

1 Einleitung

Introduction

Die stetig steigenden Anforderungen an die Funktionalität, Nachhaltigkeit und Miniarisierung von High-Tech-Produkten stellen Wissenschaftler täglich vor neue Herausforderungen. In unterschiedlichsten Anwendungsbereichen werden dabei immer mehr Funktionsmechanismen den über Millionen von Jahren evolutionär entwickelten Wirkprinzipien der Natur entlehnt. Diese werden in innovative Produkte integriert, welche mit zunehmendem Preisdruck und hohen Anforderungen an die Stückzahlen hauptsächlich auf der Basis von Kunststoffmaterialien in replizierenden Verfahren hergestellt werden.

Im Bereich der Produktionstechnologie ist dabei die Skalierbarkeit neuartiger Produkte und Prozesse eine wiederkehrende Herausforderung. Insbesondere in den Bereichen bionischer und optischer Systeme wird dabei zunehmend auf kontinuierliche Produktionsverfahren nach dem „Rolle-zu-Rolle“ Prinzip gesetzt. Dieses beschreibt Verfahren, in denen eine Kunststoff-Warenbahn kontinuierlich verarbeitet wird. Die realisierbaren Prozesse reichen dabei von der Extrusion chemisch funktionalisierter Polymermaterialien über die Strukturierung von Oberflächen im Millimeter-Bereich zur Erzeugung haptischer Eigenschaften bis hin zur Produktion mikro- und nanoskaliger Oberflächenstrukturen. Letztere finden ihre Anwendungen dabei in den Bereichen technischer Beleuchtungselemente, mikrofluidischer Systeme oder medizinischer Anwendungen in Diagnostik und Medikation.

Die Erwartungen an die Marktentwicklungen der genannten Bereiche ist hoch und reicht von einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate des Umsatzes von 6% für den mit medizinischen Kunststoffprodukten [FROS21] erzeugten Umsatz bis hin zu einer Erwartung von 17,5% an die jährliche Wachstumsrate im Bereich „Smart Lighting“ [FROS21a], in welchem insbesondere die kontinuierliche Produktion von Lichtleitern und optischen Folien eine Rolle spielt.

Die hochskalige Produktion von immer feineren Oberflächenstrukturen stellt dabei neue Herausforderungen an die Replikationstechnologie für thermoplastische Kunststoffe. Eine variotherme Prozessführung ist dabei zur Realisierung hoher Replikationstreuen unabdingbar und in diskontinuierlichen Herstellungsverfahren wie dem Spritzguss oder dem Spritzprägeguss seit langem etabliert. Trotz des bekannten positiven Einflusses einer variothermen Prozessführung auf die Replikationsqualität befinden sich kontinuierlich variotherm arbeitende Systeme für die Folienverarbeitung noch im Forschungsstadium. Insbesondere die Realisierung eines kontinuierlichen thermischen Gradienten im Prägewerkzeug stellt dabei große Herausforderungen an die Maschinentechnik.

Mit der vorliegenden Arbeit soll demzufolge ein Beitrag zur Übertragung des variothermen Verfahrensansatzes auf kontinuierliche Verarbeitungsprozesse geleistet werden. Hierfür wurde ein neuartiges folienverarbeitendes Heißprägemodul zur Mikrostrukturierung thermoplastischer Kunststoffe entwickelt, aufgebaut und getestet. Das

Maschinenkonzept basiert dabei auf der Nutzung eines Mittelhochfrequenz-Induktionsheizers und der gezielten Ausnutzung des Skin-Effektes zur Realisierung thermischer Gradienten an der Werkstückoberfläche. Im Gegensatz zu bekannten Forschungsansätzen aus der Literatur wurde dabei eine diamantbearbeitete Prägewalze als Prägewerkzeug verwendet, um die spätere Übertragung des Prozesses in industrielle Systeme zu erleichtern. Weiterhin wurde eine vollflächige Andruckeinheit für das System entwickelt, welche auf der Umschlingung des Werkzeugs mit einem Stahlband basiert. Die wissenschaftliche Arbeit ist in die folgenden Teilaspekte gegliedert:

- Aufarbeitung des Standes der Technik in Forschung und Industrie und Identifizierung relevanter Potentiale
- Konzeptionierung und Realisierung eines kontinuierlich variothermen Heißprägemoduls
- Simulative Analyse des entstehenden Temperaturfeldes auf der Werkzeugoberfläche
- Experimentelle Überprüfung der thermischen Homogenität des erzeugten Temperaturfeldes
- Pilotproduktion relevanter Mikrostrukturen und messtechnische Quantifizierung der Abformungen
- Empirische Überprüfung der realisierbaren Temperaturgradienten im kontinuierlichen Betrieb

Aufbauend auf den im Rahmen dieser Forschungsarbeit erarbeiteten Erkenntnissen werden Impulse für die weitere Entwicklung des Verfahrens im Rahmen zukünftiger Arbeiten gegeben.

Introduction

The ever-increasing demand for novel functionalities, sustainability and miniaturization of high-tech products offers new challenges for researchers every day. Many different fields of applications rely on the functional principles of nature, developed by evolution in millions of years. These functionalities are integrated into innovative products, which are, with increasing requirements to quantity and price, mostly manufactured from polymers by replication processes.

Therefore, the scalability of novel products is a continuously re-occurring challenge in the field of production technology. Especially in the field of bionic and optical applications, the continuous manufacturing principle of “roll-to-roll” manufacturing gains more and more importance. It denotes a process, in which an endless polymer substrate is continuously processed. The possible processes range from the extrusion of chemically functionalized materials over the texturing of surfaces in the millimeter-regime down to the production of micro- and nanoscale surface features. Applications of these surfaces can be found in the technical-lighting market as well as medicine or life-sciences.

The expectations to the mentioned markets are high and range from a compact annual growth ratio of 6 % in the case of medical plastics [FROS21] up to an expected annual growth of 17,5 % in the field of “Smart Lighting” [FROS21a], in which the continuous production of optical films and light-guides is even more important.

The high-volume production of fine surface-structures offers challenges to the replication-technology of thermoplastic polymers. A variothermal process is required for high-quality replications and has been established in connected areas of polymer replication like injection-molding and injection-compression-molding for a long time. Although the benefits of variothermal polymer processing are well known, variothermal systems for the processing of thermoplastic films can still be found mostly in the research sector. Especially the application of a continuous thermal gradient offers a challenge to the machine technology of these systems.

For this reason, the focus of this work is to transfer the idea of variothermal processing to a continuous thermal Nanoimprintlithography-process. For this purpose, a variothermal hot-embossing module has been developed, set-up and tested. The concept is based on a medium-high-frequency induction heating system and the exploitation of the skin-effect to realize a thermal gradient on the surface of the embossing drum. In contrast to the present state-of-the-art, a diamond-turned embossing drum was used in this work to ease the transfer to industrial processing systems. Further, an imprinting-unit with an enhanced contact-area was developed based on a steel-belt, which is wrapped around the embossing drum in a 180° angle. The present work is subdivided into the following contents:

- Elaboration on the current state-of-the-art in research and industry and identification of relevant potentials

- Concept and set-up of a continuous variothermal hot embossing module
- Simulative analysis of the temperature field on the surface of the embossing drum
- Experimental proof of the thermal homogeneity of the induced temperature field
- Pilot production of relevant microstructures and metrological quantification
- Empirical proof of the possible temperature gradients during continuous operation

Finally, suggestions for further research are given based on the insights gained during this work.