\rho)$:

$$\bar{w}(\rho) = \frac{w(\rho)}{w_{max}(\rho)} = \frac{w(\rho)}{w(\rho = 0)} = (1 - \rho^2)^2 \quad (9.46)$$

Für den in Abbildung 9.11 skizzierten Lastfall lassen sich die Ersatzkräfte und Spannungen aus Gleichung (9.21) nun mit dem dimensionslosen Radius $\rho = r/R$ zusammenfassen:

$$m_{rr}(\rho) = \frac{pR^2}{16} [(\nu + 1) - (\nu + 3)\rho^2] \quad \sigma_{rr}(\rho) = \frac{3pR^2}{8h^2} [(\nu + 1) - (\nu + 3)\rho^2] \quad (9.47a)$$

$$m_{\varphi\varphi}(\rho) = \frac{pR^2}{16} [(\nu + 1) - (3\nu + 1)\rho^2] \quad \sigma_{\varphi\varphi}(\rho) = \frac{3pR^2}{8h^2} [(\nu + 1) - (3\nu + 1)\rho^2] \quad (9.47b)$$

$$m_{r\varphi}(\rho) = 0 \quad \sigma_{r\varphi}(\rho) = 0 \quad (9.47c)$$

$$q_r(\rho) = -\frac{pR}{2}\rho \quad \sigma_{rz}(\rho) = -\frac{3pR}{4h^2}\rho \quad (9.47d)$$

$$q_\varphi(\rho) = 0 \quad \sigma_{\varphi z}(\rho) = 0 \quad (9.47e)$$

Dabei wird im Falle der Radial- und Tangentialspannungen $\sigma_{rr}(\rho, z)$ und $\sigma_{\varphi\varphi}(\rho, z)$ die Spannung am Plattenrand mit $z = h/2$ verwendet, da diese dort ihren maximalen Wert aufweisen. Im Falle der Schubspannung $\sigma_{rz}(\rho, z)$ liegt das Maximum stets in der Plattenmittelebene mit $z = 0$. Die Kenntnis über die wirkenden Spannungen ermöglicht über Vergleichsspannungen die Beurteilung der Festigkeit einer Platte. Beispielsweise kann die Gestaltänderungshypothese (auch Gestaltänderungsenergiehypothese oder von Mises-Vergleichsspannung) für den vorliegenden ebenen Spannungszustand verwendet werden.

$$\sigma_V(\rho) = \sqrt{\sigma_{rr}^2(\rho) + \sigma_{\varphi\varphi}^2(\rho) - \sigma_{rr}(\rho)\sigma_{\varphi\varphi}(\rho) - 3\sigma_{rz}^2(\rho)} \quad (9.48)$$

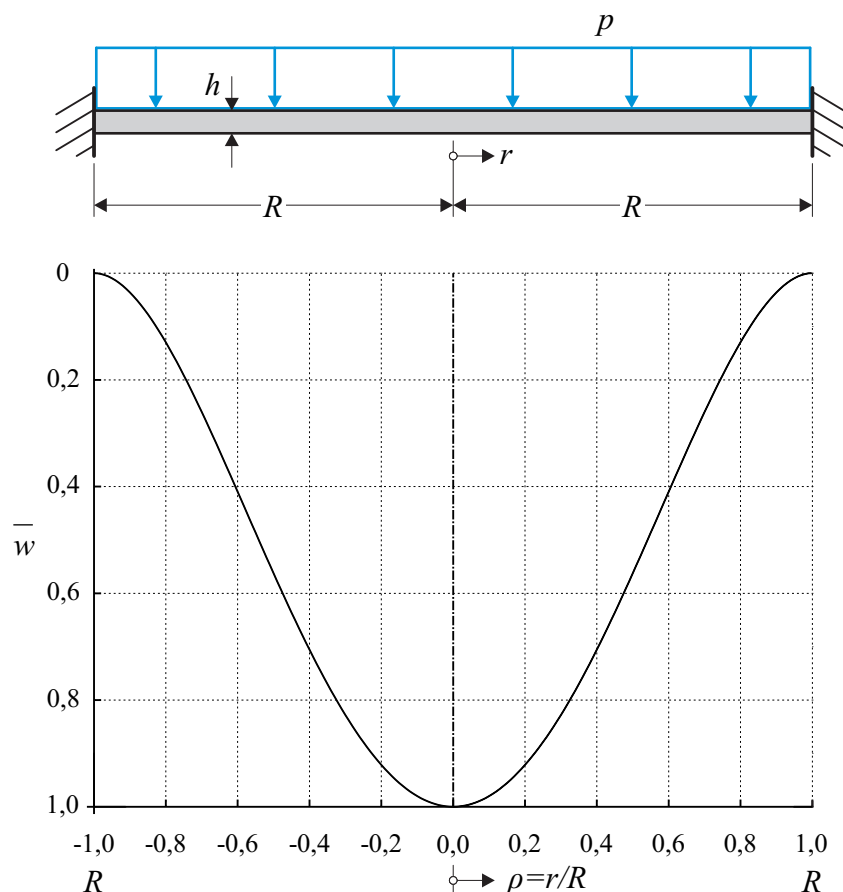


Abbildung 9.11: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte konstanter Plattendicke mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Vollflächenlast und resultierende, normierte Durchbiegung.

Kritische Spannungen für ein spezifisches flexibles Element unter definierter Belastung können damit ermittelt werden. Die analytische Formulierung birgt damit das Potential analytischer Optimierungen.

Der Einfluss einer Teilflächenlast mit der dimensionslosen Abschnittsgrenze $\beta = b/R$ ist aus Gleichung (9.32) bekannt. Wiederum bezogen auf die maximale Durchbiegung einer Platte unter Vollast, was identisch mit einer Teilflächenlast mit der Abschnittsgrenze $\beta = 1$ ist, lässt sich die dimensionslose Durchbiegung $\bar{w}(\rho)$ bei verschiedenen Teilflächenbelastungen wie in Abbildung 9.12 darstellen.

Betrachtet man die Plattenmitte für $\rho = 0$ so lässt sich aus der analytischen Lösung der Einfluss der Teilflächenlast deutlich erkennen, worin einer der Vorteile analytischer Lösungen gegenüber numerischen Lösungen liegt.

$$\bar{w}(\rho = 0) = (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4) \quad (9.49)$$

Auch für diesen Lastfall lassen sich die Ersatzkräfte und Spannungen formulieren. Die Abhängigkeit dieser Größen von der Durchbiegung wurde bereits in Gleichung (9.21) bzw. Gleichung (9.47) gezeigt und die Anpassung der Lösung an verschiedene Lastfälle in den vorangehenden Abschnitten demonstriert. Eine ausführliche Formulierung sämtlicher Ersatzkräfte und Spannungen wurde wie bereits erwähnt im Rahmen dieser Arbeit in MATLAB umgesetzt.

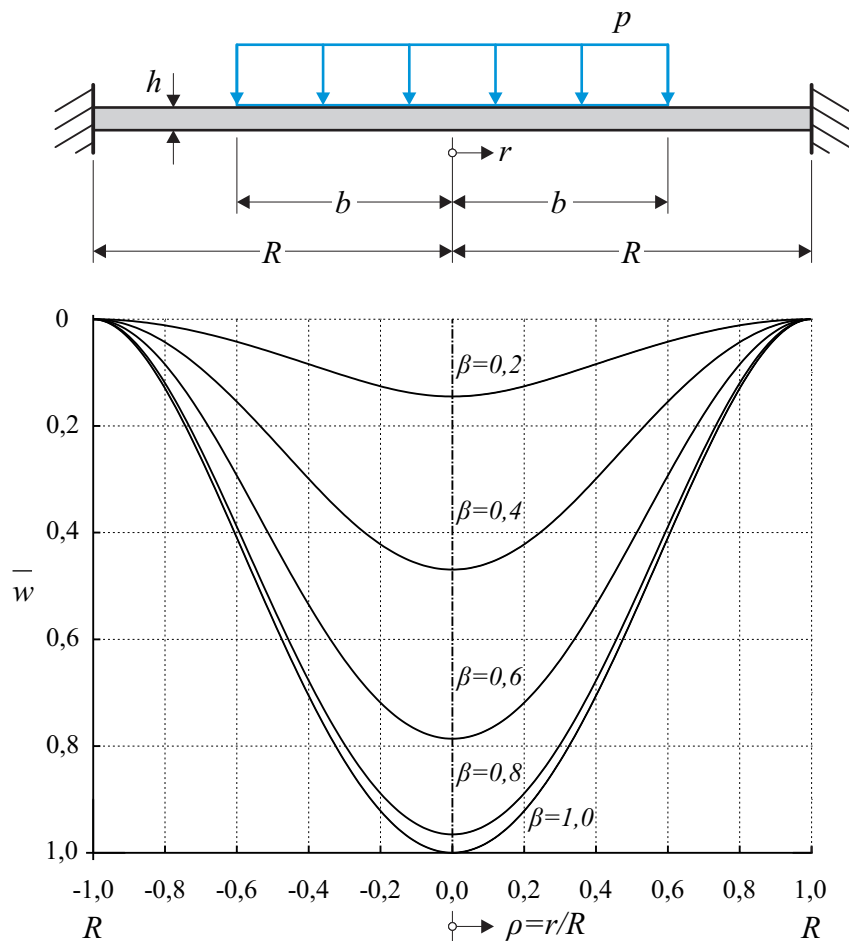


Abbildung 9.12: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte konstanter Plattendicke mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Teilflächenlast und resultierende, normierte Durchbiegung bei verschiedenen Teilflächenlasten.

Speziell bei Plattenproblemen mit mehreren Abschnitten werden die allgemeinen Lösungen relativ umfangreich und lassen sich nicht zwingend übersichtlich darstellen. Da das prinzipielle Vorgehen gezeigt wurde, wird auf eine solche Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

Die vorliegende analytische Beschreibung von Plattenproblemen erlaubt prinzipiell eine optimierte Auslegung des flexiblen Elements. Die Kombination aus Dimensionierung des flexiblen Elements, der Eigenschaften der Belastung und der resultierenden mechanischen Eigenschaften sowie der Durchbiegung führt zu einer multidisziplinären Entwurfsoptimierung (MDO, Multidisciplinary Design Optimization), für die im Rahmen dieser Arbeit erste Grundlagen geschaffen wurden.

10 Verifikation des Modells durch reale Messungen

Um das analytische Modell zu verifizieren, soll das mechanische Verhalten des flexiblen Elements, speziell die Steifigkeit, messtechnisch erfasst werden. Die Verifikation findet dabei hinsichtlich zweier Hauptkriterien, dem qualitativen und dem quantitativen Abgleich von Berechnungsergebnissen des Modells mit erfassten Messwerten, statt. Zum einen stellt sich die Frage, ob sich die aus dem analytischen Modell propagierte konstante Steifigkeit qualitativ im Rahmen der Messung nachweisen lässt und ob sich qualitative Änderungen hinsichtlich der Geometrie des flexiblen Elements in Messungen so widerspiegeln wie im analytischen Modell. Zum anderen stellt sich die Frage, inwieweit eine quantitative Übereinstimmung von Messwerten und Berechnungsergebnissen des Modells ermittelt werden kann.

Um Messergebnisse möglichst direkt auf die Realität übertragen zu können, ist es von Bedeutung, die Realität im analytischen Modell möglichst exakt abzubilden und gleichzeitig mit der Messung die tatsächlich zu messende Größe, die Steifigkeit des flexiblen Elements, möglichst exakt zu messen. Die Steifigkeit eines spezifischen flexiblen Elements als das Verhältnis aus eingebrachter Belastung und resultierender Deformation ist eine Größe, die sich nicht direkt messen lässt, sondern aus zwei separat zu bestimmenden Größen, der eingebrachten Belastung und der resultierenden Deformation, kombiniert wird. Im realen Aufbau als Dosiersystem lassen sich allerdings auch diese beiden Größen nicht ohne Weiteres direkt bestimmen. Daher ist, wie bereits beschrieben, eine Modifikation des Dosiersystems für einen geeigneten Messaufbau notwendig. Dies ist einerseits durch die Vernachlässigung der externen Kraft durch den Piezoaktor oder durch die Vernachlässigung der Belastung durch das Fluid möglich. Anders ausgedrückt, ist dies einerseits durch die Berücksichtigung der Belastung durch das Fluid und andererseits durch die Berücksichtigung der externen Kraft isoliert voneinander möglich. In beiden Fällen kann das analytische Modell an die Gegebenheiten angepasst werden und bei der konstruktiven Umsetzung müssen keinerlei Modifikationen an der Lagerung funktionsrelevanter Komponenten vorgenommen werden.

10.1 Verifikation anhand einer Platte bei Belastung durch das Fluid

Die Vernachlässigung der externen Kraft durch den Piezoaktor ermöglicht es, im Aufbau auf den Einsatz dieses Piezoaktors und damit verbunden auch auf dessen Lagerung zu verzichten. Anstelle des Piezoaktors kann, wie in Abbildung 10.1 skizziert, ein exter-

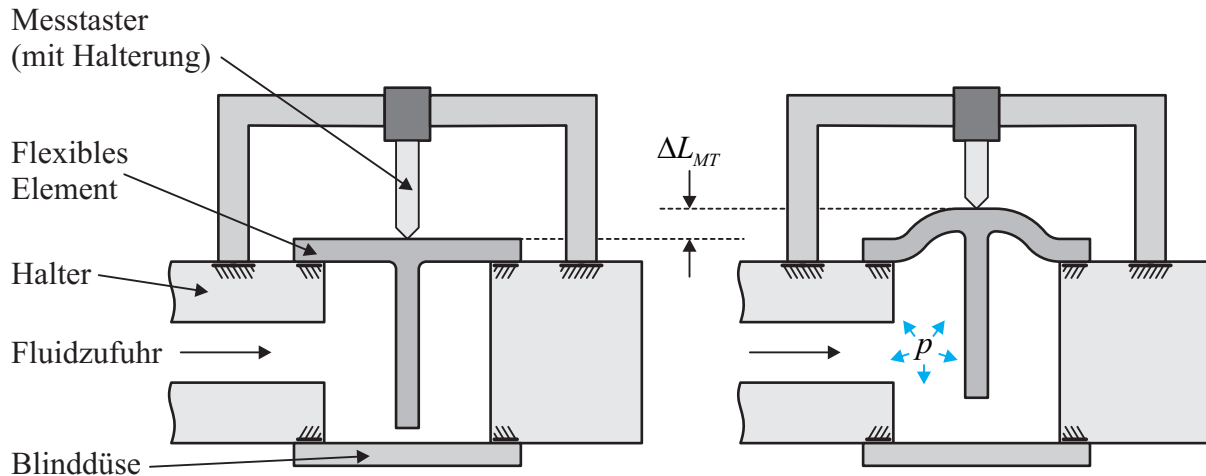


Abbildung 10.1: Prinzip zur messtechnischen Bestimmung der Steifigkeit des flexiblen Elements unter Vernachlässigung der externen Kraft durch den Piezoaktor. Ausgehend vom unbelasteten Fall (links) ruft der Druck des Fluids im belasteten Fall (rechts) eine Auslenkung des flexiblen Elements hervor. Die erzeugte Kraft wird indirekt durch einen Drucksensor und die resultierende Auslenkung durch einen Messtaster ermittelt.

ner Messtaster eingesetzt werden und die Deformation des flexiblen Elements aufgrund der Belastung durch das Fluid ermittelt werden. Anstelle einer Austrittsdüse kann eine Blinddüse eingesetzt werden, um das System abzudichten, so dass ein Druck innerhalb des Dosiersystems aufgebaut werden kann, ohne durch den Austritt von Flüssigkeit beeinflusst zu werden. Zur Erzeugung des Drucks eignet sich eine externe Pumpe oder etwa eine Plastifiziereinheit einer Spritzgussmaschine.

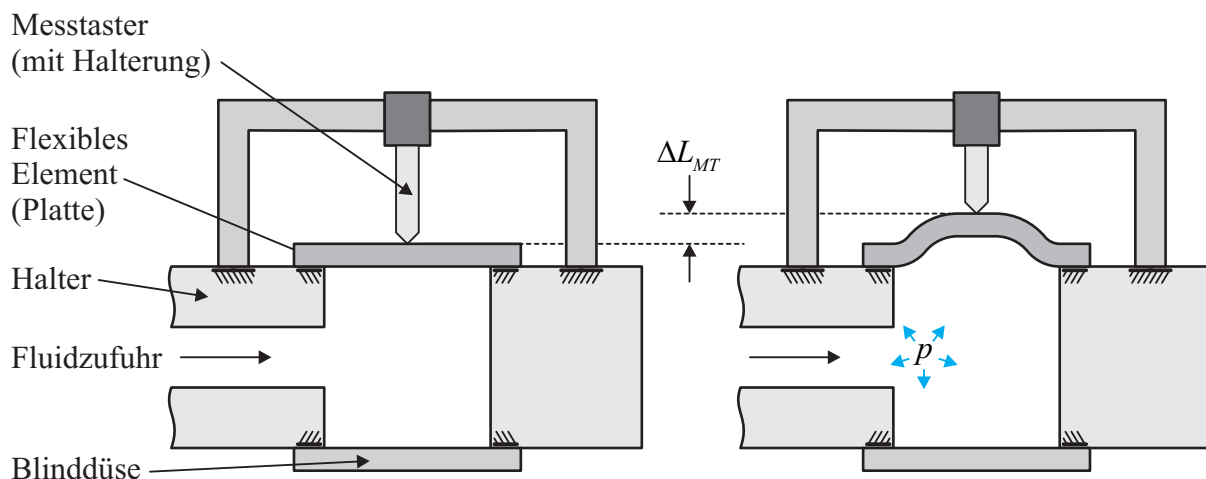


Abbildung 10.2: Prinzip zur messtechnischen Bestimmung der Steifigkeit einer Platte als vereinfachtes flexibles Element ohne Stößel unter Vernachlässigung der externen Kraft durch den Piezoaktor. Ausgehend vom unbelasteten Fall (links) ruft der Druck des Fluids im belasteten Fall (rechts) eine Auslenkung der Platte hervor. Die erzeugte Kraft wird indirekt durch einen Drucksensor und die resultierende Auslenkung durch einen Messtaster ermittelt.

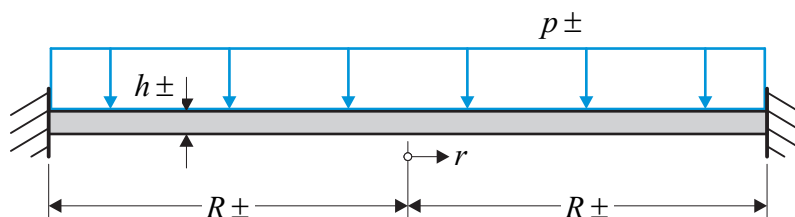


Abbildung 10.3: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Vollflächenlast mit toleranzbehafteten Parametern: Plattendicke h , Plattenradius R und Belastung p .

Hinsichtlich der Geometrie des flexiblen Elements kann, wie in Abbildung 10.2 angedeutet, eine Vereinfachung getroffen werden. Unter Vernachlässigung des Stößels geht das flexible Element in eine Platte konstanter Plattendicke über und für die Steifigkeit c als Verhältnis der Belastung F und der Auslenkung w lässt sich aus Gleichung (9.14) und Gleichung (9.28) folgender Zusammenhang formulieren:

$$\begin{aligned}
 w(\rho) &= \frac{pR^4}{64K} (1 - \rho^2)^2 \\
 w_{rel}(\rho) &= w(\rho = 0) = \frac{pR^4}{64K} \\
 F &= p\pi R^2 \\
 c &= \frac{F}{w_{rel}(\rho)} = \frac{64\pi K}{R^2} \quad \text{mit} \quad K = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \frac{h^3}{12}
 \end{aligned} \tag{10.1}$$

10.1.1 Vorüberlegungen zur Messung

Der zugrundeliegende Lastfall kann schematisch entsprechend Abbildung 10.3 skizziert werden. Die Durchbiegung w der Platte ist durch Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften der Platte gekennzeichnet und diese Einflussfaktoren sind in Tabelle 10.1 zusammengefasst.

Tabelle 10.1: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Durchbiegung einer Vollkreisplatte unter konstanter Vollflächenlast.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung	
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul
	ν	Querkontraktionszahl
Geometrie	h	Plattendicke
	R	Plattenradius
Belastung	p	Druck
	R	Radius der Flächenbelastung

Diese Parameter aus Tabelle 10.1 sind, wie in Abbildung 10.3 angedeutet, in der Realität mit Toleranzen behaftet, was für quantitative Betrachtungen eine wichtige Rolle spielt.

Aus Gleichung (10.1) geht hervor, dass die Steifigkeit c in diesem Fall unabhängig von der wirkenden Belastung p ist und sich durch einen Geometrieparameter G und einen Werkstoffparameter κ ausdrücken lässt. Geht man davon aus, dass für die Werkstoffparameter, den Elastizitätsmodul E sowie die Querkontraktionszahl ν , exakte Werte vorliegen, handelt es sich dabei um einen konstanten Werkstoffparameter κ . Betrachtet man dagegen die geometrischen Eigenschaften der Platte, die Plattendicke h und der Plattenradius R bzw. der Radius der Flächenbelastung R , als toleranzbehaftet, so kann für den Geometrieparameter G eine größenabhängige Toleranz angegeben werden.

$$c = \frac{64\pi}{R^2} \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h^3}{12} = \frac{h^3}{R^2} \frac{64\pi E}{12(1-\nu^2)} = G \kappa \quad (10.2)$$

mit $G = \frac{h^3}{R^2}$ und $\kappa = \frac{64\pi E}{12(1-\nu^2)}$

Am Beispiel einer Platte mit der Soll-Plattendicke h von 1 mm und einem Soll-Plattenradius R von 7 mm sind diese geometrischen Toleranzen entsprechend der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-f [9] in Tabelle 10.2 aufgeführt.

Tabelle 10.2: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Steifigkeit einer Vollkreisplatte unter konstanter Vollflächenlast mit Werten und Toleranzen.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung	Soll-Wert	Toleranz
Werkstoff	E Elastizitätsmodul	210.000 N/mm ²	-
	ν Querkontraktionszahl	0,29	-
Geometrie	h Plattendicke	1,00 mm	±0,05 mm
	R Plattenradius	7,00 mm	±0,05 mm
Belastung	p Druck	100,00 bar	±6,25 bar
	R Radius der Flächenbelastung	7,00 mm	±0,05 mm

Bei Betrachtung ungünstiger Kombinationen dieser Toleranzen kann dies für den Geometrieparameter G zu Abweichungen von ±18% führen, was sich so demnach auch in der Toleranz der Steifigkeit c widerspiegelt. Durch messtechnische Bestimmung der tatsächlichen Geometriegrößen mit handelsüblichen Messschiebern lassen sich die Geometrieparameter h und R auf ±0,01 mm genau bestimmen und unter Berücksichtigung dessen können für den Geometrieparameter G Abweichungen von ±4% angegeben werden.

In der Realität ist die Messung der Steifigkeit wie eingangs erläutert nicht direkt möglich, sondern setzt sich aus einer eingebrachten Belastung p und der resultierenden Auslenkung w zusammen. Diese beiden Größen sind wiederum mit Fehlern behaftet. Für die Bestimmung dieser Größen kommt dabei als Drucksensor das Modell MJ-1-H-B25C-2-1-NJ-N der Firma Gefran mit einem Messbereich von 0 bar bis 2500 bar und einer Genauigkeit von ±6,25 bar und als Messtaster der Typ MT1281 der Firma DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH mit einer Systemgenauigkeit von ±0,2 µm bei einem Messweg von 0 mm bis 12 mm zum Einsatz.

Am Beispiel einer Platte mit den in Tabelle 10.3 aufgeführten Kennwerten führt dies bei Anwendung von Gleichung (10.1) entsprechend Gleichung (10.3) unter Annahme idealer

Tabelle 10.3: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Steifigkeit einer Vollkreisplatte unter konstanter Vollflächenlast mit Werten und Toleranzen.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung		Soll-Wert	Toleranz
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul	210.000 N/mm ²	-
	ν	Querkontraktionszahl	0,29	-
Geometrie	h	Plattendicke	1,00 mm	$\pm 0,01$ mm
	R	Plattenradius	7,00 mm	$\pm 0,01$ mm
Belastung	p	Druck	100,00 bar	$\pm 6,25$ bar
	R	Radius der Flächenbelastung	7,00 mm	$\pm 0,01$ mm

Werkstoffeigenschaften zu einer idealen Steifigkeit c und einer messtechnisch ermittelten Steifigkeit c_m mit einer Abweichung in einem Bereich von etwa $\pm 8\%$ von der idealen Steifigkeit:

$$w = \frac{pR^4}{64} \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} = \frac{(100 \text{ bar})(7 \text{ mm})^4}{64} \frac{12(1-0,29^2)}{(210.000 \text{ N mm}^{-2})(1 \text{ mm})^3} = 19,6 \mu\text{m}$$

$$c = \frac{F}{w} = \frac{p\pi R^2}{w} = \frac{(100 \text{ bar}) \pi (7 \text{ mm})^2}{19,6 \mu\text{m}} = 78,4 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$$

$$\rightarrow c_m = \frac{F_m}{w_m} = \frac{p_m \pi R_m^2}{w_m} = \frac{(100 \pm 6,25 \text{ bar}) \pi (7 \pm 0,01 \text{ mm})^2}{19,6 \pm 0,2 \mu\text{m}} \approx c \pm 8\% \quad (10.3)$$

Dies dient damit einerseits als Grundlage für Überlegungen, in welchem Wertebereich sich die Auslenkungen der Platte bewegen können und andererseits als Abschätzung, mit welcher Genauigkeit diese Werte, insbesondere bei deren Kombination zur Steifigkeit, ermittelt werden können.

10.1.2 Hypothesen zur Messung

Im Rahmen von Messungen der Durchbiegung von Platten mit konstanter Dicke bei Variation der Belastung p , ausgehend von 100 bar in Schritten von 50 bar, wird qualitativ, wie in Abbildung 10.4 angedeutet, ein linearer Zusammenhang zwischen der eingebrachten Belastung p und der resultierenden Auslenkung w erwartet. Dies bedeutet demnach, dass eine konstante Steifigkeit erwartet wird.

Dies wird als erfüllt betrachtet, wenn sich die Abweichung zwischen analytisch berechnetem Wert und Messwert in Anlehnung an die ermittelte Abweichung in Gleichung (10.3) in einem Bereich von $\pm 10\%$ vom berechneten Wert bewegt.

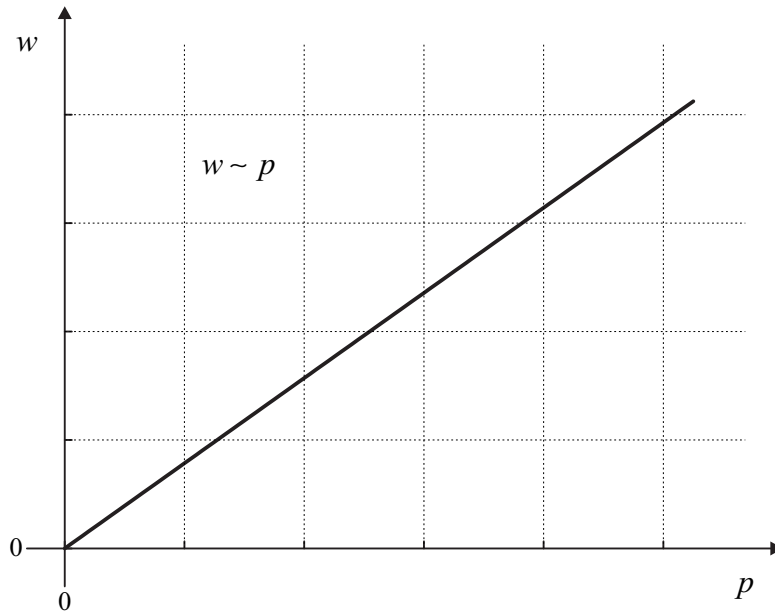


Abbildung 10.4: Qualitativ erwarteter Zusammenhang zwischen der Auslenkung w der Platte und der eingebrachten Belastung durch den Druck p .

10.1.3 Durchführung der Messung

Für eine Messung wird eine Platte konstanter Dicke wie in Abbildung 10.2 skizziert im Dosiersystem verwendet und eine Blinddüse eingesetzt. Mittels der Plastifiziereinheit ARBURG Allrounder der Firma ARBURG GmbH + Co KG wird eine Kunststoffschmelze unter Druck über die Schnecke der Plastifiziereinheit in das Dosiersystem gefördert. Der Druck wird über die interne Regelung der Plastifiziereinheit eingestellt und geregelt. Durch den Verschluss des Dosiersystems mit einer Blinddüse kann so ein quasistatischer Druck aufgebaut werden und mit dem Drucksensor, Modell MJ-1-H-B25C-2-1-NJ-N der Firma Gefran, gemessen und über die interne Schnittstelle der Plastifiziereinheit ausgelesen werden. Die Auslenkung der Platte aufgrund des wirkenden Drucks wird mit dem Messtaster, Typ MT1281 der Firma DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, bestimmt.

Um einen konstanten Druck innerhalb des Dosiersystems aufzubauen, wird die Schnecke innerhalb der Plastifiziereinheit druckgeregelt betrieben. Die Schnecke erfüllt dabei neben der Plastifizierung der Kunststoffschmelze den Zweck, verflüssigten Kunststoff, ähnlich einem Kolben, in eine Kavität zu fördern. Um eine solche Schnecke bzw. einen Kolben bewegen zu können, ist ein Spalt zwischen dem bewegten Element und der Kanalinnengeometrie notwendig. Dieser Spalt wiederum ermöglicht das Rückströmen der Kunststoffschmelze entgegen der Verfahrrichtung. Obwohl ein konstanter Druck in einem abgeschlossenen System erzeugt werden soll, ist also ein Verfahren der Schnecke der Plastifiziereinheit notwendig.

Durch den erforderlichen Verfahrensweg der Schnecke werden Vibrationen der Plastifiziereinheit hervorgerufen, die auf das Dosiersystem übertragen werden. Im Zuge der Messungen der Auslenkung der Platte bei einem gewünschten Druck von 100 bar hat sich gezeigt, dass diese Vibrationen in einem Bereich von $\pm 40 \mu\text{m}$ liegen [79]. Eine klare Abhängigkeit dieser Vibrationen von der Position der Schnecke oder des eingestellten Drucks konnte dabei nicht festgestellt werden.

10.1.4 Interpretation der Messung

Die Messwerte für die Auslenkung der Platte bei einem konstanten Druck von 100 bar sind Schwankungen von $\pm 40 \mu\text{m}$ unterlegen. Diese Schwankungen sind betragsmäßig größer als die erwartete Auslenkung bei Erhöhung des Drucks um 50 bar.

Damit kann festgestellt werden, dass mit diesem Aufbau unter Verwendung der Plastifiziereinheit keine geeigneten Messungen zur Verifikation des Modells durchgeführt werden können.

10.2 Verifikation anhand einer Platte bei Belastung durch externe Kraft

Eine andere, bereits kurz skizzierte Möglichkeit zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens einer Platte, stellt die Vernachlässigung der Belastung durch das Fluid dar und beschränkt sich auf die Belastung durch den Piezoaktor. Das Dosiersystem wird dabei, wie in Abbildung 10.5 schematisch gezeigt, ohne Fluid betrieben. Anstelle einer Austrittsdüse bzw. einer Blinndüse wird ein Messtaster so montiert, dass die Durchbiegung einer Platte erfasst werden kann.

Dieser Lastfall lässt sich schematisch, wie in Abbildung 10.6 gezeigt, darstellen und die Durchbiegung der Platte sowie deren Steifigkeit lassen sich aus dem analytischen Modell ableiten. Mit der dimensionslosen Abschnittsgrenze $\beta = b/R$ für die Unterteilung der Platte in einen belasteten und einen unbelasteten Bereich dienen hierfür Gleichung (9.14) und Gleichung (9.33) für Vollkreisplatten mit Teilflächenlast als Grundlage und es lässt sich formulieren:

$$w(\rho) = \begin{cases} \frac{pR^4}{64K} [\beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4) - 2\beta^2 (\beta^2 - 4 \ln \beta) \rho^2 + \rho^4] & 0 \leq \rho < \beta \\ \frac{pR^4}{32K} \beta^2 [(2 + \beta^2) (1 - \rho^2) + 2(\beta^2 + 2\rho^2) \ln \rho] & \beta \leq \rho \leq 1 \end{cases}$$

$$w_{rel}(\rho) = w(\rho = 0) = \frac{pR^4}{64K} [\beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)]$$

$$F = p\pi\beta^2 R^2$$

$$c = \frac{F}{w_{rel}(\rho)} = \frac{64\pi K}{R^2} \frac{1}{(\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)} \quad \text{mit} \quad K = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \frac{h^3}{12} \quad (10.4)$$

Für die relevante Durchbiegung w der Platte wird bei der Betrachtung der Steifigkeit wiederum die Durchbiegung in der Plattenmitte angenommen. Die Durchbiegung an anderen Stellen, insbesondere im nicht belasteten Bereich, sind damit hierfür nicht relevant und die Steifigkeit lässt sich übersichtlich angeben.

10.2.1 Vorüberlegungen zur Messung

Der nun zugrundeliegende Lastfall kann wiederum schematisch entsprechend Abbildung 10.6 skizziert werden. Die Durchbiegung w der Platte ist durch Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften der Platte gekennzeichnet und diese Einflussfaktoren sind in Tabelle 10.4 zusammengefasst.

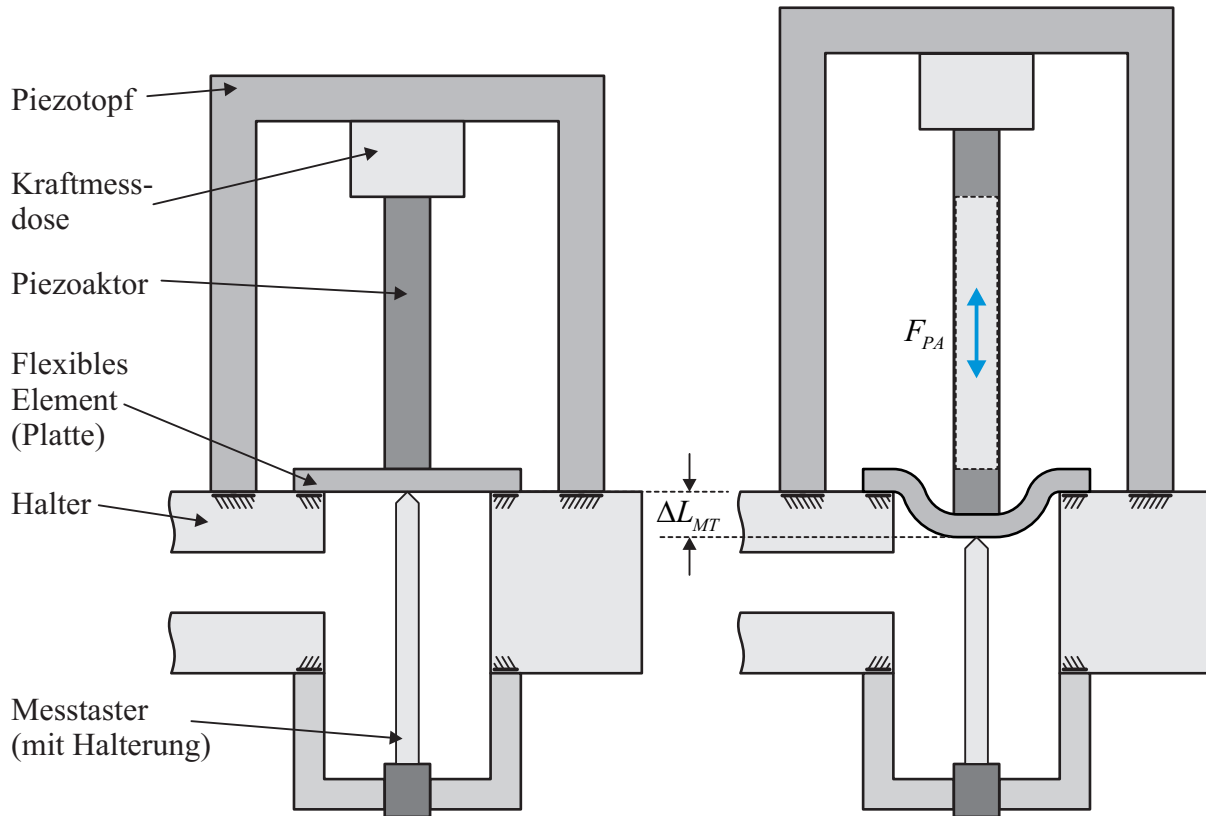


Abbildung 10.5: Prinzip zur messtechnischen Bestimmung der Steifigkeit einer Platte als vereinfachtes flexibles Element ohne Stößel unter Vernachlässigung der Belastung durch das Fluid. Ausgehend vom unbelasteten Fall (links) ruft der aktivierte Piezoaktor im belasteten Fall (rechts) eine Auslenkung der Platte hervor. Die erzeugte Kraft wird durch eine Kraftmessdose und die resultierende Auslenkung durch einen Messtaster ermittelt.

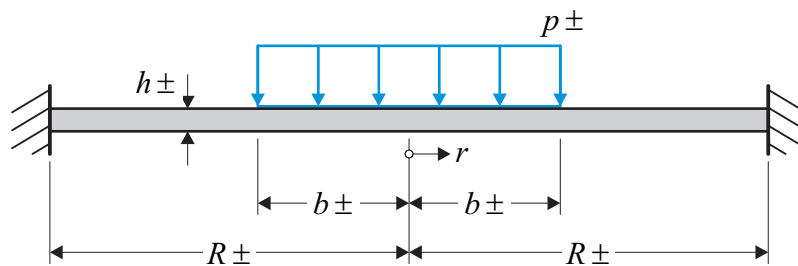


Abbildung 10.6: Rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Teilflächenlast mit toleranzbehafteten Parametern: Plattendicke h , Plattenradius R , Belastung p und Begrenzung der Teilflächenlast b .

Wie bei der vorherigen Betrachtung kann auch hier die Steifigkeit c der Platte durch einen Geometrieparameter G und einen Werkstoffparameter κ ausgedrückt werden:

$$c = \frac{64\pi}{R^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)} \frac{E}{(1 - \nu^2)} \frac{h^3}{12} = \frac{h^3}{R^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)} \frac{64\pi E}{12 (1 - \nu^2)} = G \kappa$$

mit $G = \frac{h^3}{R^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)}$ und $\kappa = \frac{64\pi E}{12 (1 - \nu^2)}$ (10.5)

Tabelle 10.4: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Durchbiegung einer Vollkreisplatte unter konstanter Teilflächenlast.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung	
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul
	ν	Querkontraktionszahl
Geometrie	h	Plattendicke
	R	Plattenradius
Belastung	p	Druck
	b	Radius der Teilflächenbelastung
	F	resultierende Kraft

Am Beispiel einer Platte mit der Soll-Plattendicke h von 1 mm, einem Soll-Plattenradius R von 7 mm und einem Soll-Radius der Teilflächenbelastung b von 4 mm mit geometrischen Toleranzen von jeweils $\pm 0,01$ mm entsprechend Tabelle 10.5 führt dies durch Verkettung ungünstiger Kombinationen dieser Toleranzen für den Geometrieparameter G zu Abweichungen von $\pm 4\%$.

Tabelle 10.5: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Steifigkeit einer Vollkreisplatte unter konstanter Teilflächenlast mit Werten und Toleranzen.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung		Soll-Wert	Toleranz
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul	210.000 N/mm ²	-
	ν	Querkontraktionszahl	0,29	-
Geometrie	h	Plattendicke	1,00 mm	$\pm 0,01$ mm
	R	Plattenradius	7,00 mm	$\pm 0,01$ mm
Belastung	p	Druck	100,00 bar	$\pm 6,25$ bar
	b	Radius der Flächenbelastung	4,00 mm	$\pm 0,01$ mm
	F	resultierende Kraft	502,7 N	± 15 N

Um einen Richtwert für die zu erwartenden Messwerte anzugeben und gleichzeitig die Vergleichbarkeit mit dem vorherigen Lastfall zu gewährleisten, wird wiederum die Steifigkeit dieser Platte bei einer Belastung mit einem Druck p von 100 bar betrachtet. Da die Belastung durch den Piezoaktor erzeugt und in Form einer Kraft von der Kraftmessdose vom Typ 9311B der Firma Kistler Instrumente GmbH mit einem Messbereich von ± 5 kN und einer Genauigkeit von ± 15 N gemessen wird, wird für die analytische Modellierung der Druck p durch eine resultierende Kraft F substituiert.

In Tabelle 10.5 sind die relevanten Parameter mit Werten und zugehörigen Toleranzen aufgeführt. Für diesen Lastfall führt dies bei Anwendung von Gleichung (10.4) entsprechend Gleichung (10.6) unter Annahme idealer Werkstoffeigenschaften zu einer idealen Steifigkeit c und einer messtechnisch ermittelten Steifigkeit c_m mit einer Abweichung in

einem Bereich von etwa $\pm 5\%$ von der idealen Steifigkeit:

$$w = \frac{pR^4}{64} [\beta^2 (\beta^2 (4 \ln \beta - 3) + 4)] \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} \quad ; \text{ mit } \beta = \frac{b}{R} = \frac{4 \text{ mm}}{7 \text{ mm}} = \frac{4}{7}$$

$$= \frac{(100 \text{ bar})(7 \text{ mm})^4}{64} \left[\left(\frac{4}{7}\right)^2 \left(\left(\frac{4}{7}\right)^2 \left(4 \ln \frac{4}{7} - 3\right) + 4 \right) \right] \frac{12(1-0,29^2)}{(210.000 \text{ N mm}^{-2})(1 \text{ mm})^3}$$

$$w = 14,7 \mu\text{m}$$

$$c = \frac{F}{w} = \frac{p\pi\beta^2 R^2}{w} = \frac{(100 \text{ bar}) \pi \left(\frac{4 \text{ mm}}{7 \text{ mm}}\right)^2 (7 \text{ mm})^2}{14,7 \mu\text{m}} = \frac{502,7 \text{ N}}{34,2 \mu\text{m}} = 34,2 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$$

$$\rightarrow c_m = \frac{F_m}{w_m} = \frac{502,7 \pm 15 \text{ N}}{14,7 \pm 0,2 \mu\text{m}} \approx c \pm 5\% \quad (10.6)$$

Dies dient damit einerseits als Grundlage für Überlegungen, in welchem Wertebereich sich die Auslenkungen der Platte bewegen können und andererseits als Abschätzung, mit welcher Genauigkeit diese Werte, insbesondere bei deren Kombination zur Steifigkeit, ermittelt werden können.

10.2.2 Hypothesen zur Messung

Im Rahmen von Messungen der Durchbiegung von Platten mit konstanter Dicke bei schrittweiser Erhöhung der Belastung F wird qualitativ, wie in Abbildung 10.7 angedeutet, ein linearer Zusammenhang zwischen der eingebrachten Belastung F und der resultierenden Auslenkung w erwartet. Dies bedeutet demnach, dass eine konstante Steifigkeit erwartet wird.

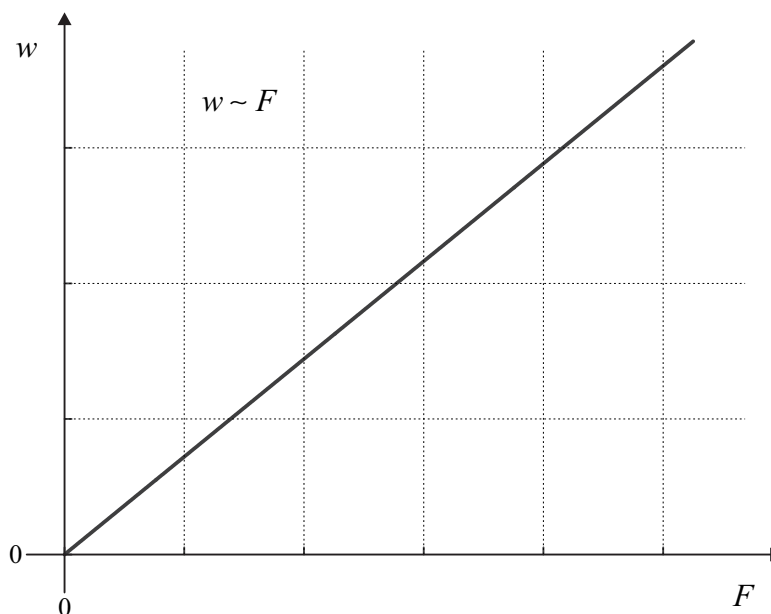


Abbildung 10.7: Qualitativ erwarteter Zusammenhang zwischen der Auslenkung w der Platte und der eingebrachten Belastung durch die Kraft F .

Die Steifigkeit bei gegebener Belastung ist von den Geometrie- und Werkstoffeigenschaften der Platte abhängig. Hält man sämtliche Einflussfaktoren konstant und variiert lediglich

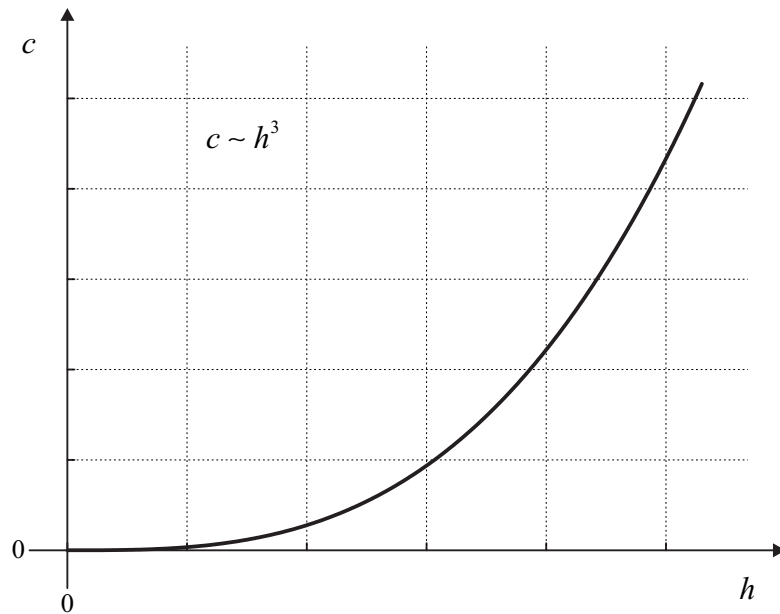


Abbildung 10.8: Qualitativ erwarteter Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und der Plattendicke h .

die Plattendicke h , so wird ein kubischer Zusammenhang zwischen der Plattendicke h und der Steifigkeit c erwartet. Bei Verdopplung der Plattendicke ist demnach mit einer Erhöhung der Steifigkeit um Faktor Acht zu rechnen. Diese Erwartung ist qualitativ in Abbildung 10.8 dargestellt.

Einen anderen geometrischen Einflussfaktor stellt der Radius R der Platte dar. Wird die Kraft des Piezoaktors stets über die gleiche Fläche in eine Platte eingebracht, also der Radius b der Teilflächenbelastung konstant gehalten, und dabei der Radius R der Platte

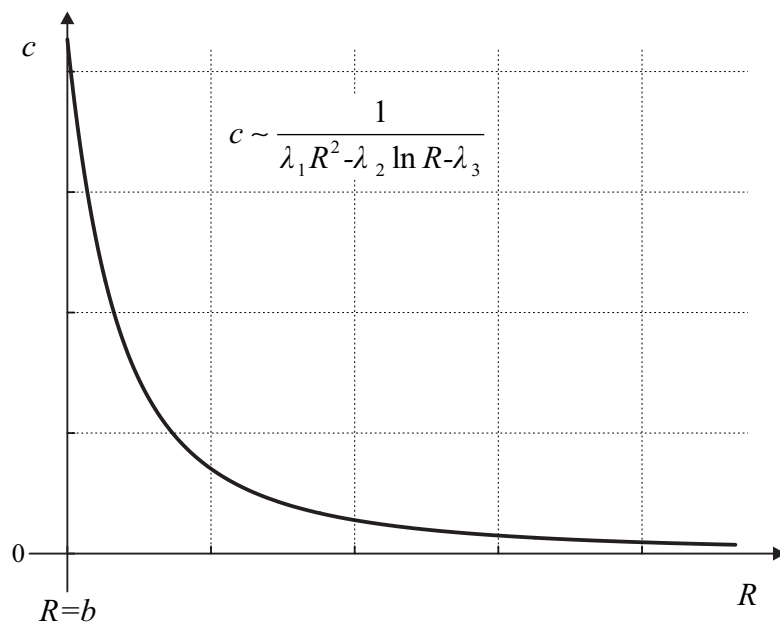


Abbildung 10.9: Qualitativ erwarteter Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und dem Plattenradius R .

variiert, so ist bei ansonsten konstanten Parametern davon auszugehen, dass die Steifigkeit c der Platte reduziert wird. Der aus der analytischen Lösung ermittelte Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c bei Vergrößerung des Plattenradius R ist qualitativ in Abbildung 10.9 gezeigt.

Die in Gleichung (10.6) angegebene Abweichung von $\pm 5\%$ von analytischer Lösung und Messung dient als Referenzwert. Bei der Variation der Plattengeometrie und der eingebrachten Kraft ist jedoch eine differenzierte Betrachtung des jeweiligen Lastfalls notwendig, um Aussagen bezüglich der zu erwartenden Genauigkeit treffen zu können. Bei Platten mit hoher Steifigkeit werden für Messungen hohe Kräfte aufgebracht und kleine Auslenkungen erwartet. Dies bedeutet, dass in diesem Fall die Messgenauigkeit bzw. Messungenauigkeit des Wegmesstasters mit $\pm 0,2\ \mu\text{m}$ gegenüber der Messgenauigkeit bzw. Messungenauigkeit der Kraftmessdose dominiert. Bei Platten mit geringer Steifigkeit wiederum ist der Sachverhalt umgekehrt. Bereits geringe Kräfte erzeugen eine große Auslenkung, so dass sich die Messgenauigkeit bzw. Messungenauigkeit der Kraftmessdose mit $\pm 15\ \text{N}$ in diesem Fall stärker auf die Gesamtgenauigkeit der Steifigkeitsmessung auswirkt. Dies spiegelt sich, wie in Gleichung (10.7) dargestellt, gleichermaßen an einer konstanten Steifigkeit wider, die aus der Kombination unterschiedlicher Kraft- und Auslenkungswerte unter Betrachtung verschiedener Toleranzen entsteht. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung des jeweiligen Lastfalls.

$$c_1 = \frac{F}{w} = \frac{100\ \text{N}}{10\ \mu\text{m}} = 10\ \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad \rightarrow \quad c_{1,m} = \frac{F_m}{w_m} = \frac{100 \pm 15\ \text{N}}{10 \pm 0,2\ \mu\text{m}} \approx c_1 \pm 17\% \quad (10.7a)$$

$$c_2 = \frac{F}{w} = \frac{1000\ \text{N}}{100\ \mu\text{m}} = 10\ \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad \rightarrow \quad c_{2,m} = \frac{F_m}{w_m} = \frac{1000 \pm 15\ \text{N}}{100\ \mu\text{m}} \approx c_2 \pm 2\% \quad (10.7b)$$

$$c_3 = \frac{F}{w} = \frac{10\ \text{N}}{1\ \mu\text{m}} = 10\ \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad \rightarrow \quad c_{3,m} = \frac{F_m}{w_m} = \frac{10\ \text{N}}{1 \pm 0,2\ \mu\text{m}} \approx c_3 \pm 25\% \quad (10.7c)$$

Bislang wurden die Werkstoffeigenschaften ohne Toleranz angenommen. In der Realität sind diese Daten jedoch ebenfalls mit einer Unsicherheit behaftet. In der Realität treten zudem weitere Effekte, wie etwa Temperaturschwankungen, auf, die eine Messung beeinflussen. Hinzu kommt die Unsicherheit bezüglich der Orte, an denen die Kraft eingeleitet wird und an denen die Auslenkung gemessen wird. Die Annahme einer festen Einspannung einer Platte am Rand sowie die Annahme, dass der Halter nicht verformt wird, sind Vereinfachungen innerhalb des Modells, die ebenfalls Abweichungen zur Realität darstellen.

Als Richtwert für Aussagen hinsichtlich der Verifikation des analytischen Modells durch den Abgleich mit Messungen wird daher eine relative Abweichung von $\pm 15\%$ bzw. eine absolute Abweichung von $\pm 10\ \text{N}/\mu\text{m}$ toleriert.

10.2.3 Durchführung der Messung

Im Zuge der Messung des mechanischen Verhaltens von Platten wird eine Kraft durch den Piezoaktor erzeugt und über eine definierte Fläche entsprechend Tabelle 10.6 in die Platte eingebracht. Zu Beginn einer Messung wird der Piezoaktor über die Vorspannschraube

vorgespannt, um eine unmittelbare Kraftübertragung sicherzustellen. Im Anschluss daran werden die Daten der Kraftmessdose und des Wegmesstasters notiert bzw. auf Null gesetzt. Ausgehend davon wird die elektrische Spannung am Piezoaktor schrittweise erhöht und nach jedem Schritt die Position des Piezoaktors, der Wert der Kraftmessdose und der Wert des Wegmesstasters ausgelesen. Somit werden Änderungen der Kraft und der Auslenkung und nicht deren absoluter Wert erfasst. Bei Erreichung der maximal zulässigen Spannung des Piezoaktors bzw. einer maximalen Kraft oder maximalen Auslenkung wird die elektrische Spannung am Piezoaktor schrittweise bis auf den Ausgangspunkt verringert. Die Daten werden über die jeweiligen Schnittstellen an einen Auswerterechner übertragen und in Form von Textdateien gespeichert. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Kommunikation zwischen Auswerterechner und Aktoren bzw. Sensoren die Software MATLAB gewählt [29, 30]. Das Ansprechen der Aktoren und Sensoren kann alternativ ebenfalls über LabVIEW, einem grafischen Programmiersystem der Firma National Instruments, umgesetzt werden [37, 65].

Tabelle 10.6: Zusammenfassung der konstanten Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Steifigkeit einer Vollkreisplatte unter konstanter Teilflächenlast mit Werten.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung		Wert
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul	210.000 N/mm ²
	ν	Querkontraktionszahl	0,29
Belastung	b	Radius der Flächenbelastung	4,00 mm

Für alle betrachteten Platten dient der gleiche Werkstoff entsprechend Tabelle 10.6 als Basis. Die Platten werden durch spanende Bearbeitung aus einem Halbzeug (Folienband) unterschiedlicher Dicke hergestellt. Die Variation der Durchmesser entsprechend Tabelle 10.7 erfolgt durch die Variation der Durchmesser der verwendeten Klemmscheiben zur Lagerung des flexiblen Elements im Dosiersystem. Für jede Platte wird die Messung zehnmal durchgeführt und daraus ein Mittelwert gebildet.

Tabelle 10.7: Geometrievariation von Vollkreisplatten unter konstanter Teilflächenlast.

Plattendicke h [mm]	Plattenradius R [mm]
0,80	7,25
0,80	8,25
0,80	9,45
0,80	10,30
1,36	7,25
1,36	8,25
1,36	9,45
1,36	10,30

Aus den i Messpaaren mit den Auslenkungen w_i und den eingebrachten Kräften F_i beim Durchfahren eines Belastungszyklus einer Platte wird über eine lineare Regression eine

Ursprungsgerade angenähert, die der Steifigkeit c der Platte entspricht. Dabei wird als unabhängige Variable die Auslenkung w_i und als abhängige Variable die Kraft F_i betrachtet. Mit dem Bestimmtheitsmaß B (zur Vermeidung von Verwechslung mit dem Plattenradius R im Rahmen dieser Arbeit als B und nicht wie üblich als R^2 bezeichnet) kann diese lineare Regression bewertet werden. Das Bestimmtheitsmaß B kann Werte von 0 bis 1 annehmen. Ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0$ bedeutet dabei, dass kein linearer Zusammenhang zwischen unabhängiger und abhängiger Variable vorliegt, während ein Bestimmtheitsmaß von $B = 1$ bedeutet, dass deren Zusammenhang exakt linear ist.

$$c_m = \frac{\sum_{i=1}^n w_i F_i}{\sum_{i=1}^n w_i^2} \quad ; \quad B = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i F_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2 \sum_{i=1}^n F_i^2} \quad (10.8)$$

10.2.4 Interpretation der Messung

Im Zuge der Messungen werden insgesamt acht Lastfälle bei konstantem Radius der Flächenbelastung b unter Variation der Plattendicke h und des Plattenradius R entsprechend Tabelle 10.6 und Tabelle 10.7 betrachtet. Da jeder dieser Lastfälle mehrfach, mindestens zehnmals, vermessen wird und dabei jeweils über hundert Wertepaare erfasst werden, werden im Folgenden lediglich einige Messungen exemplarisch vorgestellt.

In Abbildung 10.10 sind Messdaten der Auslenkung w_i der Platte und der eingebrachten Kraft F_i bei einer Plattendicke von $h = 0,80$ mm und einem Plattenradius von $R = 9,45$ mm gegeneinander aufgetragen. In vielen Darstellungen, beispielsweise bei Schraubenfedern, wird die Kraft als Funktion der Auslenkung aufgetragen. Dabei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass eine Auslenkung erzwungen wird und die dafür

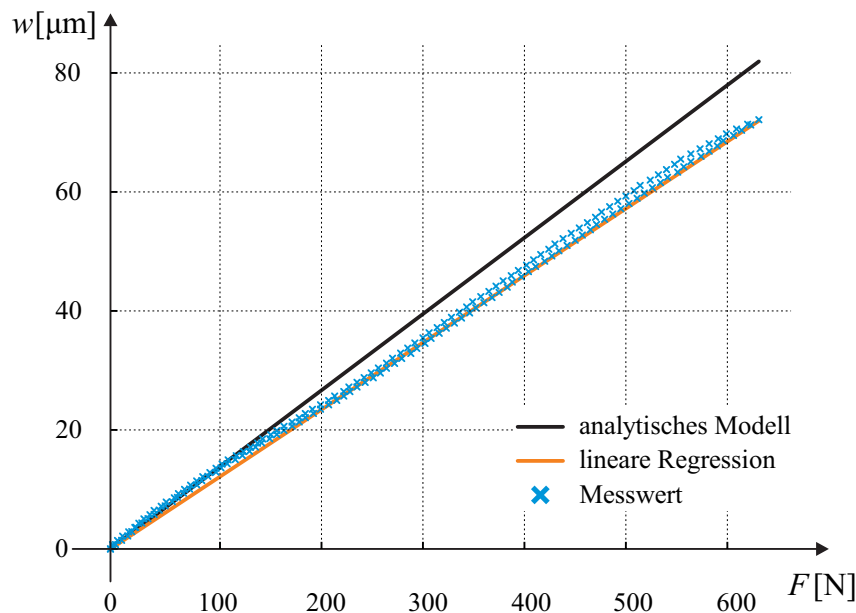


Abbildung 10.10: Zusammenhang zwischen der Auslenkung w der Platte mit $h = 0,80$ mm, $R = 9,45$ mm, $b = 4,00$ mm und der eingebrachten Belastung durch die Kraft F mit der berechneten Steifigkeit $c_a = 7,8$ N/ μm aus dem analytischen Modell und der aus Messdaten über lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von $B > 0,99$ ermittelten Steifigkeit $c_m = 8,9$ N/ μm .

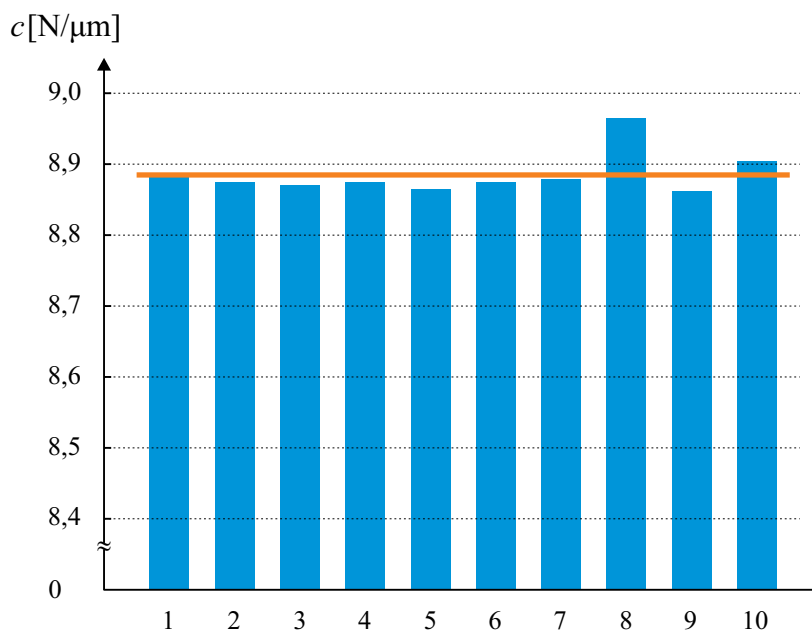


Abbildung 10.11: Zehn über lineare Regression der Messdaten ermittelte Steifigkeiten der Platte mit $h = 0,80$ mm, $R = 9,45$ mm, $b = 4,00$ mm mit einem Mittelwert von $\bar{c}_m = 8,9$ N/μm und einer Standardabweichung unterhalb von $0,1$ N/μm.

notwendige Kraft als Resultat angesehen werden kann. Im hier vorliegenden Fall wird dagegen eine Kraft eingebracht und daher die resultierende Auslenkung als Funktion dieser Kraft betrachtet. Aus den Messdaten ist augenscheinlich ein linearer Zusammenhang zwischen Auslenkung w_i der Platte und der eingebrachten Kraft F_i erkennbar. In Abbildung 10.10 ist zudem eine Gerade eingezeichnet, die über die lineare Regression aus Gleichung (10.8) ermittelt wurde. Die Steigung der Geraden entspricht in diesem Fall dem Kehrwert der Steifigkeit. Die so messtechnisch ermittelte Steifigkeit beträgt $c_m = 8,9$ N/μm mit einem Bestimmtheitsmaß von $B > 0,99$, während aus dem analytischen Modell die Steifigkeit mit $c_a = 7,8$ N/μm angegeben werden kann. Die mehrfache Betrachtung dieses Lastfalls ist in Abbildung 10.11 durch Angabe der so ermittelten Steifigkeiten für zehn Messungen und dem daraus ermittelten arithmetischen Mittelwert gezeigt.

Tabelle 10.8: Geometrievariation von Vollkreisplatten unter konstanter Teilflächenlast mit analytisch und messtechnisch bestimmter Steifigkeit.

h [mm]	R [mm]	c_a [N/μm]	\bar{c}_m [N/μm]	Δc [N/μm]	Δc [%]
0,80	7,25	16,0	17,9	-1,9	-11,9
0,80	8,25	11,2	13,5	-2,3	-20,5
0,80	9,45	7,8	8,9	-1,1	-14,1
0,80	10,30	6,3	6,9	-0,6	-9,5
1,36	7,25	78,8	69,4	9,4	11,9
1,36	8,25	55,0	54,1	0,9	1,6
1,36	9,45	38,5	38,1	0,4	1,0
1,36	10,30	31,0	30,9	0,1	0,3

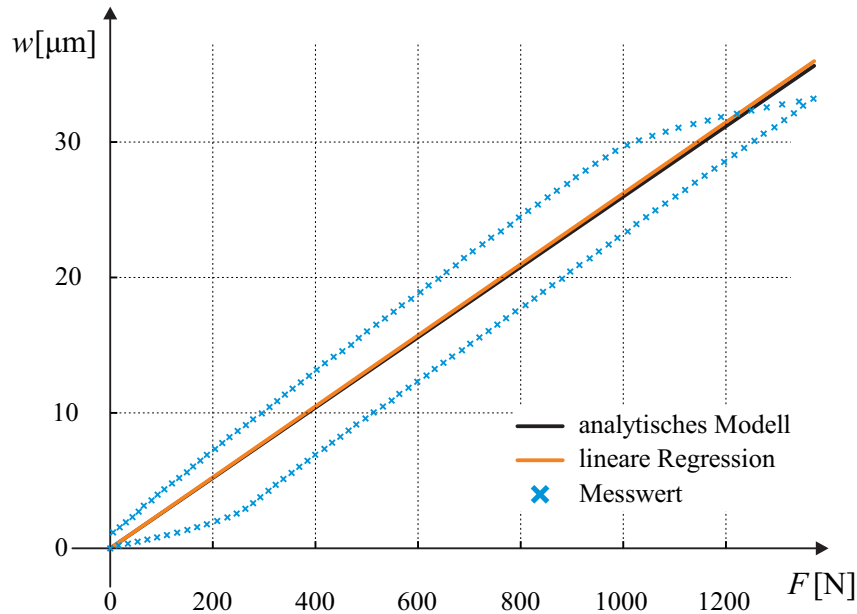


Abbildung 10.12: Zusammenhang zwischen der Auslenkung w der Platte mit $h = 1,36$ mm, $R = 9,45$ mm, $b = 4,00$ mm und der eingebrachten Belastung durch die Kraft F mit der berechneten Steifigkeit $c_a = 38,5$ N/ μm aus dem analytischen Modell und der aus Messdaten über lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von $B > 0,93$ ermittelten Steifigkeit $c_m = 38,1$ N/ μm .

Erst durch Berücksichtigung mehrerer Nachkommastellen werden die Unterschiede der ermittelten Steifigkeiten deutlich. Jedoch scheint die Berücksichtigung mehrerer Nachkommastellen aufgrund der Messgenauigkeiten nicht sinnvoll; vielmehr würde dies zu einer scheinbaren Genauigkeit führen, die messtechnisch nicht abgebildet werden kann. Daher sind in Tabelle 10.8 die analytisch bestimmten Steifigkeitswerte c_a sowie die aus Messungen ermittelten Mittelwerte ϕc_m für die Steifigkeit und die Differenz auf jeweils eine Nachkommastelle angegeben. Bei allen gebildeten Mittelwerten lässt sich ein Wert unterhalb von $0,2$ N/ μm für die Standardabweichung angeben und die relative Abweichung von ± 15 % bzw. absolute Abweichung von ± 10 N/ μm wird eingehalten.

Als zweites Beispiel dient ein Lastfall einer Platte mit einer Plattendicke von $h = 0,80$ mm und einem Plattenradius von $R = 9,45$ mm. Bei Betrachtung der Auslenkung als Funktion der eingebrachten Kraft in Abbildung 10.12 für diesen Lastfall ist ein Hystereseverhalten zu beobachten. Dies bedeutet, dass die Kennlinien bei der Belastung und der Entlastung nicht deckungsgleich sind, sondern ein richtungsabhängiges Verhalten erkennbar ist. Gründe hierfür sind beispielsweise in dem generellen Phänomen der Hysterese als Werkstoffeigenschaft zu sehen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass dies äußerst gering ist und sich mit den verwendeten Messmitteln nicht aufdecken lässt.

Im vorliegenden Fall sind allerdings andere Effekte wahrscheinlich von wesentlich höherer Größenordnung. Das Umkehrspiel von Wegmesstaster und Kraftmessdose bei Änderung der Belastungsrichtung und vor allem Setz- und Reibungseffekte sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Durch Reinigung der Gleitlagerbuchse aus Graphit, in der der Zentrierstößel zur Kraftübertragung geführt wird, kann die Reibung minimiert und so das augenscheinliche Hystereseverhalten verhindert werden.

Dies wurde im Zuge von Demontage- und Montage des Prüfstands bzw. des Dosiersystems

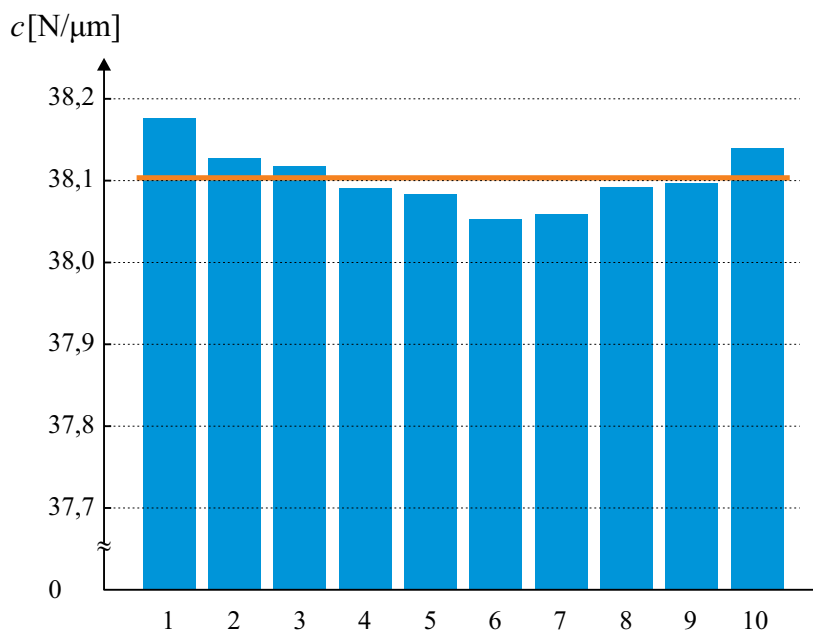


Abbildung 10.13: Zehn über lineare Regression der Messdaten ermittelte Steifigkeiten der Platte mit $h = 1,36$ mm, $R = 9,45$ mm, $b = 4,00$ mm mit einem Mittelwert von $\bar{c}_m = 38,1$ N/μm und einer Standardabweichung unterhalb von $0,1$ N/μm.

durchgeführt, die Bestimmung der Steifigkeit durch lineare Regression der Messdaten wird dabei allerdings nicht wesentlich beeinflusst. Abgesehen von den Randpunkten dieser Belastung ist ein linearer Zusammenhang zwischen eingebrachter Kraft und resultierender Auslenkung sowohl für die Belastung als auch für die Entlastung deutlich erkennbar. Unter Berücksichtigung aller Messpunkte kann über die lineare Regression für diesen Lastfall mit einem Bestimmtheitsmaß von $B > 0,93$ eine Steifigkeit von $c_m = 38,1$ N/μm ermittelt werden.

Die Ergebnisse nach Durchführung von zehn dieser Messungen mit den jeweils über die lineare Regression ermittelten Steifigkeiten der Platte ist in Abbildung 10.13 zu sehen. Auch hier liegt der Wert für die Standardabweichung unterhalb von $0,1$ N/μm und die mittlere Steifigkeit liegt bei $\bar{c}_m = 38,1$ N/μm, während aus dem analytischen Modell eine Steifigkeit von $c_a = 38,5$ N/μm resultiert.

Die beiden vorgestellten Messungen von eingebrachter Belastung F und resultierender Auslenkung w zur Ermittlung der Steifigkeit machen deutlich, dass der erwartete lineare Zusammenhang dieser beiden Größen nachgewiesen werden kann. Eine vollständige Auflistung der betrachteten Lastfälle mit Geometrieparametern, erwarteten Steifigkeiten c_a durch Berechnung mit dem analytischen Modell und der messtechnisch ermittelten Steifigkeiten \bar{c}_m ist in Tabelle 10.8 zu finden. Darin ist ebenfalls jeweils die absolute und relative Abweichung der gemessenen Steifigkeit von der analytisch berechneten Steifigkeit eingetragen. Die absolute Abweichung von maximal ± 10 N/μm wird dabei in allen Fällen eingehalten. Die relative Abweichung von ± 15 % wird in allen Fällen abgesehen von der Platte mit der Plattendicke von $h = 0,80$ mm und dem Plattenradius $R = 8,25$ mm eingehalten. In diesem Fall liegt jedoch die absolute Abweichung mit $\Delta c = -2,3$ N/μm innerhalb der Toleranz von ± 10 N/μm. Die große relative Abweichung von $-20,5$ % ist dem Umstand der geringen erwarteten Steifigkeit von $c_a = 11,2$ N/μm geschuldet. In allen Fällen liegt die Standardabweichung aus den jeweils zehn Messungen unterhalb von

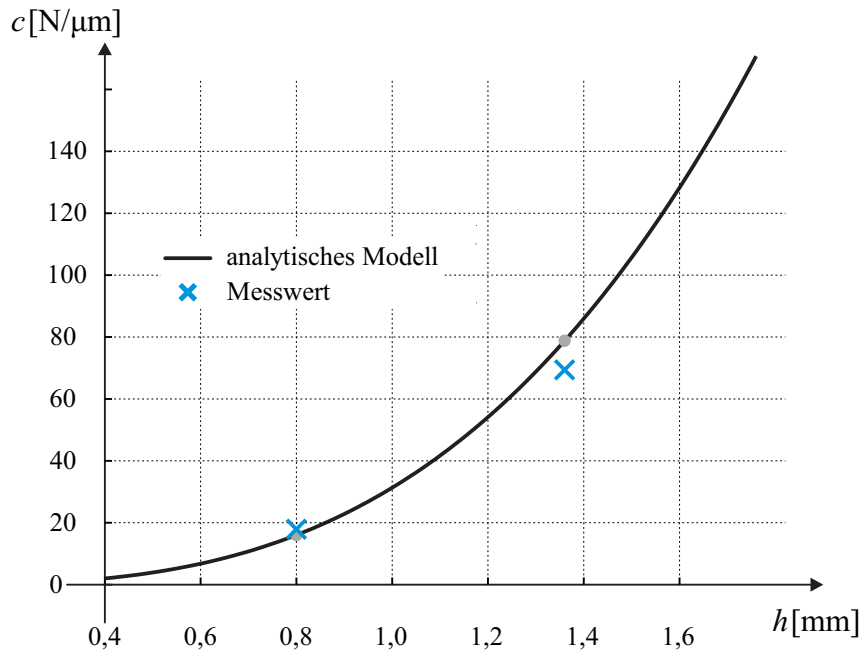


Abbildung 10.14: Qualitativer und quantitativer Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und der Plattendicke h bei einem Plattenradius von $R = 7,25$ mm und den Messwerten bei Plattendicken von $h = 0,80/1,36$ mm.

0,2 N/μm.

Aus den insgesamt acht Lastfällen, die im Rahmen dieser Messungen untersucht wurden, lassen sich die eingangs formulierten qualitativen Zusammenhänge zwischen der Steifigkeit c und der Plattendicke h bzw. dem Plattenradius R nachweisen. Die Variation der

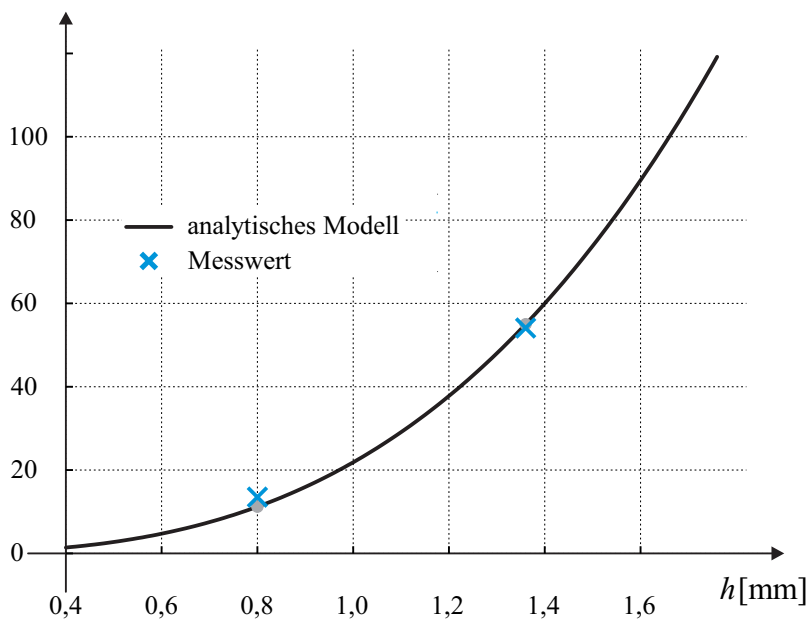


Abbildung 10.15: Qualitativer und quantitativer Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und der Plattendicke h bei einem Plattenradius von $R = 8,25$ mm und den Messwerten bei Plattendicken von $h = 0,80/1,36$ mm.

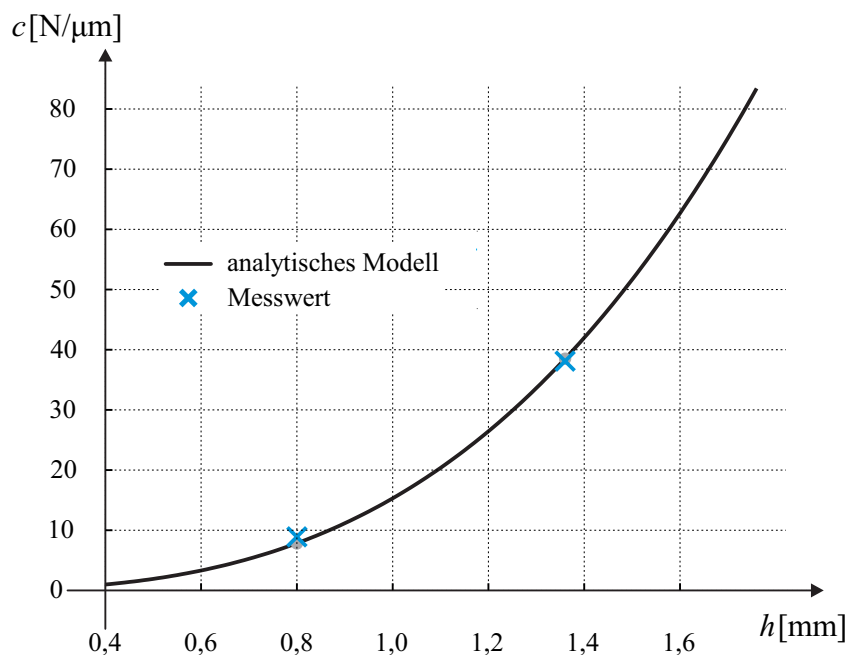


Abbildung 10.16: Qualitativer und quantitativer Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und der Plattendicke h bei einem Plattenradius von $R = 9,45$ mm und den Messwerten bei Plattendicken von $h = 0,80/1,36$ mm.

Plattendicke h erfolgt dabei in zwei Stufen bei Betrachtung von vier unterschiedlichen Plattenradien R . In den Abbildungen 10.14, 10.15, 10.16 und 10.17 ist dieser Sachverhalt jeweils gezeigt. In den Abbildungen 10.18 und 10.19 ist der Zusammenhang zwischen

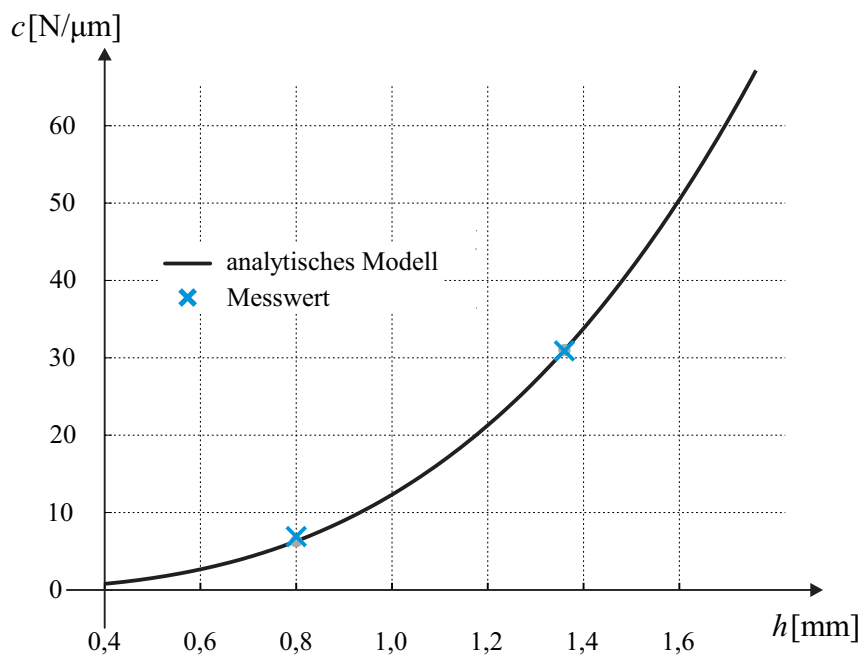


Abbildung 10.17: Qualitativer und quantitativer Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und der Plattendicke h bei einem Plattenradius von $R = 10,30$ mm und den Messwerten bei Plattendicken von $h = 0,80/1,36$ mm.

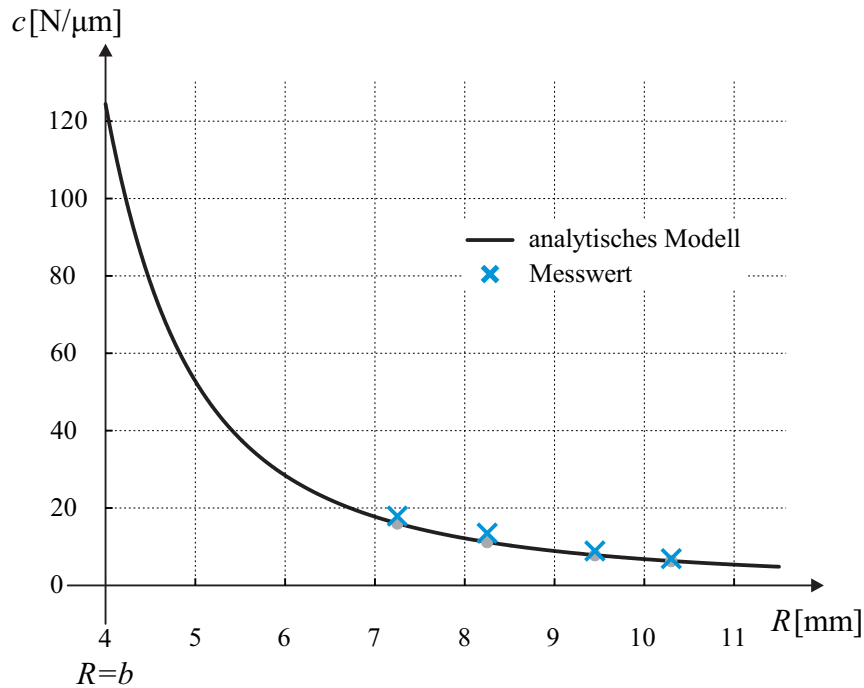


Abbildung 10.18: Qualitativer und quantitativer Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und dem Plattenradius R bei einem Plattendicke von $h = 0,80$ mm und den Messwerten bei Plattenradien von $R = 7,25/8,25/9,45/10,30$ mm.

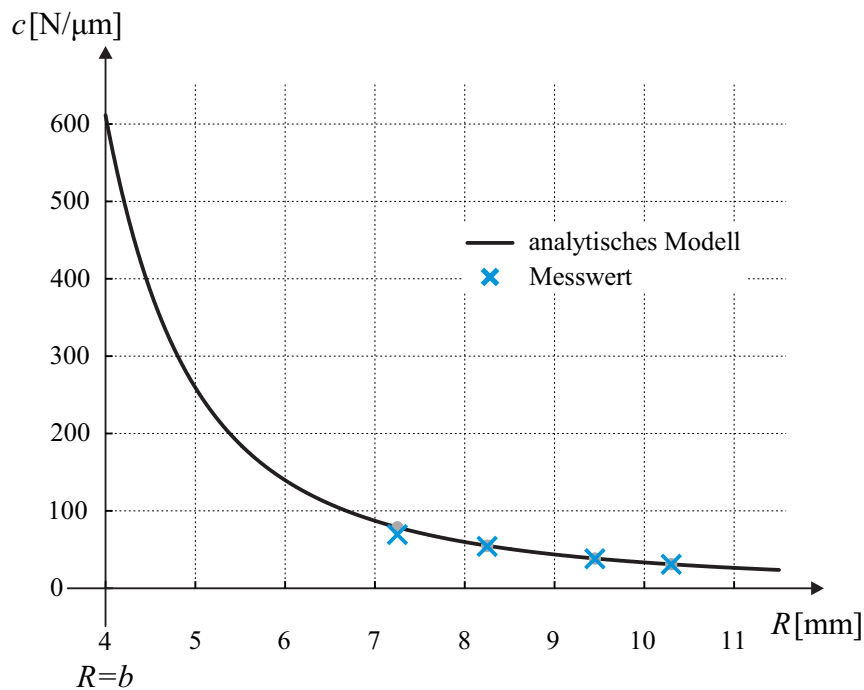


Abbildung 10.19: Qualitativer und quantitativer Zusammenhang zwischen der Steifigkeit c der Platte und dem Plattenradius R bei einem Plattendicke von $h = 1,36$ mm und den Messwerten bei Plattenradien von $R = 7,25/8,25/9,45/10,30$ mm.

der Steifigkeit c und variablem Plattenradius R bei konstanter Plattendicke h gezeigt. Durch die Messungen kann dieser Zusammenhang anhand zweier Plattendicken h und der Variation des Plattenradius R in vier Schritten deutlich gemacht werden. Der qualitative Zusammenhang ist dabei jeweils durch das analytische Modell gegeben und in den jeweiligen Abbildungen quantitativ dargestellt.

Die Verifikation des analytischen Modells anhand einer Platte bei Belastung durch externe Kraft kann somit durch die Messungen als erfolgreich bezeichnet werden.

10.3 Verifikation anhand eines flexiblen Elements bei Belastung durch externe Kraft

Aufbauend auf der Verifikation des analytischen Modells anhand einer Platte wird nun die Verifikation anhand eines flexiblen Elements, wie es im eigentlichen Dosiersystem zum Einsatz kommt, betrachtet.

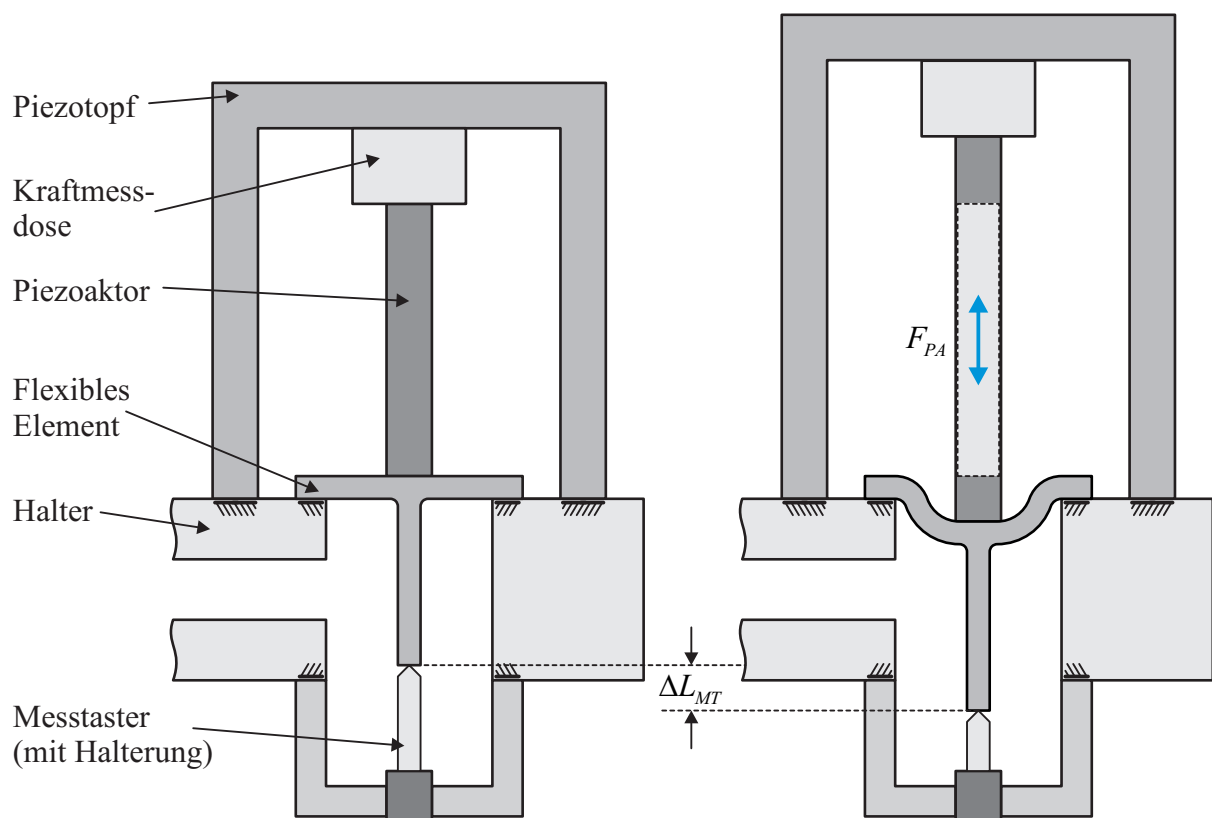


Abbildung 10.20: Prinzip zur messtechnischen Bestimmung der Steifigkeit des flexiblen Elements unter Vernachlässigung der Belastung durch das Fluid. Ausgehend vom unbelasteten Fall (links) ruft der aktivierte Piezoaktor im belasteten Fall (rechts) eine Auslenkung der Platte hervor. Die erzeugte Kraft wird durch eine Kraftmessdose und die resultierende Auslenkung durch einen Messtaster ermittelt.

10.3.1 Vorüberlegungen zur Messung

Der zugrundeliegende Lastfall gleicht dem vorherigen Lastfall der Platte unter Teillast mit dem Unterschied, dass das flexible Element durch den Stößel eine Querschnittsänderung aufweist. Schematisch lässt sich dieser Lastfall wie in Abbildung 10.21 dargestellt skizzieren.

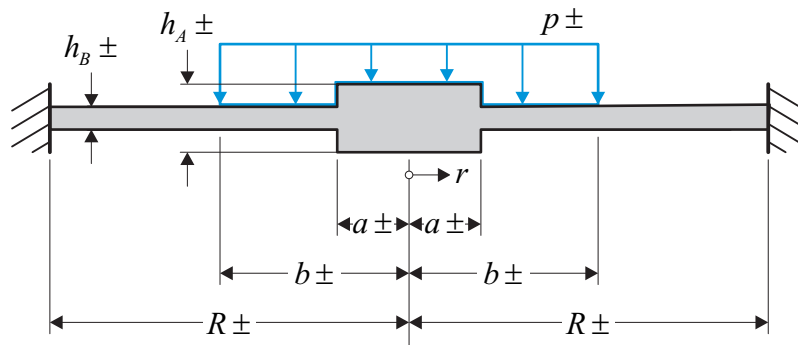


Abbildung 10.21: Flexibles Element als rotationssymmetrische Vollkreisplatte mit Querschnittsänderung mit fester Einspannung am Rand unter konstanter Teilflächenlast mit toleranzbehafteten Parametern: Plattendicken h_A (Stößel) und h_B , Plattenradius R , Belastung p und Begrenzung der Querschnittsüberhöhung a und der Teilflächenlast b .

Das flexible Element wird dabei als Platte mit drei Abschnitten angesehen: einem durch die Belastung p und die Querschnittsüberhöhung gekennzeichneten Abschnitt A mit der Abschnittsgrenze a bzw. der dimensionslosen Abschnittsgrenze $\alpha = a/R$, einem durch die Belastung p gekennzeichneten Abschnitt B mit der Abschnittsgrenze b bzw. der dimensionslosen Abschnittsgrenze $\beta = b/R$ und dem unbelasteten Abschnitt C.

Die allgemeine Formulierung der Durchbiegung bzw. die Steifigkeit des flexiblen Elements ist aufgrund der drei Abschnitte und den damit verbundenen Übergangsbedingungen nicht

Tabelle 10.9: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Steifigkeit eines flexiblen Elements unter konstanter Teilflächenlast mit Werten und Toleranzen.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung		Soll-Wert	Toleranz
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul	210.000 N/mm ²	-
	ν	Querkontraktionszahl	0,29	-
Geometrie	h_A	Plattendicke Abschnitt A (Stößel)	26,00 mm	$\pm 0,01$ mm
	a	Radius Plattenabschnitt A (Stößel)	1,50 mm	$\pm 0,01$ mm
	h_B	Plattendicke Abschnitt B und C	1,30 mm	$\pm 0,01$ mm
	R	Plattenradius	7,25 mm	$\pm 0,01$ mm
Belastung	p	Druck	100,00 bar	$\pm 6,25$ bar
	b	Radius der Flächenbelastung	4,00 mm	$\pm 0,01$ mm
	F	resultierende Kraft	502,7 N	± 15 N

übersichtlich darstellbar. Mit den Konventionen bzw. Abkürzungen

$$K_A = nK \quad ; \quad K_B = K_C = K \quad ; \quad \alpha = q\beta \quad (10.9)$$

lässt sich dieser Zusammenhang jedoch vereinfachen und mit Gleichung (9.14) folgt für die Steifigkeit des flexiblen Elements:

$$w(\rho) = \begin{cases} w_A(\rho) & 0 \leq \rho < \alpha \\ w_B(\rho) & \alpha \leq \rho < \beta \\ w_C(\rho) & \beta \leq \rho < 1 \end{cases}$$

$$w_{rel}(\rho) = w_A(\rho = 0) = \frac{pR^4}{64K} \beta^2 \frac{Z}{N}$$

$$\begin{aligned} Z &= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \\ Z_1 &= -16nq^2\beta^2 \ln \beta \ln(q\beta) [(n-1)(1+\nu)] \\ Z_2 &= +4n\beta^2 \ln \beta [(n-1)(1+n\nu)(1-q^2\beta^2) + 2] \\ Z_3 &= +4nq^2\beta^2 \ln(q\beta) [(n-1)(1+\nu)(\beta^2 - q^2)] \\ Z_4 &= -[(n-1)q^4\beta^2 + n(3\beta^2 - 4)] [(n-1)(1+\nu)(1 - q^2\beta^2) + 2] \\ N &= n [(n-1)(1+\nu)(1 - q^2\beta^2) + 2] \end{aligned}$$

$$F = p\pi\beta^2 R^2$$

$$c = \frac{F}{w_{rel}(\rho)} = \frac{64\pi K}{R^2} \frac{N}{Z} \quad \text{mit} \quad K = \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h^3}{12} \quad (10.10)$$

Betrachtet man das Verhältnis $V_{c,nK/K}$ der Steifigkeit eines flexiblen Elements mit Querschnittsüberhöhung c_{nK} und der Steifigkeit eines flexiblen Elements ohne Querschnittsüberhöhung c_K und führt eine Grenzwertbetrachtung entsprechend Gleichung (9.45) unter Berücksichtigung der Parameter aus Tabelle 10.9 durch, so folgt aus Gleichung (10.10) ein Grenzwert von:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (V_{c,nK/K}(\rho = 0)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{c_{nK}}{c_K} \right) \approx 1,44 \quad (10.11)$$

Betrachtet man dagegen den Fall für $n = 1$, also ein flexibles Element ohne Querschnittsüberhöhung, so geht die Steifigkeit aus Gleichung (10.10) über in die Beschreibung der Steifigkeit aus Gleichung (10.4). Unter Berücksichtigung konkreter Zahlenwerte aus Tabelle 10.9 lassen sich so Zahlenwerte für die Steifigkeiten bei Variation des Einflusses durch den Stößel berechnen:

$$c_{n=1} = 68,8 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (10.12a)$$

$$c_{n=n_{AB}} = 99,1 \text{ N}/\mu\text{m} \quad \text{mit} \quad n_{AB} = \frac{K_A}{K_B} = \frac{\frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h_A^3}{12}}{\frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{h_B^3}{12}} = \frac{h_A^3}{h_B^3} = 8000 \quad (10.12b)$$

$$c_{n \rightarrow \infty} = 99,2 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (10.12c)$$

Die Berücksichtigung der kompletten Querschnittsüberhöhung durch den Stößel scheint daher nicht sinnvoll. Die Grenzwertbetrachtung ermöglicht es dabei, den Einfluss der Querschnittsüberhöhung rechnerisch zu betrachten. So werden bereits 90 % des Grenzwertes $c_{n \rightarrow \infty}$ bei einer Plattendicke von $h_A = 1,79 \text{ mm}$ zur Berücksichtigung des Stößels erreicht.

Im Sinne der Gültigkeit der Kirchhoffschen Plattentheorie in Bezug auf das Verhältnis von Plattendicke und Plattendurchmesser aus Gleichung (9.1) wird daher für die weitere Betrachtung der Querschnittsüberhöhung durch den Stößel wie folgt angenommen:

$$\begin{aligned} \frac{h}{D} &\leq 0,1 \\ h_A &\leq 0,1 \cdot D = 0,1 \cdot 2 \cdot R = 0,1 \cdot 2 \cdot 7,25 \text{ mm} = 1,45 \text{ mm} \end{aligned} \quad (10.13)$$

Unter Berücksichtigung dessen folgt für die Steifigkeit entsprechend des analytischen Modells in diesem Fall:

$$c_{(h_A=h_B)} = c_{(h_A=1,3 \text{ mm})} = 68,8 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (10.14a)$$

$$c_{(h_A=0.1D)} = c_{(h_A=1,45 \text{ mm})} = 73,1 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (10.14b)$$

10.3.2 Hypothesen zur Messung

Für den Einfluss von eingebrachter Belastung auf die resultierende Auslenkung wird wie zuvor ebenfalls ein linearer Zusammenhang, wie in Abbildung 10.22 skizziert, erwartet.

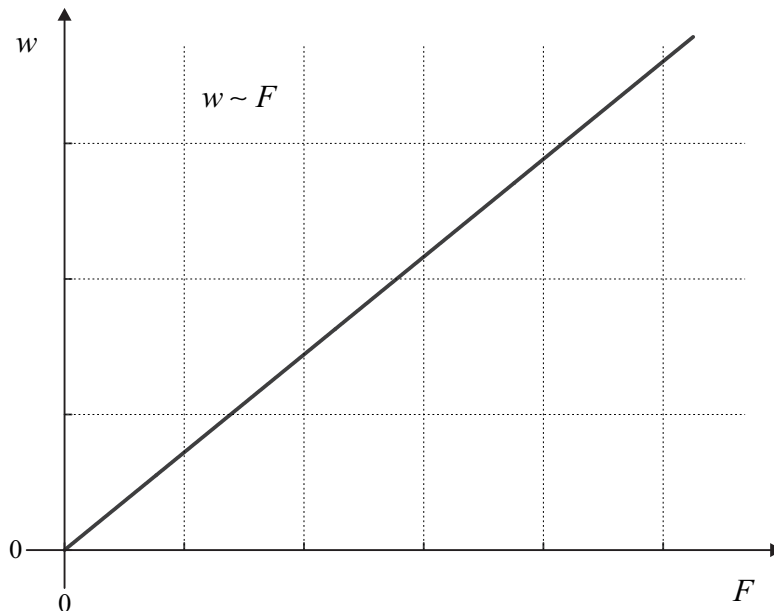


Abbildung 10.22: Qualitativ erwarteter Zusammenhang zwischen der Auslenkung w des flexiblen Elements und der eingebrachten Belastung durch die Kraft F .

Hinsichtlich der zu erwartenden Genauigkeit wird die Überlegung aus dem vorangehenden Abschnitt übernommen und als Richtwert für Aussagen hinsichtlich der Verifikation des

analytischen Modells durch den Abgleich mit Messungen daher eine relative Abweichung von $\pm 15\%$ bzw. eine absolute Abweichung von $\pm 10 \text{ N}/\mu\text{m}$ toleriert.

10.3.3 Durchführung der Messung

Wie bei den vorherigen Messungen wird eine Kraft durch den Piezoaktor erzeugt und über eine definierte Fläche entsprechend Tabelle 10.10 in das flexible Element eingebracht. Die Querschnittsüberhöhung innerhalb des flexiblen Elements, die durch den Stößel charakterisiert ist, wird mit dem Parameter h_S beschrieben.

Tabelle 10.10: Zusammenfassung der Geometrie-, Werkstoff- und Belastungseigenschaften zur Bestimmung der Steifigkeit des untersuchten flexiblen Elements unter konstanter Teilflächenlast mit Werten und Toleranzen.

Eigenschaft	Parameter und Bezeichnung		Soll-Wert	Toleranz
Werkstoff	E	Elastizitätsmodul	210.000 N/mm ²	-
	ν	Querkontraktionszahl	0,29	-
Geometrie	h_S	Plattendicke Stößel	1,45 mm	$\pm 0,01$ mm
	a	Radius Stößel	1,50 mm	$\pm 0,01$ mm
	h	restliche Plattendicke	1,30 mm	$\pm 0,01$ mm
	R	Plattenradius	7,25 mm	$\pm 0,01$ mm
Belastung	b	Radius der Flächenbelastung	4,00 mm	$\pm 0,01$ mm

Zu Beginn einer Messung wird der Piezoaktor über die Vorspannschraube wiederum vorgespannt, um eine unmittelbare Kraftübertragung sicherzustellen. Im Anschluss daran werden die Daten der Kraftmessdose und des Wegmesstasters notiert bzw. auf Null gesetzt und ausgehend davon die elektrische Spannung am Piezoaktor schrittweise erhöht. Durch Auslesen der Position des Piezoaktors und der Werte der Kraftmessdose und des Wegmesstasters werden wiederum Änderungen dieser Größen und nicht deren absolute Werte erfasst. Bei Erreichung der maximal zulässigen Spannung des Piezoaktors bzw. einer maximalen Kraft oder maximalen Auslenkung wird die elektrische Spannung am Piezoaktor schrittweise bis auf den Ausgangspunkt verringert. Die Daten werden über die jeweiligen Schnittstellen an einen Auswerterechner übertragen und anschließend ausgewertet.

10.3.4 Interpretation der Messung

In Abbildung 10.23 sind beispielhaft die Daten einer Messung für die Ermittlung der Steifigkeit des flexiblen Elements gezeigt. Der erwartete lineare Zusammenhang zwischen eingebrachter Kraft F und resultierender Auslenkung w wird darin deutlich.

Wiederum mithilfe der Methode der linearen Regression aus Gleichung (10.8) kann aus den Messdaten eine Steifigkeit c_m ermittelt werden. In diesem Fall führt dies zu einem Wert von $c_m = 72,8 \text{ N}/\mu\text{m}$ bei einem Bestimmtheitsmaß von $B > 0,99$.

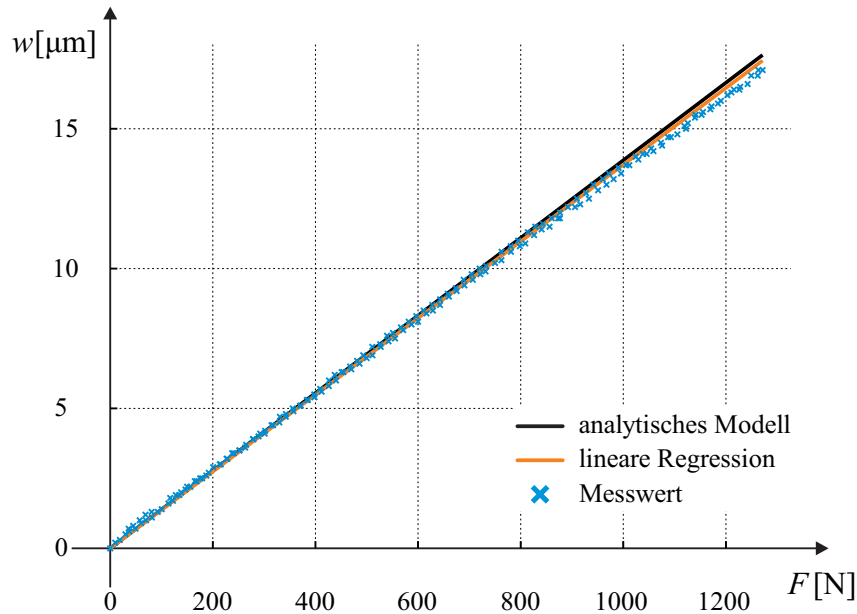


Abbildung 10.23: Zusammenhang zwischen der Auslenkung w des flexiblen Elements mit $h = 1,30$ mm, $h_S = 1,45$ mm, $R = 7,25$ mm, $a = 1,50$ mm, $b = 4,00$ mm und der eingebrachten Belastung durch die Kraft F mit der berechneten Steifigkeit $c_a = 73,1$ N/ μm aus dem analytischen Modell und der aus Messdaten über lineare Regression ermittelten Steifigkeit $c_m = 72,8$ N/ μm mit einem Bestimmtheitsmaß von $B > 0,99$.

Nach zehnmaliger Wiederholung der Messung und Mittelwertbildung ergibt sich eine mittlere gemessene Steifigkeit von $\bar{c}_m = 73,2$ N/ μm bei einer Standardabweichung kleiner als 0,4 N/ μm .

Der Vergleich zu den analytisch berechneten Werten mit und ohne Berücksichtigung der Querschnittsüberhöhung durch den Stößel ist in Tabelle 10.11 dargestellt. Sowohl die absoluten als auch die relativen Abweichungen von analytischem Modell zu Messwerten liegen jeweils deutlich innerhalb der gewünschten Toleranz von ± 10 N/ μm für die absolute Abweichung bzw. ± 15 % für die relative Abweichung und das analytische Modell kann somit als verifiziert betrachtet werden.

Tabelle 10.11: Flexibles Element unter konstanter Teilflächenlast mit analytisch und messtechnisch bestimmter Steifigkeit.

h [mm]	h_S [mm]	c_a [N/ μm]	\bar{c}_m [N/ μm]	Δc [N/ μm]	Δc [%]
1,30	1,30	68,8	73,2	-4,4	-6,4
1,30	1,45	73,1	73,2	-0,1	-0,1

Die Berücksichtigung der Querschnittsüberhöhung durch den Stößel im Rahmen der Gültigkeit der Kirchhoffschen Plattentheorie scheint anhand dieser Daten sinnvoll. Dies unterstreicht die aufgestellte These, die aus einer Grenzwertbetrachtung ermittelt wurde, dass eine Berücksichtigung der realen Querschnittsüberhöhung nur bis zu einem gewissen Maß zielführend ist.

10.4 Zusammenfassung der Verifikation

Die Verifikation des analytischen Modells durch reale Messungen wurde anhand verschiedener Lastfälle und Geometrien durchgeführt. Die Verifikation des analytischen Modells beruht dabei auf der Objektivität der Messung, der Reliabilität bzw. Reproduzierbarkeit der Messung, sowie der Validität der Messung. Diese Gütekriterien konnten im Zuge der Messungen sichergestellt werden.

Die Objektivität der Messung wird durch die eindeutige Positionierung der Messinstrumente und die rechnergestützte Erfassung von Messdaten und deren Auswertung gewährleistet. Somit sind die Messwerte sowie deren Verarbeitung unabhängig vom Bediener bzw. vom Messenden. Die Reliabilität bzw. Reproduzierbarkeit der Messung kann durch wiederholte Messungen gezeigt werden, bei denen die relative Standardabweichung, also die Standardabweichung einer Messreihe bezogen auf den ermittelten Mittelwert der Messreihe, jeweils unterhalb von 1 % liegt. Die Validität der Messung als Maß, ob die zu messende Größe tatsächlich messtechnisch erfasst wird, wird durch die Konstruktion des Messaufbaus gewährleistet. Dies bedeutet in diesem Falle, die eingebrachte Belastung sowie die resultierende Auslenkung tatsächlich zu erfassen. Die eingebrachte Belastung wird direkt über eine Kraftmessdose erfasst und durch den konstruktiven Aufbau zentriert in das Messobjekt, eine Platte oder ein flexibles Element, eingeleitet. Durch die zentrierte Lagerung des Wegmesstasters wird sichergestellt, die tatsächliche Auslenkung des Messobjekts im Zentrum zu ermitteln.

Hinsichtlich einer vollflächigen Belastung durch ein Fluid konnte das analytische Modell nicht verifiziert werden, da der Messaufbau keine geeignete Messung erlaubt. Die Vibrationen, die bei der Erzeugung des Drucks durch die Plastifiziereinheit hervorgerufen werden, können mit diesem Messaufbau nicht isoliert werden. Damit wird die eigentlich zu ermittelnde Messgröße derart verfälscht, dass keine verlässlichen Aussagen getroffen werden können. Die Validität der Messung ist damit nicht gegeben.

Hinsichtlich einer Teilflächenlast durch eine externe Kraft konnte das analytische Modell hingegen verifiziert werden. Die Basis hierfür bildet die Variation von Durchmesser und Dicke einfacher, rotationssymmetrischer Platten konstanter Dicke. Im Rahmen geforderter Toleranzen stimmt das analytische Modell mit Messungen überein und aufbauend darauf wurde ein flexibles Element untersucht. Die Berücksichtigung der Querschnittsüberhöhung durch den Stößel kann mit dem analytischen Modell abgebildet werden und der Vergleich mit Messdaten bestätigt das analytische Modell.

Die Entwicklung und konstruktive Umsetzung eines zuverlässigen Messaufbaus in Kombination mit der erfolgreichen Verifikation des analytischen Modells bedeutet, dass dieses analytische Modell zur Auslegung relevanter Komponenten des Dosiersystems verwendet werden kann und dabei auch Größen berücksichtigt werden können, die sich messtechnisch nicht erfassen lassen. Ein Beispiel hierfür sind innere Spannungen innerhalb eines flexiblen Elements, die für die Auslegung der Geometrie oder des Werkstoffs des flexiblen Elements hinsichtlich eines definierten Lastfalls herangezogen werden können. Das analytische Modell beruht auf der Kirchhoffschen Plattentheorie, bei der eine Deformation durch innere Spannungen hervorgerufen wird. Ausgehend von der nachgewiesenen Gültigkeit des analytischen Modells basierend auf der Steifigkeit als charakteristische Kenngröße, können somit diese Spannungen für Dimensionierungen verwendet werden.

Dies ist in verschiedenen Szenarien denkbar. Ausgehend von einem definierten Lastfall,

wie etwa einem gewünschten Dosierdruck, kann einerseits ein flexibles Element hinsichtlich zulässiger Spannungen dimensioniert werden. Im Zuge der Dimensionierung des flexiblen Elements kann somit auch der Aktor zur Erzeugung der externen Kraft ausgelegt werden bzw. bei einem gegebenen Aktor, der sichere Betriebsbereich des Systems ermittelt werden. Andererseits kann bei gegebenem flexiblen Element und Aktor der zulässige Dosierdruck ermittelt werden. Übertragen auf das eigentliche Dosiersystem bedeutet dies, dass somit für einen gewünschten Öffnungsgrad des Ventils die relevanten Komponenten ausgelegt werden können sowie dieser Öffnungsgrad durch den geregelten Betrieb des Aktors kontrolliert werden kann.

Die Gültigkeit des analytischen Modells im Rahmen statischer Untersuchungen bildet zudem die Grundlage für dynamische Beschreibungen und Untersuchungen.

Neben der Gültigkeit des analytischen Modells spielt die Objektivität, Reproduzierbarkeit und Validität der Messung eine wichtige Rolle für den Betrieb des Dosiersystems. Dies erlaubt im eigentlichen Betrieb des Dosiersystems eine kontinuierliche Erfassung des Ventilzustands durch die Kenntnis des mechanischen Verhaltens des flexiblen Elements. Ausgehend vom geschlossenen Zustand des Ventils kann durch Variation der externen Kraft die Auslenkung des flexiblen Elements und damit der Ventilzustand erfasst werden. Dies ermöglicht eine reproduzierbare Vorgabe und Kontrolle der Dosiercharakteristik und erlaubt zugleich die Detektion von Veränderungen. Ermüdungserscheinungen des flexiblen Elements, etwa aufgrund von Alterungseffekten, spiegeln sich in Veränderungen der Auslenkung des flexiblen Elements bzw. der notwendigen Belastung für eine gewünschte Auslenkung wider und können so zur Versagensvorhersage bzw. Versagensvermeidung genutzt werden.

Im Zuge der Messungen hat sich gezeigt, dass das flexible Element, zumindest bis in einen Belastungsbereich von etwa 1,3 kN, eine konstante Steifigkeit aufweist. Durch Verwendung eines leistungsstärkeren Aktors könnte dieser Bereich eventuell erweitert werden und die Vermutung liegt nahe, dass sich dieser Bereich bis hin zur Grenze des linear-elastischen Materialverhaltens ausweiten lässt. Bereits schon mit dem ermittelten Bereich bietet das flexible Element nach der messtechnischen Ermittlung der Steifigkeit die Möglichkeit zur Verwendung als Sensor. Für das eigentliche Dosiersystem bedeutet dies, dass prinzipiell auf den Einsatz einer Kraftmessdose verzichtet werden kann.

11 Dosierbeispiel

Als Beispiel der Anwendung des Dosiersystems soll an dieser Stelle kurz die Dosierung von Kunststoff vorgestellt werden. Bei dem verwendeten Kunststoff handelt es sich um Polypropylen, einen teilkristallinen Thermoplast, mit der Bezeichnung Moplen HP 501 N, der den hochviskosen Kunststoffen zugeschrieben werden kann. Das Ausgangsmaterial liegt in Granulatform vor und wird dem Dosiersystem über die Plastifiziereinheit einer Spritzgussmaschine als Kunststoffschmelze zugeführt.



Abbildung 11.1: Standbild der Extrusion eines Kunststoffstrangs mit Strukturierung aufgrund des Öffnens und Schließens der Austrittsöffnung, entnommen aus einer Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera.

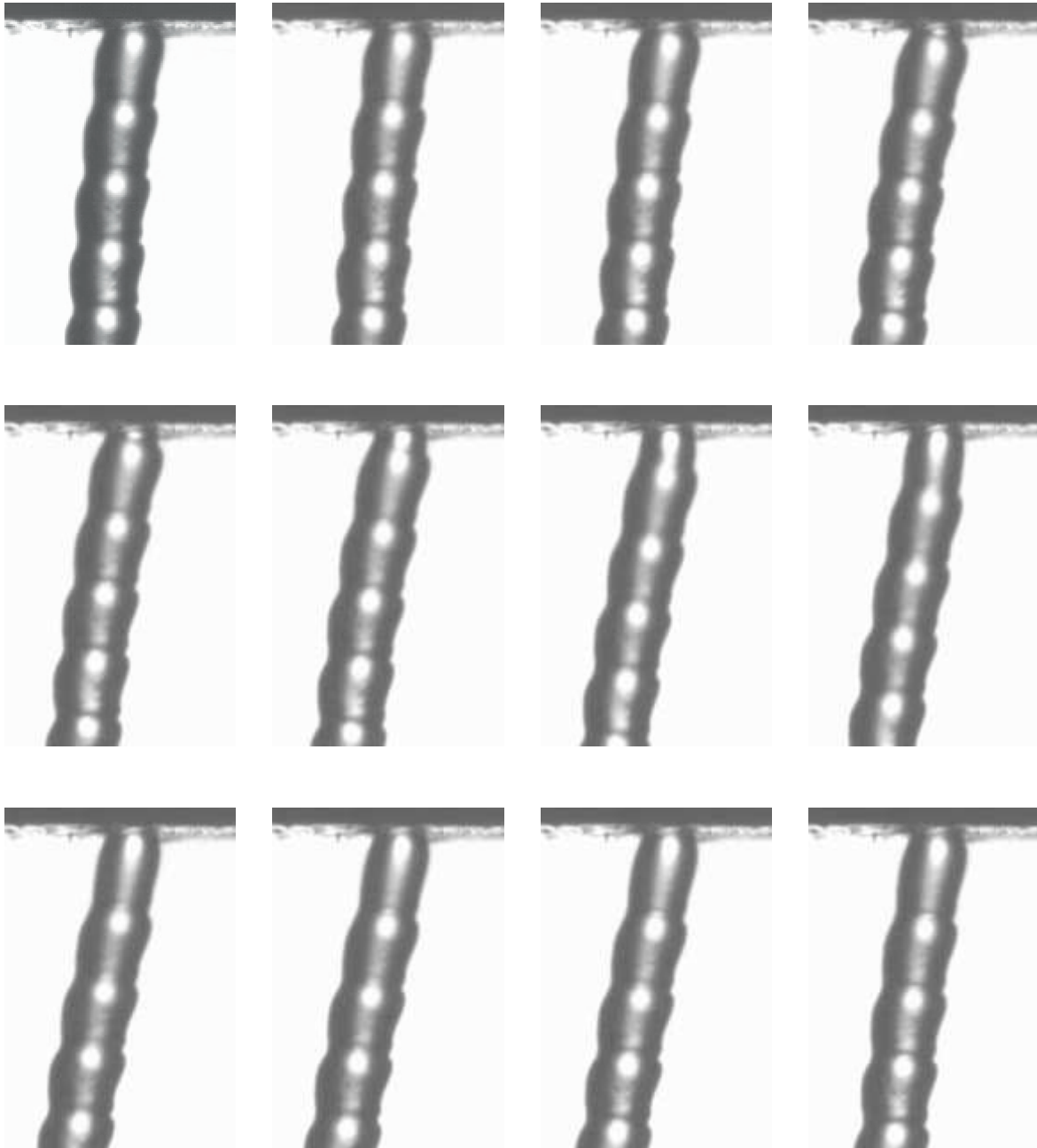


Abbildung 11.2: Ausgewählte Detailaufnahmen eines extrudierten Kunststoffstrangs während eines Ventilzyklus, entnommen aus Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, chronologisch von links oben nach rechts unten geordnet.

Das gezielte Öffnen und Schließen der Austrittsöffnung über die Aktuierung des flexiblen Elements durch den Piezoaktor resultiert in einem strukturierten Kunststoffstrang, der in Abbildung 11.1 zu sehen ist. In Abbildung 11.2 ist dieser Kunststoffstrang zu unterschiedlichen Zeitpunkten während eines Ventilzyklus, also einem Wechsel von geöffnetem zu geschlossenem Zustand, zu sehen. Dabei wird die Änderung des Materialaustrags deutlich. Die Tatsache, dass dieser Strang nicht exakt vertikal die Austrittsdüse verlässt, ist hauptsächlich Unebenheiten und Defekten innerhalb der Austrittsdüse geschuldet. Für die Demonstration der Funktionsfähigkeit des Dosiersystems spielt dies allerdings eine untergeordnete Rolle und wird daher nicht weiter diskutiert. Ebenso wird deutlich, dass sich

der Kunststoff nach Verlassen und Verschließen der Austrittsdüse lediglich einschnürt, sich jedoch nicht als frei fliegendes, diskretes Volumen von der Austrittsdüse entfernt. Dieser Sachverhalt ist unter anderem mit den hohen Adhäsionskräften und geringen Oberflächenspannungen innerhalb der Kunststoffschmelze zu begründen, soll allerdings an dieser Stelle ebenfalls nicht weiter diskutiert werden.

Durch Variation der Taktzeit des Ventils, also der Variation der Öffnungs- bzw. Schließfrequenz, kann die Dosiercharakteristik variiert werden. Dies macht sich in Abbildung 11.3 bei Erhöhung der Ventilfrequenz durch eine feinere Strukturierung des extrudierten Kunststoffstrangs deutlich. Unter Beibehaltung des anliegenden Drucks der Kunststoffschmelze und gleicher Geometrie der Austrittsdüse wird so innerhalb der gleichen Zeit der Extrusionsprozess mehrfach unterbrochen und wieder in Gang gesetzt. Dies macht sich ebenfalls in den Detailaufnahmen in Abbildung 11.4 bemerkbar.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dienen im Rahmen dieser Arbeit dem Funktionsnachweis des Dosiersystems. Aus diesen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen lassen sich zudem bildbasierte Auswertungen des Extrusionsvorgangs, wie etwa die Extrusionsgeschwin-



Abbildung 11.3: Standbild der Extrusion eines Kunststoffstrangs mit Strukturierung aufgrund des Öffnens und Schließens der Austrittsöffnung, entnommen aus einer Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera.

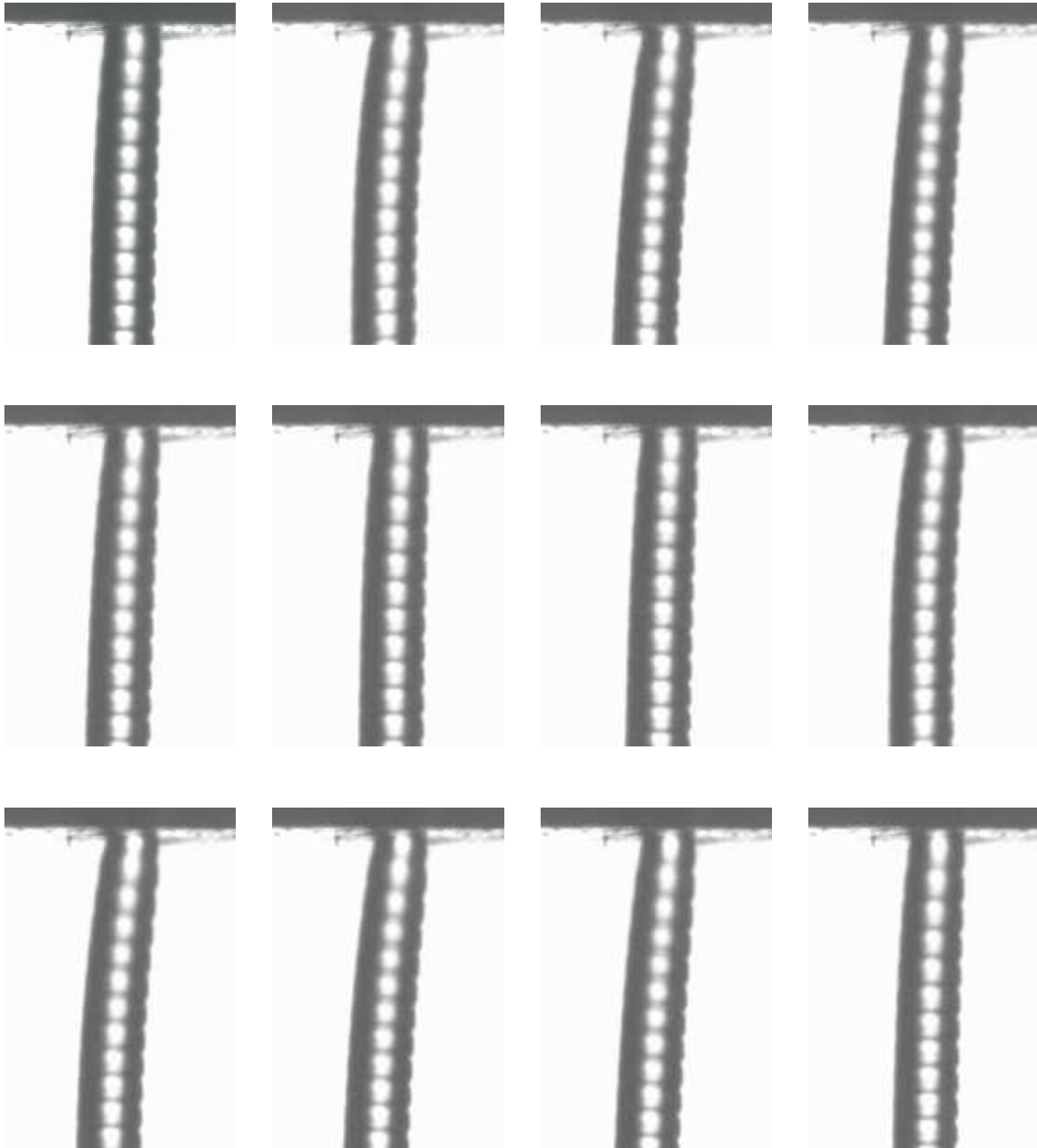


Abbildung 11.4: Ausgewählte Detailaufnahmen eines extrudierten Kunststoffstrangs während mehrerer Ventilzyklen, entnommen aus Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, chronologisch von links oben nach rechts unten geordnet.

digkeit oder das Aufschwellverhalten der Kunststoffschmelze, ermitteln [32, 45, 50, 56]. Das Aufschwellverhalten einer Kunststoffschmelze ist größtenteils den viskoelastischen Eigenschaften flüssiger Kunststoffe geschuldet und beschreibt das Verhältnis der Durchmesser der Austrittsöffnung und des extrudierten Strangs. Im Hinblick auf die Auflösung und Genauigkeit generativer Fertigungsverfahren spielt dies eine wichtige Rolle.

Erste Versuche, diese Art und Weise der Dosierung von Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren einzusetzen, sind in Abbildung 11.5 zu sehen. Hierbei wurde eine Bauplattform unterhalb der Austrittsdüse entlang einfacher Geometrien bewegt und so die Möglichkeit des additiven Aufbaus von Bauteilen prinzipiell gezeigt.

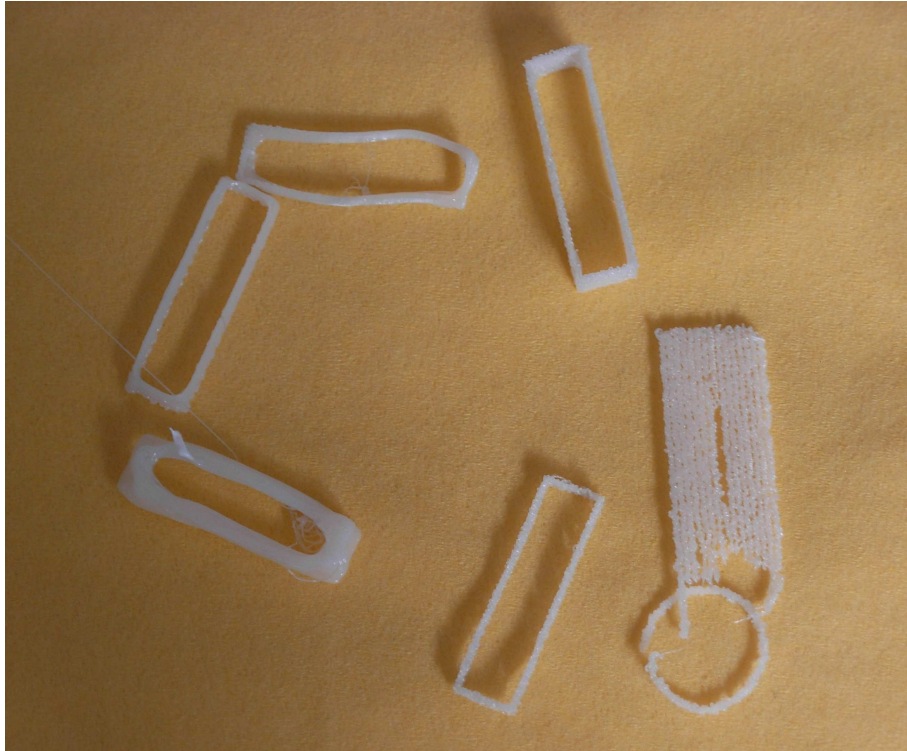


Abbildung 11.5: Beispiele für prinzipielle Eignung des Dosiersystems für generative Fertigungsverfahren anhand einfacher dreidimensionaler Objekte aus Polypropylen.

Das Zusammenspiel von Dosiercharakteristik und der Art und Weise, wie die Bauplattform bewegt wird, spielt eine wichtige Rolle für die Qualität der so generierten Bauteile. Dieser Aspekt sowie Fragen hinsichtlich der Verbindung extrudierter Kunststoffe miteinander, der Steuerung eines solchen generativen Fertigungsverfahrens, der damit verbundenen Software oder gar die zugrundeliegende Baustrategie, werden im Rahmen dieser

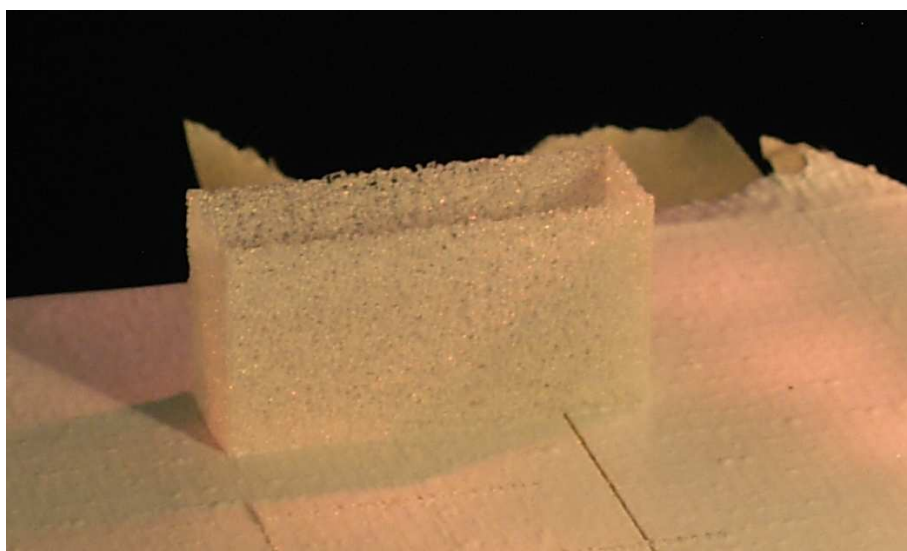


Abbildung 11.6: Verbesserungen der Bauteilqualität durch Anpassung von Prozessparametern am Beispiel eines einfachen dreidimensionalen Objekts verdeutlichen das Potential für ein generatives Fertigungsverfahren.

Arbeit nicht diskutiert.

Durch empirische Untersuchungen bezüglich der Abstimmung der Geschwindigkeit der Extrusion und der Verfahrgeschwindigkeit der Bauplattform konnten augenscheinliche Verbesserungen der Qualität erzielt werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 11.6 zu sehen. Eine abgewandelte Version des Dosiersystems [31] auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und umgesetzten Konstruktion befindet sich in der Entwicklung für ein industriell einsetzbares generatives Fertigungsverfahren.

Das Dosiersystem ist nicht alleine auf Kunststoffe beschränkt. Wie bereits erläutert können dem Dosiersystem prinzipiell verschiedene Fluide zugeführt werden. Durch Verwendung einer manuellen Pumpe zur Druckerzeugung und gewöhnlichem Wasser als Medium wurde das Dosiersystem in einem prototypischen Aufbau betrieben. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich die Austrittsdüse durch den piezoelektrischen Aktor auch in diesem Fall gezielt öffnen und verschließen lässt und es konnten frei fliegende, diskrete Wasservolumina erzeugt werden.

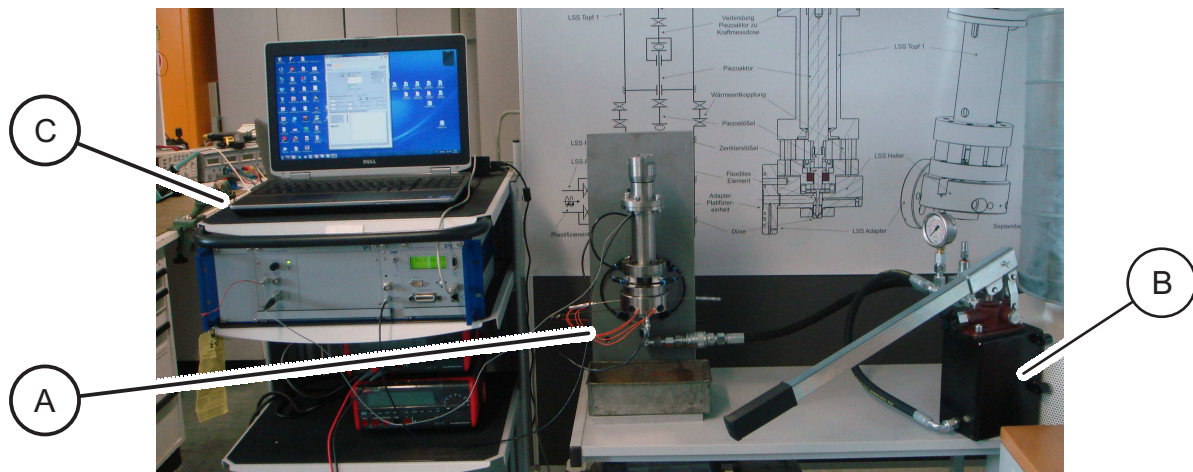


Abbildung 11.7: Prototypischer Aufbau des Dosiersystems in der Verwendung mit Wasser. Dem Dosiersystem (A) wird über eine Pumpe (B) Wasser unter Druck zugeführt. Über einen Auswerterechner werden den Steuer- und Sensorkomponenten (C) Stellwerte vorgegeben bzw. Messdaten erfasst.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Dosiersystem entwickelt, konstruktiv umgesetzt und ein zentrales Funktionselement des Dosiersystems im Detail betrachtet. Die Anwendung des Dosiersystems liegt vorrangig in der Dosierung von Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren, ist dabei allerdings nicht auf diesen Bereich beschränkt. Das Dosiersystem beruht auf der Bereitstellung eines Fluids unter, gegenüber der Umgebung erhöhtem, Druck und dem Schalten dieses Druckunterschieds durch Öffnen und Verschließen einer Austrittsöffnung. Das Öffnen und Verschließen der Austrittsöffnung wird über ein Ventil realisiert, das eine zentrale Rolle in dieser Arbeit einnimmt. Dieses Ventil basiert auf der Deformation eines flexiblen Verschlusselements, das vereinfacht durch eine rotationsymmetrische Platte mit einem einseitig ausgeprägten Stößel beschrieben werden kann. Die Deformation wird durch eine externe Kraft hervorgerufen und führt zu einem kraftschlüssigen Verschluss der Austrittsöffnung durch den Kontakt zweier Festkörper - der Austrittsdüse und dem Verschlusselement. Der Abstand zwischen dem Verschlusselement und der Austrittsdüse charakterisiert den Zustand des Ventils. Im Betrieb des Dosiersystems lässt sich dieser Abstand nicht messtechnisch erfassen. Dieser Abstand ist allerdings für die Dosiercharakteristik mit entscheidend. Um diesen Abstand zu ermitteln, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell, durch das sich dieser Abstand indirekt bestimmen lässt, entwickelt und durch reale Messungen verifiziert. Die realen Messungen basieren auf der Aufbringung einer definierten Belastung, der Ermittlung dieser Belastung mit einer Kraftmessdose und der messtechnischen Erfassung der resultierenden Auslenkung des flexiblen Verschlusselements mit einem Wegmesstaster.

Für die Verifikation des Modells durch reale Messungen sind verschiedene Punkte entscheidend. Dies sind zum einen Anforderungen an das Modell, das die Realität so exakt wie möglich annähern soll und das die Möglichkeit der Variation relevanter, zu untersuchender, Parameter bieten soll. Zum anderen sind dies Anforderungen an das zu untersuchende Objekt selbst, das in einer Konstruktion die gewünschte Realität widerspiegeln muss. Eine letzte, mit entscheidende Anforderung ist die Güte des Messaufbaus und der verwendeten Messinstrumente. Für die Messung sind somit die Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität sicherzustellen. Diese Gütekriterien werden im Rahmen dieser Arbeit durch das Zusammenspiel der Konstruktion des Dosiersystems, dessen Eignung als Messaufbau, der Messdatenerfassung und Auswertung, sowie der eigentlichen Durchführung von Messungen erzielt.

Die Konstruktion des Dosiersystems beruht auf der Auslegung relevanter Strukturen auf Basis der Konstruktionsmethodik von Wirkflächen und Wirkflächenpaaren. Als zentrale Funktionselemente innerhalb des Dosiersystems sind die Austrittsdüse und das flexible Verschlusselement zu nennen. Beide Funktionselemente können innerhalb des Dosiersystems hinsichtlich ihrer Geometrie variiert werden, so dass von einem modularen Aufbau gesprochen werden kann. Die reproduzierbare Lagerung dieser Funktionselemente inner-

halb des Dosiersystems und relativ zueinander wird durch eine zentrale Aufnahme im Dosiersystem realisiert. Im Rahmen gängiger Passungstoleranzen wird so sichergestellt, auch bei wiederholter Montage und Demontage des Dosiersystems, einen gleichbleibenden Aufbau zu gewährleisten. Die zentrale Aufnahme sowie die Vorrichtungen zur Fixierung der Funktionselemente sind zudem so dimensioniert, dass deren Deformation aufgrund äußerer Kräfte vernachlässigt und von einer festen Einspannung der Funktionselemente gesprochen werden kann. Die externe Kraft, die zur Deformation des flexiblen Verschlusselements führt und damit die Ventulfunktion ermöglicht, wird durch einen piezoelektrischen Aktor erzeugt. Da das Dosiersystem bei hohen Temperaturen betrieben werden kann, ist innerhalb der Konstruktion eine thermische Isolierung und aktive Kühlung des temperaturempfindlichen piezoelektrischen Aktors integriert. Der piezoelektrische Aktor kann innerhalb des Dosiersystems torsionsfrei vorgespannt werden, um eine direkte Kraftübertragung auf das flexible Verschlusselement zu gewährleisten. Funktionsrelevant beim Aufbringen der externen Kraft ist der Ort der Krafteinleitung in das flexible Verschlusselement. Hierfür wurde eine Zentriervorrichtung auf Basis eines Gleitlagers entwickelt und in das Dosiersystem integriert. Damit wird die reproduzierbare Belastung des flexiblen Verschlusselements im Rahmen gängiger Passungstoleranzen sichergestellt.

Die bewusste, funktionsorientierte Konstruktion ist eng mit dem Modell verknüpft. In diesem Zusammenhang ist vor allem die starre Lagerung des flexiblen Verschlusselements mit einer festen Einspannung am Rand zu nennen, was sich innerhalb des Modells leicht abbilden lässt. Gleichzeitig leistet die Konstruktion einen Beitrag zur Erfüllung der Gütekriterien bei der Durchführung von Messungen. Dies wird dadurch ermöglicht, dass die Messinstrumente nur an definierten Orten in definierten Einbauzuständen montiert werden können. So wird die Kraftmessdose über Verbindungselemente in Reihe mit dem piezoelektrischen Aktor montiert und die Aufnahme der eigentlichen Austrittsdüse dient als Aufnahme für einen Wegmesstaster. Somit ist die zentrierte Anordnung dieser Messinstrumente relativ zum flexiblen Verschlusselement, das untersucht werden soll, sichergestellt und der Objektivität und Reliabilität der Messung wird damit Rechnung getragen. Einen weiteren Beitrag zur Objektivität der Messung leistet die rechnergestützte Methode der Messdatenerfassung, was Ablesefehler durch den Bediener vermeidet. Das eigentliche Dosiersystem in der Verwendung als Messaufbau wird insgesamt nur geringfügig verändert, so dass durch Messungen ermittelte Erkenntnisse auf die Realität übertragbar sind. Einziger Unterschied zwischen dem Dosiersystem und dem Messaufbau ist die Tatsache, dass während einer Messung keine Dosierung vorgenommen werden kann, da entweder die Austrittsöffnung durch eine Blinddüse ersetzt wird oder anstelle der Austrittsdüse ein Wegmesstaster zum Einsatz kommt. Weitere Modifikationen sind konstruktionsbedingt nicht notwendig.

Das generierte Modell basiert auf der Modellierung des mechanischen Verhaltens des Verschlusselements. Als charakteristische Kenngröße für dieses mechanische Verhalten wurde die Steifigkeit des Verschlusselements gewählt. Diese Kenngröße beinhaltet unterschiedlichste Einflussparameter. So fließen in die Steifigkeit sowohl die Geometrie des Verschlusselements, die Werkstoffeigenschaften als auch die Art und Weise der Belastung mit ein. Die Grundlage für dieses Modell bietet die Kirchhoffsche Plattentheorie und es handelt sich somit um ein analytisches Modell. Zur Herleitung des Modells wird die Kirchhoffsche Plattentheorie ausführlich erläutert. Dabei werden Hintergründe sowie Voraussetzungen der Gültigkeit und Vereinfachungen deutlich gemacht. Die Motivation für die ausführliche Erläuterung der Kirchhoffschen Plattentheorie ist darin zu sehen, ein geschärftes Ver-

ständnis für diese Theorie und damit für das aufgestellte analytische Modell zu generieren. Die Herleitung der Kirchhoffschen Plattentheorie erfolgt zunächst aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und Übersichtlichkeit in kartesischen Koordinaten und wird anschließend auf das vorliegende rotationssymmetrische Problem in Polarkoordinaten transformiert. Die Beschreibung der Durchbiegung einer Platte entsprechend der Kirchhoffschen Plattentheorie führt zu einer Differentialgleichung 4. Ordnung, deren Lösung jeweils an den vorliegenden Lastfall durch entsprechende Integrationskonstanten angepasst werden kann. Beispielhaft werden einfache Lastfälle rotationssymmetrischer Platten konstanter Dicke aufgezeigt und dabei die Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie auf ein definiertes Problem demonstriert. Ausgehend davon werden Lastfälle, die im realen Dosiersystem bzw. bei den relevanten Messungen auftreten, abgeleitet. Dies beinhaltet neben der Überlagerung von Belastungen ebenso die Berücksichtigung von Platten mit Querschnittsänderungen entlang ihres Radius und somit die Möglichkeit, das flexible Verschlusselement abzubilden. Die Anpassung der Lösung der Kirchhoffschen Plattentheorie auf definierte Plattenprobleme wurde im Rahmen dieser Arbeit in MATLAB, einer kommerziellen Software des Unternehmens The MathWorks, Inc., umgesetzt.

Bei der Durchführung von Messungen wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Lastfälle betrachtet. Im Falle der Belastung des flexiblen Verschlusselements durch den Druck eines Fluids wurde dabei festgestellt, dass die resultierende Auslenkung messtechnisch nicht erfasst werden kann. Durch Vibrationen, die im Zuge der Druckerzeugung entstehen, wird die resultierende Auslenkung verfälscht und die Messung erfüllt somit nicht mehr das Gütekriterium der Validität. Anhand dieses Lastfalls lässt sich das aufgestellte analytische Modell zumindest mit dem verwendeten Messaufbau somit nicht verifizieren. Unter Vernachlässigung der Belastung durch den Druck eines Fluids konnte das Modell hingegen verifiziert werden. Die Belastung, die auf das flexible Verschlusselement wirkt, wird dabei durch den piezoelektrischen Aktor erzeugt. In der Verwendung des Dosiersystems als Messaufbau ohne Fluid kann dabei die resultierende Auslenkung des flexiblen Verschlusselements messtechnisch erfasst werden. Durch Variation einfacher, rotationssymmetrischer Platten konstanter Dicke konnte das analytische Modell qualitativ und quantitativ verifiziert werden. Die Auswertung der Messdaten spiegelt dabei die Reliabilität des Messaufbaus und der gesamten Messung wider. Die Untersuchung eines flexiblen Verschlusselements basiert auf der Berücksichtigung der Querschnittsänderung des flexiblen Verschlusselements durch den vorhandenen Stößel. Dies kann im analytischen Modell abgebildet werden und der Abgleich mit Messungen bestätigt die Gültigkeit des analytischen Modells. Dieses analytische Modell erlaubt die Identifikation relevanter Parameter und deren Bedeutung liegt in einem klaren, formalen Zusammenhang vor.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es somit gelungen, ein Dosiersystem aufzubauen und relevante Kenngrößen in einem Messaufbau zuverlässig zu ermitteln. Ein etabliertes Modell, basierend auf der Anwendung der Kirchhoffschen Plattentheorie, wurde verifiziert bzw. der Nachweis erbracht, dass die Konstruktion des Dosiersystems und des Messaufbaus die gewünschte Funktion tatsächlich erfüllt. Die Beherrschung toleranzbehafteter Größen zur gezielten Erzeugung einer gewünschten Realität wurde damit erreicht.

Als beispielhafte Anwendung des Dosiersystems wurde die Dosierung von Kunststoff demonstriert. Das gezielte Öffnen und Verschließen der Austrittsöffnung durch das flexible Verschlusselement macht sich an einem extrudierten Kunststoffstrang durch Strukturierung der Kontur deutlich. Während des geöffneten Zustands der Austrittsdüse tritt Kunststoff ungehindert aus und das Verschließen der Austrittsdüse macht sich durch Ein-

schnürungen deutlich. Die Funktion des Dosiersystems zum gezielten Starten und Stoppen eines Dosiervorgangs wurde damit nachgewiesen. Durch Verfahren einer Bauplattform unterhalb der Austrittsdüse entlang einfacher Geometrien und der gezielten Steuerung der Extrusion von Kunststoff, konnte die prinzipielle Anwendung des Dosiersystems für generative Fertigungsverfahren gezeigt werden. Die erfolgreiche Verwendung von Wasser als Medium innerhalb des Dosiersystems wurde ebenfalls umgesetzt. Dies bedeutet, dass mit ein und demselben Dosiersystem Fluide mit Viskositäten über mehrere Größenordnungen hinweg verarbeitet werden können.

Der beschriebene Inhalt der vorliegende Arbeit stellt eine Grundlage für weitere Untersuchungen und Anwendungen dar, die verschiedene Bereiche umfassen können. Die Anwendung des analytischen Modells zur Dimensionierung und Optimierung des Dosiersystems wird ermöglicht. Die Identifikation von Einflussparametern erlaubt die Betrachtung von inneren und äußeren, direkten und indirekten Zusammenhängen und damit die Abstimmung von Konstruktions- und Prozessparametern im eigentlichen Dosiersystem. Auf Basis der Gültigkeit des analytischen Modells hinsichtlich statischer Sachverhalte bietet sich die Möglichkeit für die Erweiterung hinsichtlich der Untersuchung dynamischer Prozesse. Dies könnte zu einem gesteigerten Verständnis des Dosiersystems führen und öffnet neue Anwendungsfelder, wie etwa Untersuchungen zur Ermüdung und Dauerfestigkeit des flexiblen Verschlusselements. Für die Umsetzung des Dosiersystems für generative Fertigungsverfahren, auch mit schwer prozessierbaren Kunststoffen, wurde die Grundlage gelegt. Die Grenzen hinsichtlich verwendbarer Materialien, Austragsgeschwindigkeiten, Austragsgeometrien und Dosierfrequenzen können untersucht werden. Zudem könnte der Messaufbau zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften im allgemeinen Sinne und speziell der Werkstoffeigenschaften generativ gefertigter Bauteile verwendet werden. Bei einigen generativen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise dem Selektiven Lasersintern, beeinflusst die Orientierung der Bauteile beim Aufbau den Materialzusammenhalt und damit die Eigenschaften des eigentlichen Bauteils. Über Biegeversuche könnten Richtungsabhängigkeiten von Werkstoffeigenschaften, wie Elastizitätsmodul oder Querkontraktionszahl, ermittelt werden. So gewonnene Erkenntnisse könnten die Berechnung und Auslegung solcher Bauteile unterstützen.

Literaturverzeichnis

- [1] ALTENBACH, HOLM ; ALTENBACH, JOHANNES ; NAUMENKO, KONSTANTIN: *Ebene Flächentragwerke: Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten*. Berlin : Springer, 1998. – ISBN 978-3-540-63228-3
- [2] ASTM INTERNATIONAL: *ASTM Standard*. Bd. F2792: *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. 2012. West Conshohocken : ASTM international, 2012
- [3] BAGLEY, E. B.: End Corrections in the Capillary Flows of Polyethylene. In: *Journal of Applied Physics* 5 (1957), Nr. 28, S. 624–627
- [4] BEITZ, Wolfgang ; GROTE, Karl-Heinrich: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20., neubearb. und erw. Berlin : Springer, 2001. – ISBN 978-3-540-67777-2
- [5] BEN-TZVI, Pinhas: *A dispensing system for generation in medical applications: Dispensing system in medical applications*. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing GmbH, 2010. – ISBN 978-3-838-36000-3
- [6] BREUNINGER, Jannis: *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern*. Berlin : Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-24324-0
- [7] CHMIEL H. ; SCHÜMMER P. ; WORTHOFF, R.H: Eine neue Methode zur Auswertung von Rohrrheometer-Daten. In: *Chemie Ingenieur Technik (CIT)* 23 (1971), Nr. 43, S. 1257–1259
- [8] CHUA, Chee K. ; LEONG, Kah F. ; LIM, Chu S.: *Rapid prototyping: Principles and applications*. 2. Singapore and New Jersey : World Scientific, 2003. – ISBN 978-981-238-120-0
- [9] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Deutsche Normen*. Bd. 2768: *Passungsauswahl: Toleranzfelder, Abmaße, Paßtoleranzen*. 1991. Berlin : Beuth, 1991
- [10] DÖRFLER, Nikolas ; LUETH, Tim C.: Integriertes Rapid-Prototyping von Organmodellen aus CT-Datensätzen. In: *Proc. Automatisierungstechnische Verfahren für die Medizin (Automed)* (2010), S. 53–54
- [11] EGGER, Hans: Knickung der Kreisplatte und Kreisringplatte mit veränderlicher Dicke. In: *Ingenieur-Archiv* 12 (1941), Nr. 3, S. 190–200

- [12] EHRENSPIEL, Klaus: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 3. München [u.a.] : Hanser, 2007. – ISBN 978-3-446-40733-2
- [13] ENTSFELLNER, Konrad: *Entwicklung nachgiebiger aktiver Mechanismen für medizinische Manipulatoren durch Lasersintern*. Garching, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2010
- [14] ERHARD, Gunter: *Konstruieren mit Kunststoffen*. 4. München : Hanser, 2008. – ISBN 978-3-446-41646-3
- [15] FEDERHOFER, Karl: Knickung der Kreisplatte und Kreisringplatte mit veränderlicher Dicke. In: *Ingenieur-Archiv* 11 (1940), Nr. 3, S. 224–238
- [16] FROHN, ARNOLD ; ROTH, NORBERT: *Dynamics of droplets*. Berlin and New York : Springer, 2000. – ISBN 978-3-642-08516-1
- [17] GEBHARDT, Andreas: *Rapid prototyping: Werkzeug für die schnelle Produktentwicklung*. München and Wien : Hanser, 1996. – ISBN 978-3-446-18240-0
- [18] GEBHARDT, Andreas: *Rapid prototyping: Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung*. 2. München [u.a.] : Hanser, 2000. – ISBN 3-446-21242-6
- [19] GEBHARDT, Andreas: *Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. 3. München : Hanser, 2007. – ISBN 978-3-446-22666-1
- [20] GEBHARDT, Andreas: *Understanding additive manufacturing: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*. Munich and Cincinnati : Hanser Publishers, 2012. – ISBN 978-3-446-42552-1
- [21] GEPP, Sebastian ; OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim: Herstellung von Mikrodüsen für die Extrusion von Thermoplasten. In: *10. Schwarzheider Kunststoffkolloquium* (2010)
- [22] GEPP, Sebastian ; OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim: Fabrication of Micro-Dies for Extrusion of Polymer Melts. In: *Proc. SPE Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC)* (2011), S. 1243–1247
- [23] GEPP, Sebastian ; OTTNAD, Thomas ; KESSLING, Oliver ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Druckabhängigkeit des Massenstroms von Polypropylenschmelzen durch Mikrodüsen kleiner 500 µm: Pressure Dependency of Mass Flow Rate of Polypropylene Melts through Micro Nozzles Smaller than 500 µm. In: *Chemie Ingenieur Technik (CIT)* 83 (2011), Nr. 4, S. 552–557
- [24] GIBSON, I. ; ROSEN, D. W. ; STUCKER, B.: *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York : Springer, 2010. – ISBN 978-1-4419-1119-3
- [25] GROSS, DIETMAR ; HAUGER, WERNER ; SCHRÖDER, JÖRG ; WALL, WOLFGANG A.: *Elastostatik*. 10., neu bearb. Berlin : Springer, 2009. – ISBN 978-3-642-00564-0
- [26] GRÜNWALD, Stefan: *Berührungsloses dispensen hochviskoser Flüssigkeiten*. Garching, Technische Universität München, Dissertation, 2005

- [27] GÜNTHER, Daniel: *Bimorph-Piezoaktoren mit strukturierten Elektroden für die Mikrofluidik*. Garching, Technische Universität München, Dissertation, 2008
- [28] HARNISCH, Jan W.: *Untersuchung eines Drop-on-Demand-Systems für den Hochtemperatureinsatz*. Garching, Technische Universität München, Dissertation, 2008
- [29] HASS, Johannes: *Softwareentwicklung zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften flexibler Bauteile mit Analyse und Validierung von Mess- und Auswertemethoden*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [30] HASS, Johannes: *Erarbeitung und Bewertung von Methoden zu indirekten Zustandsbestimmung eines Verschlussventils*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [31] HEHL, Karl: *Vorrichtung zur Herstellung eines dreidimensionalen Gegenstandes*. 2011 (Patentschrift DE 10 2009 030 099 B4)
- [32] HEINS, Julius F.: *Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Düsengeometrie und der Strangaufweitung bei der Freistrahlextrusion*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2011
- [33] JOHANNABER, Friedrich ; MICHAELI, Walter: *Handbuch Spritzgießen*. 2. München : Hanser, 2004. – ISBN 978-3-446-22966-3
- [34] KAMP, Martin: *Druckluftaufbereitung und Druckluftregelung zur direkten und indirekten Kühlung eines Piezoaktors in einem Kunststoffdruckkopf*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [35] KINSCHER, Heiner: *Entwicklung einer koaxialen Kraftübertragung von einem Piezoaktor auf ein Festkörpergelenk*. Garching, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 2011
- [36] KIRCHHOFF, Gustav: Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)* 1850 (1850), Nr. 40, S. 51–88
- [37] LÜSSMANN, Henrik: *Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des dynamischen Druckverlustes hochviskoser Fluide in periodisch betriebenen Ventilen*. Garching, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2012
- [38] LÜSSMANN, Henrik: *Modularisierte Neukonstruktion eines Halters für einen Kunststoffdrucker und einen Prüfstand*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [39] MAGG, Konstantin A.: *Grundlagen zur Konstruktion eines modularisierten Kunststoffdruckkopfes*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2011
- [40] MAIER, THOMAS ; STRAUSS, GERO ; HOFER, M. ; KRAUS, T. ; RUNGE, A. ; STENZEL, ROLAND ; BERGER, T. ; DIETZ, A. ; LUETH, TIM C.: A new Micromanipulator System for middle ear surgery. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2010), S. 1568–1573

- [41] MATHIAK, Friedrich U.: *Ebene Flächentragwerke II: Grundlagen der Plattentheorie*. Neubrandenburg, Hochschule Neubrandenburg, Skriptum, 2008
- [42] MATTHIESEN, Sven: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2002
- [43] MISSEL, Raphael: *Optimierung des Lagerungskonzepts eines Piezoaktors in einem Kunststoffdruckkopf*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [44] MUNZ, Otto J.: *PHOTO-GLYPH RECORDING*. 1956 (Patentschrift US 277 575 8)
- [45] NOTDURFTER, Johannes: *Charakterisierung von Kunststoffsträngen mit einer High-Speed Kamera*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [46] OERTEL, HERBERT ; BÖHLE, MARTIN ; DOHRMANN, ULRICH: *Strömungsmechanik: Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele*. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009. – ISBN 978-3-834-80483-5
- [47] OLSSON, Gran R.: Biegung der Rechteckplatte bei linear veränderlicher Biegesteifigkeit. In: *Ingenieur-Archiv* 5 (1934), Nr. 5, S. 363–373
- [48] OLSSON, Gran R.: Biegung kreisförmiger Platten von radial veränderlicher Dicke. In: *Ingenieur-Archiv* 8 (1937), Nr. 2, S. 81–98
- [49] OLSSON, Gran R.: Knickung der Kreisringplatte von quadratisch veränderlicher Steifigkeit. In: *Ingenieur-Archiv* 9 (1938), Nr. 3, S. 205–214
- [50] OTTNAD, Thomas ; GEPP, Sebastian ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Optical Analysis of Extrudate Swelling of Polymer Melts. In: *Proc. SPE European Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (EUROTEC)* (2011)
- [51] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Test Environment for an Elastic Mechanism - Related to a Kirchhoff Plate - for Usage as Pressure Sensor. In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exhibition (IMECE)* (2011)
- [52] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Minimizing of Tolerances of a Test Rig for Physical Testing and Validation of Simulation Data. In: *Proc. VVS 2012 Validation and Verification Symposium (V&V)* (2012)
- [53] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Redesign of a Test Environment for an Elastic Mechanism for Usage as Pressure Sensor Element. In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exhibition (IMECE)* (2012)
- [54] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Use of an Analytic Approach to proof Numerical Calculations of the deflection behaviour of thin plates. In: *Proc. AIP World Congress: 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA)* 1493 (2012), Nr. 1, S. 727–733

- [55] OTTNAD, Thomas ; LÜSSMANN, Henrik ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Drop of Pressure of Polymer Melts in Microscopic Channels. In: *Proc. SPE Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC)* (2012)
- [56] OTTNAD, THOMAS ; IRLINGER, FRANZ ; LÜTH, TIM C.: Optical Analysis of Extrudate Characteristics of Polymer Melts using a High-Speed Camera. In: *Proc. SPE European Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (EUROTEC)* (2013)
- [57] PRANDTL, LUDWIG ; BÖHLE, MARTIN: *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre: Grundlagen und Phänomene*. 12., vollst. überarb. und erw. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008. – ISBN 978-3-834-80430-4
- [58] REISSNER, Erich: Allgemeine Integration der Plattengleichung bei linear veränderlicher Steifigkeit. In: *Ingenieur-Archiv* 7 (1936), Nr. 2, S. 80–82
- [59] REN C. LUO ; YEN LIN PAN ; CHEN JUN WANG ; ZHONG HONG HUANG: Path planning and control of functionally graded materials for rapid tooling. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2006), S. 883–888
- [60] SACHS, EMANUEL M. ; CIMA, MICHAEL ; CORNIE, JAMES A.: Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 39 (1990), Nr. 1, S. 201–204
- [61] SAECHTLING, Hansjürgen ; BAUR, Erwin: *Saechtling-Kunststoff-Taschenbuch*. 30. München : Hanser, 2007. – ISBN 978-3-446-40352-3
- [62] SCHEUENPFLUG, Michael: *Passive Rapid-Prototyping-Mikromischer für die Synthese von Radiopharmaka*. Garching, Technische Universität München, Dissertation, 2010
- [63] SCHÜMMER P. ; WORTHOFF, R.H: An elementary method for the evaluation of a flow curve. In: *Chemical Engineering Science* 33 (1978), Nr. 6, S. 759–763
- [64] SCHWAIGER, J. ; KAGERER, M. ; TRAEGER, M. ; GILLEN, S. ; DOBRITZ, M. ; KLEEFF, H. J. and F. J. and Feussner ; LUETH, T. C.: Manufacturing of Patient-Specific Pancreas Models for Surgical Resections. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (2012)
- [65] SEIDL, Martin: *Charakterisierung, Auswertung und Ansteuerung eines piezoelektrischen Stapelaktors in einem Kunststoffdrucker*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [66] SHI, Jiayi ; PROCHAZKA, Holger ; MARKERT, Mathias ; GUMPRECHT, Jan ; LUETH, Tim C.: Fabrication of Anatomically Correct Head Phantoms Based on Processing of CT Images with MATLAB and Rapid Prototyping. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (2011)
- [67] SMANALIEVA, Jamila: *Ermittlung funktioneller und materialwissenschaftlicher Kennwerte von ausgewählten Honigsorten*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2007

- [68] SZILARD, Rudolph: *Theory and analysis of plates: Classical and numerical methods*. Englewood Cliffs - N.J : Prentice-Hall, 1974. – ISBN 978-0-139-13426-3
- [69] SZYMANSKI, D. ; HEIN, A. ; SODIAN, R. ; FU, P. ; HETZER, R. ; LÜTH, T. C.: 3D Rekonstruktion kardiovaskulärer Strukturen für das Rapid Prototyping und Tissue Engineering. In: *Proc. Automatisierungstechnische Verfahren für die Medizin (Auto-med)* (2001), S. 72–73
- [70] TARABANIS, K.A: Path planning in the Proteus rapid prototyping system. In: *Rapid Prototyping Journal* 7 (2001), Nr. 5, S. 241–252
- [71] TIMOŠENKO, STEPAN P. ; WOINOWSKY-KRIEGER, S.: *Theory of plates and shells*. 2. ed., [Nachdr.]. Auckland [u.a.] : McGraw-Hill, 1999. – ISBN 978-0-07-085820-9
- [72] TRAEGER, MATTIAS F. ; KRIEGER, YANNICK S. ; LUETH, TIM C.: Automated Construction of Gear Racks, Spur Gears and Helical Gears Using Matlab & STL Files for Rapid Manufacturing. In: *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (2013)
- [73] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *VDI-Richtlinien*. Bd. 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen*. 1996. Berlin : Beuth, 1996
- [74] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *VDI-Richtlinien*. Bd. 3404: *Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping)*. 2009. Berlin : Beuth, 2009
- [75] VETTER, Gerhard: *Handbuch Dosieren*. 2. Essen : Vulkan-Verl., 2002. – ISBN 978-3-802-72199-3
- [76] WEBER, S. ; SODIAN, R. ; MARKERT, M. ; REICHART, B. ; DAEBRITZ, S. ; LUETH, T. C.: 3D printing of anatomical heart models for surgical planning in cardiac surgery. In: *Proc. International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS)* (2007)
- [77] WENDEL, Bettina: *Prozessuntersuchung des “Fused Deposition Modeling“*. Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2009
- [78] WITTEL, Herbert: *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch*. 20. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011. – ISBN 978-3-834-81454-8
- [79] WOLF, Dominik: *Entwicklung einer Testumgebung zur Bewertung von Festkörpergelenken in einem Kunststoffdrucker*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [80] ZÄH, Michael ; HAGEMANN, Florian: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München : Hanser, 2006. – ISBN 978-3-446-22854-2

Betreute studentische Arbeiten

- [1] BUTZ, Matthias: *Untersuchung und Optimierung eines Wachsdruckers zur Erstellung dreidimensionaler Körper*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [2] CAMARENA, Víctor José: *Steuerung eines 3D-Tisches für ein generatives Fertigungsverfahren*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [3] GUBA, Max: *Analyse und Reproduktion eines Wachsdrucksystems auf Basis eines piezoelektrischen Biegewandlers*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [4] HASS, Johannes: *Softwareentwicklung zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften flexibler Bauteile mit Analyse und Validierung von Mess- und Auswertemethoden*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [5] HASS, Johannes: *Erarbeitung und Bewertung von Methoden zu indirekten Zustandsbestimmung eines Verschlussventils*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [6] HEINS, Julius F.: *Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Düsengeometrie und der Strangaufweitung bei der Freistrahlextrusion*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2011
- [7] KAMP, Martin: *Druckluftaufbereitung und Druckluftregelung zur direkten und indirekten Kühlung eines Piezoaktors in einem Kunststoffdruckkopf*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [8] KAMP, Martin: *Herstellung, Kontaktierung und Montage eines piezoelektrischen Biegewandlers in einem Wachsdruckkopf*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [9] KINSCHER, Heiner: *Entwicklung einer koaxialen Kraftübertragung von einem Piezoaktor auf ein Festkörpergelenk*. Garching, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 2011
- [10] LERNBECHER, Martin: *Entwicklung und Aufbau einer Ansteuereinheit für einen Wachsdruckkopf*. Garching, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2011
- [11] LÜSSMANN, Henrik: *Ermittlung der Druckverluste von Kunststoffschmelzen in Fluidkanälen*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2011

-
- [12] LÜSSMANN, Henrik: *Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des dynamischen Druckverlustes hochviskoser Fluide in periodisch betriebenen Ventilen*. Garching, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2012
- [13] LÜSSMANN, Henrik: *Modularisierte Neukonstruktion eines Halters für einen Kunststoffdrucker und einen Prüfstand*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2012
- [14] MAGG, Konstantin A.: *Grundlagen zur Konstruktion eines modularisierten Kunststoffdruckkopfes*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2011
- [15] MISSEL, Raphael: *Optimierung des Lagerungskonzepts eines Piezoaktors in einem Kunststoffdruckkopf*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010
- [16] NOTDURFTER, Johannes: *Charakterisierung von Kunststoffsträngen mit einer High-Speed Kamera*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [17] SEIDL, Martin: *Charakterisierung, Auswertung und Ansteuerung eines piezoelektrischen Stapelaktors in einem Kunststoffdrucker*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2013
- [18] THURN, Tim: *Entwicklung eines Wachsdruckkopfes basierend auf einem piezoelektrischen Standard-Multilayer-Biegewandler*. Garching, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 2012
- [19] WOLF, Dominik: *Entwicklung einer Testumgebung zur Bewertung von Festkörpergelenken in einem Kunststoffdrucker*. Garching, Technische Universität München, Semesterarbeit, 2010

Eigene Publikationen

- [1] GEPP, Sebastian ; OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim: Herstellung von Mikrodüsen für die Extrusion von Thermoplasten. In: *10. Schwarzheider Kunststoffkolloquium* (2010)
- [2] GEPP, Sebastian ; OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim: Fabrication of Micro-Dies for Extrusion of Polymer Melts. In: *Proc. SPE Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC)* (2011), S. 1243–1247
- [3] GEPP, Sebastian ; OTTNAD, Thomas ; KESSLING, Oliver ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Druckabhängigkeit des Massenstroms von Polypropylenschmelzen durch Mikrodüsen kleiner 500 μm : Pressure Dependency of Mass Flow Rate of Polypropylene Melts through Micro Nozzles Smaller than 500 μm . In: *Chemie Ingenieur Technik (CIT)* 83 (2011), Nr. 4, S. 552–557
- [4] KAGERER, Markus ; OTTNAD, Thomas ; EILER, Kenji ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Piezo Inkjet Drop-on-Demand Experimentation Platform Manufactured with Rapid Prototyping Techniques Enabling Future Technologies. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (2012)
- [5] KAGERER, Markus ; RUMSCHÖTTEL, Dominik ; OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Fast Droplet Generation with a Printhead Manufactured by Rapid Manufacturing Techniques Mounted on a Carrier Board. In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exhibition (IMECE)* (2013)
- [6] OTTNAD, Thomas ; GEPP, Sebastian ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Optical Analysis of Extrudate Swelling of Polymer Melts. In: *Proc. SPE European Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (EUROTEC)* (2011)
- [7] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Design, construction, and verification of a printhead - tolerant towards bubbles - dosing liquid wax using rapid prototyping techniques. In: *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (2011), S. 215–219
- [8] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Test Environment for an Elastic Mechanism - Related to a Kirchhoff Plate - for Usage as Pressure Sensor. In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exhibition (IMECE)* (2011)
- [9] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Minimizing of Tolerances of a Test Rig for Physical Testing and Validation of Simulation Data. In: *Proc. VVS 2012 Validation and Verification Symposium (V&V)* (2012)

-
- [10] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Redesign of a Test Environment for an Elastic Mechanism for Usage as Pressure Sensor Element. In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exhibition (IMECE)* (2012)
- [11] OTTNAD, Thomas ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Use of an Analytic Approach to proof Numerical Calculations of the deflection behaviour of thin plates. In: *Proc. AIP World Congress: 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA)* 1493 (2012), Nr. 1, S. 727–733
- [12] OTTNAD, Thomas ; KAGERER, Markus ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Modification and Further Development of a Drop on Demand Printhead for Wax Enabling Future 3D-Printing and Rapid Prototyping. In: *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (2012), S. 117–122
- [13] OTTNAD, Thomas ; LÜSSMANN, Henrik ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Drop of Pressure of Polymer Melts in Microscopic Channels. In: *Proc. SPE Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC)* (2012)
- [14] OTTNAD, Thomas ; LÜSSMANN, Henrik ; IRLINGER, Franz ; LÜTH, Tim C.: Requirements and first Approach to use an Extruder allowing Future Application in Additive Manufacturing Techniques. In: *Proc. SPE Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC)* (2013)
- [15] OTTNAD, Thomas ; LÜSSMANN, Henrik ; LÜTH, Tim C.: A Simple Flexible Plate for Usage as Force Sensor Element with Constant Stiffness. In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exhibition (IMECE)* (2013)
- [16] OTTNAD, THOMAS ; IRLINGER, FRANZ ; LÜTH, TIM C.: Optical Analysis of Extrudate Characteristics of Polymer Melts using a High-Speed Camera. In: *Proc. SPE European Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (EUROTEC)* (2013)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Thomas Ottnad
Geburtsdatum: 04. März 1982
Geburtsort: Kehl
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Familienstand: Ledig

Berufstätigkeit

10/2008 - 09/2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Studium

10/2002 - 05/2008 Studium des Maschinenbaus an der Universität Karlsruhe (TH) in
der Vertiefungsrichtung „Produktentwicklung und Konstruktion“
05/2008 Hochschulabschluss als Diplom-Ingenieur

Zivildienst

09/2001 - 06/2002 Rettungsdienst beim Deutschen Roten Kreuz in Bühl

Schulbildung

1992 - 2001 Windeck-Gymnasium Bühl: Abitur
1988 - 1992 Grundschule in Bühl

