

1 Einleitung

In verschiedenen Branchen ist ein Trend hin zu dünnen, flexiblen, leichten und kosteneffizienten Produkten und Produktkomponenten zu beobachten, welcher mit einer erhöhten Nachfrage nach geeigneten kontinuierlichen Produktionsanlagen einhergeht [FROS17]. Zu den auf solchen Anlagen gefertigten Produkten gehören unter anderem flexible organic-light-emitting-diode (OLED) Bildschirme [STAN16], flexible Solarzellen [GALA11; SØND12] sowie Batterien und Brennstoffzellen [CHEN20; CHEN16]. Zusätzlich werden Produktkomponenten wie flexible, gedruckte Elektronik [WONG09; HU10] und Lichtleiter [WANG13; WANG09] immer häufiger in neuen Produktentwicklungen verwendet. Ein Grund für diese Entwicklung sind die hohen Kosteneinsparungen durch die kosteneffiziente Herstellung dieser neuen Produkte und Produktkomponenten durch das Rolle-zu-Rolle (R2R) Produktionsverfahren, welches sich aufgrund der realisierbaren hohen Produktionsgeschwindigkeiten bei Verwendung von flexiblen Materialien hervorhebt.

Beim R2R-Produktionsverfahren wird Material (die Warenbahn) von einer Rolle abgewickelt und kontinuierlich durch verschiedene Prozessschritte geführt. Nach der Bearbeitung kann das Substrat wieder auf eine Rolle gewickelt oder direkt vereinzelt werden. Das R2R-Verfahren wird in der Industrie seit dem 19. Jahrhundert im Zeitungsdruck verwendet [GERH75] und wurde seither stets weiterentwickelt. Der Fokus der Weiterentwicklung richtete sich auf höhere Produktionsgeschwindigkeiten und eine störunanfällige Handhabung der Warenbahn.

Die wachsenden Möglichkeiten zur Funktionalisierung der flächigen Warenbahnen und die gleichzeitig immer geringere Dimensionierung der Funktionselemente erfordern eine zunehmend präzisere Handhabung der Warenbahn. Daraus ergeben sich neue Anforderungen an die Fertigung neuer Produkte und Produktkomponenten. Der Fokus bei der Weiterentwicklung des Produktionsverfahrens verlagert sich in Richtung einer höheren lateralen Genauigkeit bei der Bahnlaufführung sowie einer stabilen und konstanten Bahnzugkraft. Hinzu kommt der Bedarf, mehrere Funktionen in einem kontinuierlichen Laminierprozess miteinander zu verbinden [BREC15]. Beim Verbinden mehrerer Warenbahnen in einem kontinuierlichen Laminierprozess muss berücksichtigt werden, dass zur Vermeidung von Falten im Lagenverbund eine homogen verteilte Spannung in beiden beteiligten Lagen gegeben sein muss. Die Problematik der gängigen Verfahren für die Regelung der lateralen Warenbahnposition liegt darin, dass die Bahnzugspannung inhomogen in der Warenbahn verteilt wird. Dies geschieht beispielsweise bei balligen Walzen zur mechanischen Zentrierung [EGGE08] der Warenbahn und auch bei Drehrahmen [ERH20; BST20a] (vgl. Bild. 1.1). Insbesondere die Reibung zwischen der Warenbahn und den Walzen führt zu unerwünschten Verzerrungen des Bahnmaterials, die erst nach einer geschwindigkeitsabhängigen Einlaufphase angeglichen werden.

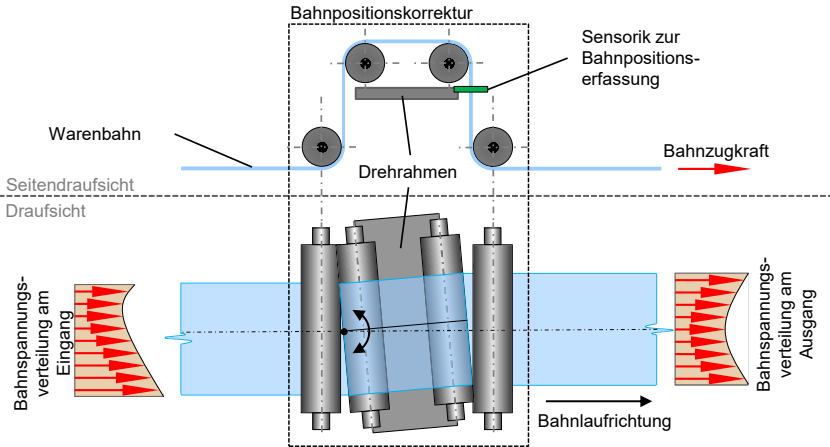


Bild 1.1: Funktionsweise eines Drehrahmens der Firma E+L nach [ERH20]

Bei der Regelung der lateralen Warenbahnposition, die einer Solltrajektorie folgt, wird durch die Änderung der Stellgröße eine Änderung der lateralen Bahnspannungsverteilung der Bahn hervorgerufen, welche eine laterale Positionsverschiebung der Bahn bewirkt. Bei empfindlichen Materialien kann diese Änderung bereits zu Beschädigungen führen. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren erforscht werden, das eine Positionsregelung durch eine kontaktfreie Bahnaufführung wesentlich dynamischer macht und Änderungen in der Bahnspannungsverteilung bei der Positionsregelung überflüssig macht. Somit können auch die Fertigungstoleranzen für einen mehrlagigen Laminierprozess deutlich verringert und Beschädigungen bei empfindlichen Materialien vermieden werden.

Dabei wird der Positions- und Bahnspannungsfehler am Eingang durch geeignete Aktoren und Sensoren kompensiert und so am Ausgang eine homogene Bahnspannungsverteilung und eine konstante Position beibehalten. Zusätzlich wird die Bahnspannungsverteilung in beiden Lagen erfasst und durch eine Folgeregelung aufeinander angepasst. Auf diese Weise sollen relative Versatzfehler der beiden beteiligten Lagen vor ihrer Entstehung vermieden werden. Das Ziel ist die genaue Ausrichtung beider Lagen basierend auf eingebrachten Funktionsmerkmalen (vgl. Bild 1.2). Durch die genaue Ausrichtung beider Lagen soll eine Verknüpfung der in die Bahn eingebrachten Funktionen der beteiligten Lagen ermöglicht werden. Die notwendige Genauigkeit für die Verknüpfung wird basierend auf den aktuell erreichbaren Fertigungstoleranzen bei der Funktionalisierung der einzelnen Lagen bestimmt.

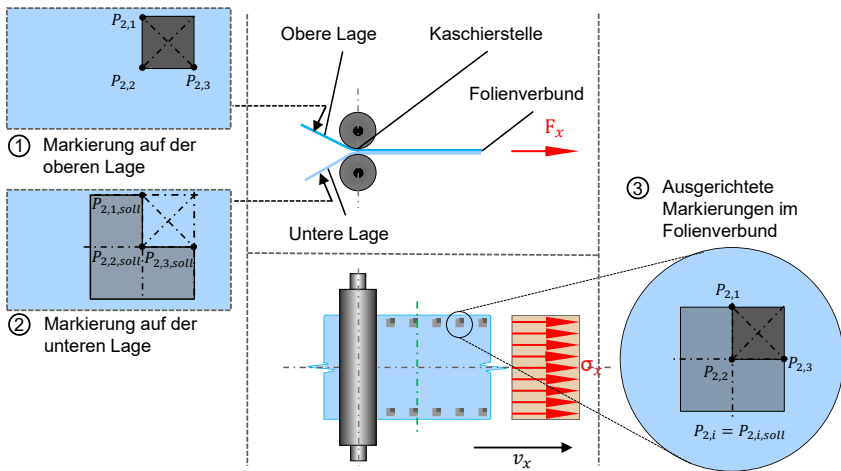


Bild 1.2 Angestrebtes Verhalten der laminierten Warenbahnen nach der Laminierstelle

Die wissenschaftlichen Aspekte dieser Arbeit lassen sich dabei in die folgenden Abschnitte aufteilen:

- Konzeption und Aufbau eines Laminiermoduls zur funktionalen Schichtlaminiierung mit einer reibungsfreien Bahnlauführung und Manipulation unter Berücksichtigung verschiedener Fehlerszenarien
- Herleitung eines geeigneten Modells zur Beschreibung des Einflusses der Stellgrößen auf die Bahnspannungsverteilung und die Bahnposition basierend auf den gegebenen Messgrößen zur Bestimmung der lateralen Verschiebung und der Bahnspannungsverteilung an der Laminierstelle
- Validierung des Modells und Identifikation der Modellparameter am realen Systemverhalten
- Konzeption und Implementierung eines geeigneten Regelungskonzeptes für die Realisierung des kontinuierlichen funktionalen Schichtlaminiierungsprozesses
- Verifizierung des entwickelten Regelungs- und des Systemkonzeptes anhand von Untersuchungen der Fertigungsgenauigkeiten bei der Durchführung von Prozessversuchen

Ausgehend von den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen werden weiterführende Ansätze für künftige Forschungsarbeiten im Bereich der kontinuierlichen R2R-Fertigung aufgezeigt.

Introduction

A trend towards thin, flexible, lightweight and cost-efficient products and product components can be observed in various industries, which is connected to an increased demand for suitable continuous production facilities [FROS17]. Products manufactured on such systems include flexible organic-light-emitting-diode (OLED) displays [STAN16], flexible solar cells [GALA11; SØND12] as well as batteries and fuel cells [CHEN20; CHEN16]. In addition, components such as flexible printed electronics [WONG09; HU10] and light guides [WANG13; WANG09] are being increasingly used in new product developments. One of the reasons for this development is the significant cost savings achieved by the cost-efficient manufacture of these new products and product components due to the roll-to-roll (R2R) production process, which is characterized by the high production speeds which can be achieved using flexible materials.

In the R2R production process, material (the web) is unwound from a roll and continuously fed through a series of process steps. After processing, the substrate can be rewound onto a roll or be separated directly. In industry, the R2R process has been used in newspaper printing since the 19th century [GERH75] and has been continuously further developed since then. The focus of further development was directed towards higher production speeds and a stable handling of the web.

The growing possibilities for functionalization of the webs and the simultaneously decreasing dimensions of the functional elements require an increasingly precise handling of the web. This results in new requirements for the manufacturing of new products and product components. The focus in the further development of the production process is shifting in the direction of higher lateral accuracy for web guidance and stable and constant web tension. In addition, there is a need to combine several functions in a continuous lamination process [BREC15]. When joining several webs in a continuous lamination process, it must be taken into account that a homogeneously distributed tension must be present in both involved layers in order to avoid folding. The problem of the common methods for the control of the lateral web position is that the web tension is distributed inhomogeneously in the web. This occurs, for example, with convex rollers for mechanical web centering [EGGE08] and also with pivoting frames [ERH20; BST20a] (see Fig. 1.1). Especially the friction between the web and the rollers leads to unwanted distortions of the web material, which will only be adjusted after a velocity-dependent start-up phase.

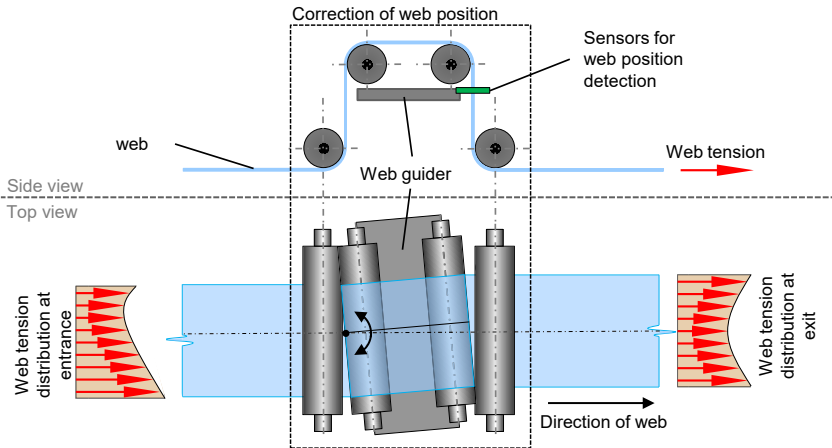


Figure 1.1: Principle of web guiding frame from E+L after [ERH20]

When controlling the lateral web position, which follows a nominal trajectory, the change of the control variable causes a change of the lateral web tension distribution of the web, which causes a lateral position shift of the web. For sensitive materials this change can already lead to damage. For this reason, a method is to be researched in this thesis which allows for a much more dynamic position control by eliminating the friction in the system and which makes changes in the web tension distribution during the position control superfluous. Thus, the manufacturing tolerances for a multilayer lamination process can be significantly reduced and damage to sensitive materials can be avoided.

The position and web tension error at the input is compensated by suitable actuators and sensors, thus maintaining a homogeneous web tension distribution and a constant position at the output. In addition, the web tension distribution in both layers is recorded and adjusted to each other by a follow-up control. In this way, relative offset errors of the two layers involved are to be avoided before they occur. The main objective is the precise alignment of both layers based on integrated functional features (see figure 1.2). The precise alignment of both layers shall enable a connection of the functions of the involved layers which have been introduced into the web. The necessary accuracy for the connection is determined based on the currently achievable manufacturing tolerances during the functionalization of the individual layers.

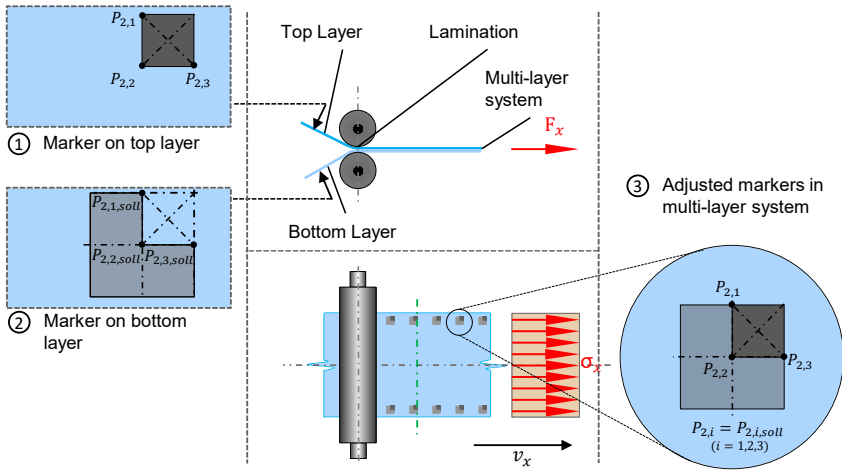


Figure 1.2: Intended behavior of laminated multi-layer system after lamination

The scientific aspects of this work can be divided into the following sections:

- Conception and design of a lamination module for functional lamination with frictionless web guiding and web manipulation under consideration of different error scenarios
- Derivation of a suitable model to describe the influence of the control variables on the web tension distribution and the web position based on the given measurement variables to determine the lateral displacement and the web tension distribution at the lamination point
- Validation of the model and identification of the model parameters in the real system environment
- Design and implementation of a suitable control concept for the realization of the continuous functional lamination process
- Verification of the developed system and control concept based on investigations of the manufacturing accuracy during real processing tests

Based on the results of this thesis, further aspects for future research in the field of continuous R2R production are presented.