

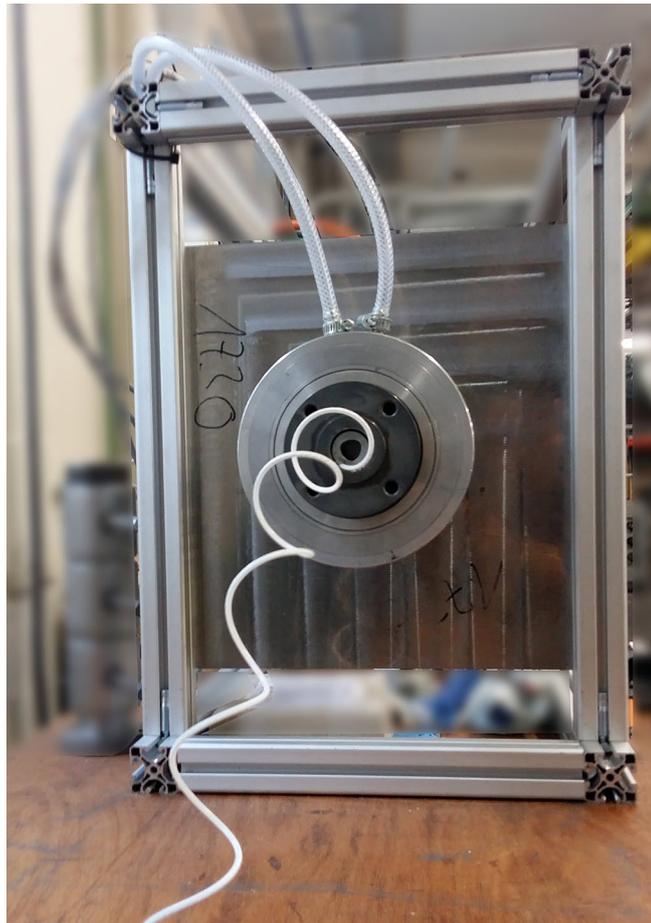
# Filamentextruder zum 3D-Drucken

## Extruder dank Filamentverarbeitung geeignet für die roboterbasierte additive Fertigung

Die additive Fertigung nach dem Strangablegeverfahren stößt hinsichtlich Ausstoß- und Druckgeschwindigkeit sowie Bauraumgröße schnell an Grenzen. Nachteilig erwies sich bisher das Aufschmelzen des Filaments in der heißen Düse. Ein neuartiger Extruder fördert das Filament durch eine sich drehende Extruderschnecke, ohne es zu zerkleinern. So lassen sich Aufschmelzleistung, Bauteilgröße und Druckgeschwindigkeit erhöhen.

Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren in der additiven Fertigung ist das Strangablegeverfahren. Bei diesem Verfahren wird ein thermoplastischer Kunststoffdraht (Filament) durch eine Fördereinheit in eine beheizte Düseneinheit transportiert und dort aufgeschmolzen (**Bild 1**). Durch die kontinuierliche Förderung wird das bereits aufgeschmolzene Filament als plastischer Schmelzestrang ausgestoßen. Der Schmelzestrang kann durch Bewegung der darunterliegenden Bauplattform in beliebigen Bahnen abgelegt werden. Auf diese Weise entsteht Schicht für Schicht ein additiv gefertigtes Objekt.

Die Druckgeschwindigkeit ist unter anderem durch die Aufschmelzleistung der verbauten Düseneinheit eingeschränkt [2]. Die Vorschubgeschwindigkeiten sind sehr gering, weshalb ein Energieeintrag durch Scherung vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund wird die Energie nahezu ausschließlich durch Wärmeleitung eingebracht, was einen entscheidenden Nachteil hat. Der entstehende Schmelzefilm zwischen der Düsenwand und dem noch festen Kunststoff im Inneren des Filaments wirkt wie eine Isolierschicht und verhindert ein effizientes Aufschmelzen des noch festen Filamentkerns [3, 4]. Ohne wesentliche Scherwirkung lässt sich der Schmelzefilm nicht verringern, wodurch die Aufschmelzleistung der beheizten Düseneinheit stark begrenzt ist. Hinzu kommt, dass durch die fehlende Scherung keine Mischwirkung eingebracht wird und sich eine inhomogene Temperaturver-



Stirnseite des aufgebauten Filamentextruders ohne Plastifizierungzone (© IKT)

mentkerns [3, 4]. Ohne wesentliche Scherwirkung lässt sich der Schmelzefilm nicht verringern, wodurch die Aufschmelzleistung der beheizten Düseneinheit stark begrenzt ist. Hinzu kommt, dass durch die fehlende Scherung keine Mischwirkung eingebracht wird und sich eine inhomogene Temperaturver-

teilung im Schmelzestrang ergibt [3].

Um höhere Ausstoßmengen für den Austrag eines Schmelzestrangs zu realisieren, können auch sogenannte Miniextruder eingesetzt werden. Diese bestehen meist aus einer Drei-Zonen-Schnecke und einem Glattrohrzylinder. Solche Extruder verarbeiten Kunststoffgranulat mit einem durchschnittlichen Durchmesser von ca. 3–5 mm. Die Extruder eignen sich jedoch nur bedingt für die roboterbasierte additive Fertigung, da die Förderung im Einzugsbereich immer abhängig von der Granulatsäule im Trichterbereich des Extruders ist. Außerdem können fördersteife Extruder mit einer genutzten Einzugszone nicht beliebig verkleinert werden, da das benötigte Drehmoment der Schnecke zu einem Abscheren des Schneckenkerns im Einzug führen würde, sodass solche Extruder erst ab größeren Ausstoßleistungen (> 10 kg/h) eingesetzt werden.

Schweißextruder verwenden für den lageunabhängigen Einsatz Filamente zur Verarbeitung (**Bild 2**). Durch einen speziellen Einzugsfördermechanismus wird das Filament in den Extruder transportiert. Das eingezogene Filament wird beim Einziehen gleichzeitig zu Granulatstücken

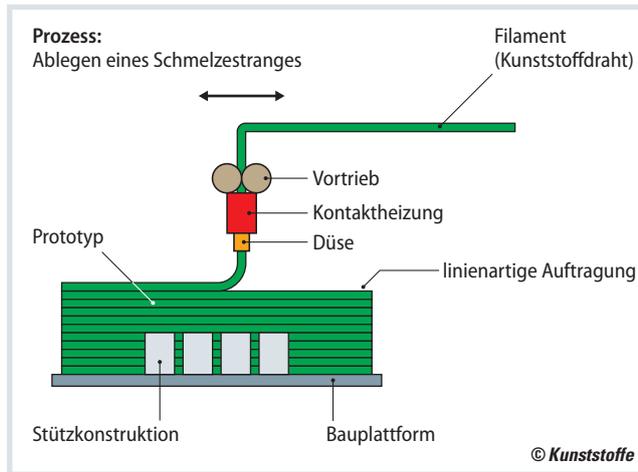
zerkleinert und anschließend meist einer klassischen Drei-Zonen-Schnecke mit Glattrohrzylinder zugeführt, um aufgeschmolzen zu werden. Schweißextruder werden meist im Handbetrieb eingesetzt, weshalb hier auf eine kompakte Bauweise Wert gelegt wird und Antriebe aus dem Werkzeugmaschinenbau verwendet werden, die die Schnecke in Bewegung setzen.

Schweißextruder können eine Ausstoßkapazität von ca. 5 kg/h erreichen. Der Einsatz solcher Schweißextruder wurde bereits für die roboterbasierte additive Fertigung geprüft. Es stellte sich dabei heraus, dass die Ausstoßpräzision zu gering ist, um verlässlich Bauteile herstellen zu können. Das liegt zum einen am Antrieb selbst, aber auch an der fehlenden Ausstoßkonstanz durch die Zerkleinerung des Filaments.

Nach aktuellem Stand der Technik existiert kein Extrudersystem, das eine Ausstoßleistung von 0,5–5 kg/h bei maximaler Aufschmelzeffektivität bietet und einsatzfähig für die roboterbasierte additive Fertigung ist. Das Institut für Kunststofftechnik forscht deshalb an einem neuartigen Extruder, um die additive Fertigung nach dem Strangablegeverfahren zu beschleunigen und auch größere Prototypen drucken zu können.

Der Extruder soll folgenden Anforderungen genügen:

- lageunabhängige Verarbeitung eines Filaments,
- Ausstoßleistung von 0,5–5 kg/h,
- maximale Aufschmelzeleistung durch eine genutete Plastifizierzone und eine Barrierschnecke,
- hohe Energieeffizienz,
- konischer Einzugsbereich von Schnecke und Zylinder zum Einzug des Filaments,
- präzise Motorsteuerung,



**Bild 1.** Additive Fertigung nach dem Strangablegeverfahren (Quelle: IKT [1])

- Möglichkeit zur Anbindung an einen Roboter.

### Entwicklung eines neuartigen Filamentextruders

Das Prinzip des Filamentextruders beruht darauf, dass ein thermoplastisches Filament durch die Drehbewegung einer Extruderschnecke gefördert wird. Dieser Fördermechanismus soll von einer konischen Einzugszone realisiert werden, in der das Filament zwangsgefördert wird. An die Einzugszone schließt sich eine Plastifizierzone an, durch die das Filament aufgeschmolzen und schließlich als plastischer Schmelzstrang ausgestoßen wird.

Vorversuche zeigen, dass das Filament für eine Förderung nach beschriebenem Vorbild nicht seitlich zur Schneckenachse eingezogen werden kann, da sonst ein Umwickeln der Welle stattfindet und eine Förderung behindert wird. Aus diesem Grund muss das Filament entlang der Schneckenachse eingezogen werden. Außerdem muss das Filament die Drehbewegung der Schnecke mitma-

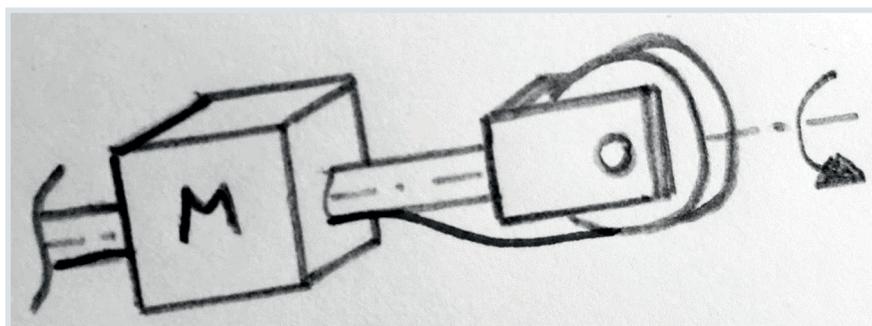


**Bild 2.** Handelsüblicher Handschweißextruder (© Wegener)

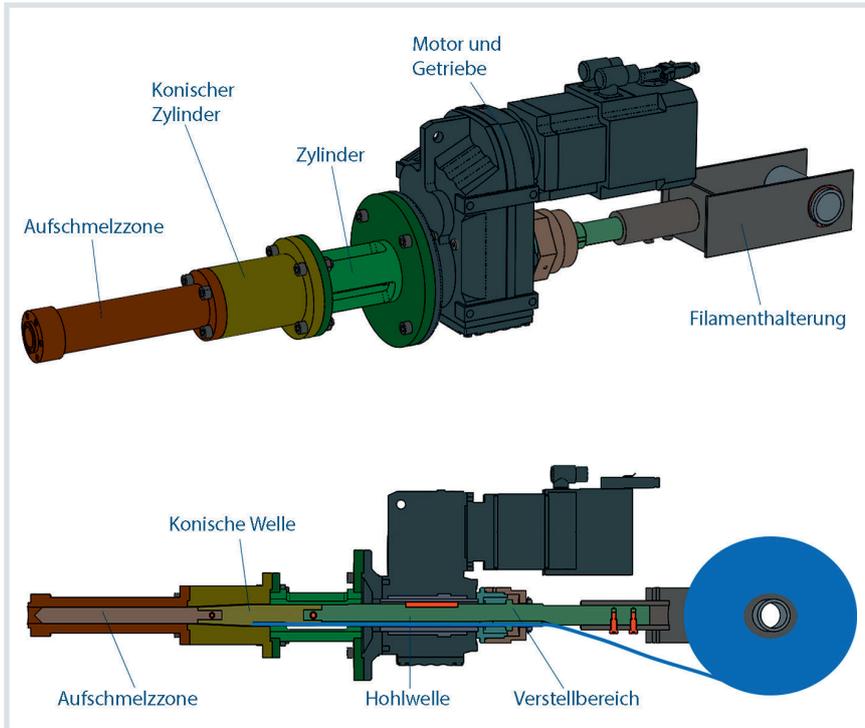
chen, um ein Verdrehen des Filaments zu verhindern. Diese Anforderungen ergeben für den zu entwickelnden Prototypen, dass sich die Filamentrolle auf der Schneckenachse befindet und ein Hohlwellenmotor zum Einsatz kommt (Bild 3).

Die konische Ausführung der Einzugszone wird gewählt, um durch die axiale Position der Schnecke im Zylinder einen verstellbaren Anpressdruck zu ermöglichen. Der sich ergebende Gesamtaufbau des Filamentextruders zeigt sich in Bild 4. Die Komponenten Schnecke und Zylinder sind jeweils dreiteilig ausgeführt, um kosten- und zeiteffiziente Anpassungen vornehmen zu können. Herzstück dabei ist die konisch ausgeführte Einzugszone.

Im Anschluss an die Einzugszone folgt die Plastifizierzone. Um diese so kompakt wie möglich ausführen zu können, wird die höchste Aufschmelzkapazität bei kleinstem Bauraum benötigt, was sich durch einen genuteten Zylinder in Kombination mit einer Barrierschnecke erreichen lässt. Diese Kombination ist auch unter dem Markennamen Helibar bekannt und hat sich in mehreren Tausend Extrusionseinheiten bewährt sowie im Markt etabliert.



**Bild 3.** Zentrales Konstruktionsprinzip: Die Filamentrolle ist auf der Schneckenwelle des Filamentextruders angebracht. Ein Hohlwellenmotor (M) dreht die Rolle synchron zur Schnecke (Quelle: [6])



**Bild 4.** Gesamtaufbau des Filamentextruders: Aufsicht (links) und Querschnitt (rechts) (© IKT)

### Versuchsdurchführung

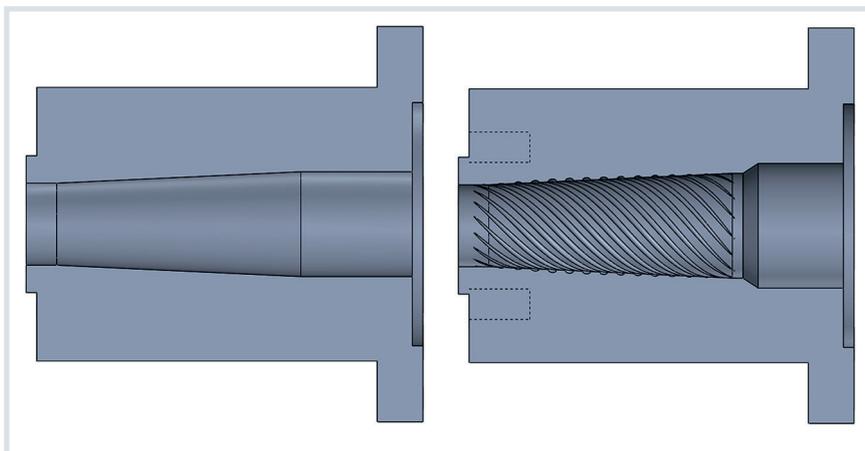
Die Versuche lassen sich in drei Stufen einteilen:

- Inbetriebnahme und Funktionalitätsprüfung der Einzugszone ohne Plastifizierzone,
- Inbetriebnahme und Leistungstest des Extruders mit Plastifizierzone,
- Überprüfung der Eignung für die additive Fertigung.

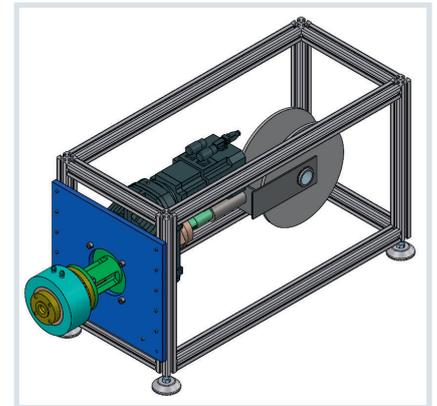
Bei der ersten Stufe wird der Filamentextruder bis auf die Plastifizierzone aufgebaut (**Bild 5**). Für einheitliche Bedingungen im Einzugsbereich sorgt eine separat angebrachte Wasserkühlung.

Die bereits erwähnte Flexibilität durch den mehrteiligen Aufbau der Schnecke und des Zylinders wird genutzt, um Komponenten in unterschiedlichen Geometrien zu testen. Bei der Einzugszone wird deshalb zum einen ein Zylinder mit glatter Innenoberfläche untersucht. Zum anderen kommt auch ein genuteter Zylinder zum Einsatz, der dem Förderprinzip von Nutbuchsen-Extrudern folgt (**Bild 6**).

Für die Versuche wurde ein ABS-Filament (Hersteller: Orbi-Tech, Leichlingen) mit einem Durchmesser von 2,85 mm verwendet. Des Weiteren wurden unterschiedliche Anpressdrücke durch die



**Bild 6.** Zylindervarianten für die Einzugszone: links glatt, rechts genutet (© IKT)



**Bild 5.** Versuchsaufbau für die Untersuchung der Einzugszone (© IKT)

axiale Verstellung der Schnecke getestet sowie die Ausstoßleistung bei Schneckendrehzahlen von bis zu  $214 \text{ min}^{-1}$  gemessen.

### Ergebnisse und Diskussion

Entscheidend für die prinzipielle Realisierung des Filamentextruders ist die Förderung des Filaments im Einzugsbereich. Die ersten Versuche zeigen, dass das Filament durch die Drehbewegung der Schnecke gefördert und helixförmig am Ende der Einzugszone ausgestoßen wird (**Titelbild**).

Weitere Tests zeigen, dass der glatte Zylinder die  $5 \text{ kg/h}$  auch bei hohem Anpressdruck des Filaments an die Zylinderwand nicht erzielen kann (**Bild 7**). Der Ausstoß ist in der glatten Variante eindeutig abhängig vom Anpressdruck. Dieser kann allerdings nicht beliebig gesteigert werden, um den Durchsatz zu erhöhen, da sonst die Förderung einbricht. Auch eine Erhöhung der Drehzahl ist nicht zielführend, da der spezifische Durchsatz (Durchsatz pro Schneckenumdrehung) für die nachgeschaltete Plastifizierzone bereits vorgegeben ist.

Der genutete Zylinder verhält sich wie erwartet und erzielt bei unterschiedlichen Anpressdrücken die geforderte Ausstoßleistung. Dabei ist der Durchsatz nahezu unabhängig vom Anpressdruck. Für eine schonende Förderung des Filaments kann deshalb ein sehr geringer Anpressdruck eingestellt werden.

Versuche mit der genuteten Einzugszone bei unterschiedlichen Drehzahlen zeigen, dass die Ausstoßleistung des Filamentextruders linear abhängig von der Schneckendrehzahl ist (**Bild 8, grüne Punkte**).

Das ist eine wichtige Eigenschaft des Extruders, da sich dadurch die gewünschte Ausstoßleistung während der additiven Fertigung leicht einstellen und präzise vorhersagen lässt. Dauertests bis 18 min decken allerdings auf, dass die Verdrehung des Filaments auf der Filamentrolle genauer untersucht werden muss, da sie den Prozess unterbrechen kann. Abhilfe kann eine ohnehin geplante Entkopplung der Drehbewegung der Filamentrolle zur Drehbewegung der Schnecke schaffen.

Aufgrund der erfolgreichen Versuche mit der Einzugszone konnten weitere Versuche mit integrierter Plastifizierzone durchgeführt werden. Hierfür wurde untersucht, wie sich die Ausstoßleistung des Extruders bei unterschiedlichem Gegen- druck verhält. Es wurden zwei verschiedene Düsenwerkzeuge mit einem Aus- trittsdurchmesser von 1,3 mm und 5 mm angefertigt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Ausstoßleistung unabhängig vom Werkzeuggedruck ist (Bild 8). Außerdem ist weiterhin die lineare Ab- hängigkeit der Ausstoßleistung von der Drehzahl gegeben. Zukünftige Versuche werden die Eignung des Extruders für die additive Fertigung untersuchen.

**Fazit: kontinuierliche Filament- förderung ohne Zerkleinerung**

Es ist erstmals gelungen, einen neuartigen Filamentextruder zu entwickeln, der ein thermoplastisches Filament durch eine sich drehende Schnecke verarbeiten kann. Der Extruder zeichnet sich dabei durch eine konische Förderzone aus, die es ermöglicht, ein Filament kontinuierlich

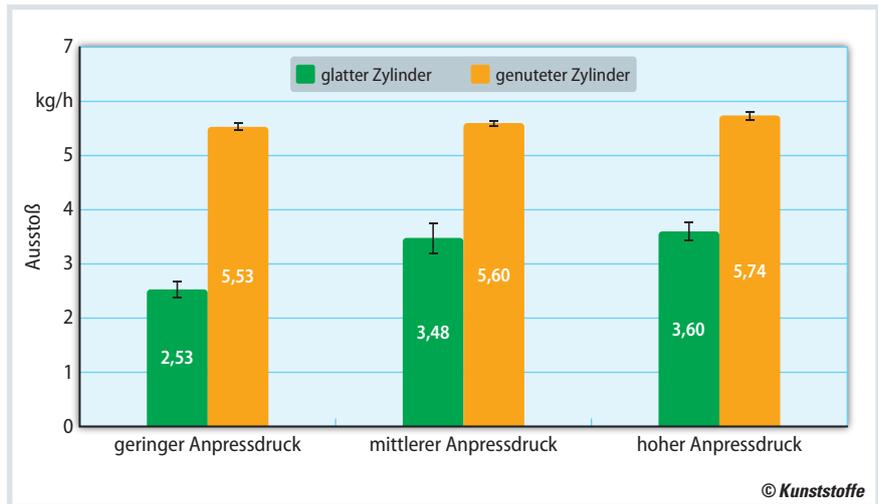


Bild 7. Glatter und genuteter Zylinder im Vergleich: Ausstoßmessungen mit ABS-Filament (Quelle: IKT)

zu fördern, ohne es zu zerkleinern. Die Verwendung eines Filaments ermöglicht den Einsatz des Extruders für die roboter- basierte additive Fertigung nach dem Strangablegeverfahren, da unabhängig von dessen Lage eine konstante Ausstoß- leistung erzielt wird. Durch die Verwen- dung einer genuteten Plastifizierzone mit Barrierschnecke im Anschluss an die ko- nische Einzugszone wird eine maximale Aufschmelzkapazität bei minimaler Bau- gröÙe erzielt.

Leistungstests zeigen, dass mit die- sem Konzept eine Ausstoßleistung von 5 kg/h erreicht wird und der Durchsatz linear von der Schneckendrehzahl ab- hängig ist, was die Grundlage für ein präzises Strangablegeverfahren bildet. Außerdem ist die Ausstoßleistung unab- hängig vom Werkzeuggedruck, so- dass die Werkzeuggeometrie leicht vari- ert werden kann.

Die Verdrehung des Filaments entlang seiner Hauptachse während des Prozes- ses sollte für zukünftige Versuche genau- er untersucht werden. Eine bereits ge- plante Entkopplung der Drehzahl der Filamentrolle von der der Schnecke wird als zielführend angenommen. Dies wür- de außerdem das Gewicht und die Träg- heit des Extruders reduzieren, was wie- derum vorteilhaft für die Anwendung in der roboterbasierten additiven Ferti- gung ist. ■

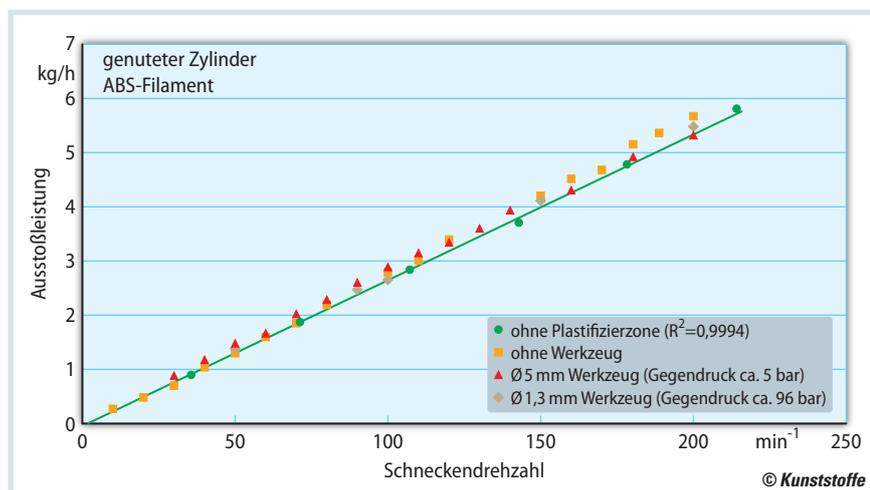


Bild 8. Ausstoßleistung bei unterschiedlichem Gegen- druck (Quelle: IKT)

**Die Autoren**

**M.Sc. Philipp Thieleke**, M.Sc., ist seit 2015 Mitarbeiter der Abteilung Verarbeitungs- technik am Institut für Kunststofftechnik (IKT) an der Universität Stuttgart und forscht insbesondere auf dem Gebiet der Einschneckenextrusion; philipp.thieleke@ikt.uni-stuttgart.de  
**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten**, geb. 1969, ist Leiter des IKT an der Uni- versität Stuttgart.

**Dank**

Dieses Forschungs- und Entwicklungspro- jekt wird mit Mitteln der Baden-Württem- berg Stiftung gefördert

**Service**

**Literatur & Digitalversion**

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2019-06](http://www.kunststoffe.de/2019-06)