

» Analyse und Optimierung von Extrusionsprozessen mit DoE

Nachschrumpf reduziert, Produktion gesteigert

Im Rahmen eines Innosuisse Projektes der Hochschule für Technik Rapperswil zusammen mit der Datwyler Cabling Solutions AG wurde der Ummantelungsprozess von Glasfaserkabeln analysiert. Neben der numerischen Simulation wurde das Nachschrumpfen des Kabelmantels mithilfe der statistischen Versuchsplanung (DoE) optimiert. Durch die systematische Vorgehensweise konnte die Hauptzielgrösse um bis zu 30% verbessert werden und dies bei einer zusätzlichen Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit von 50%.

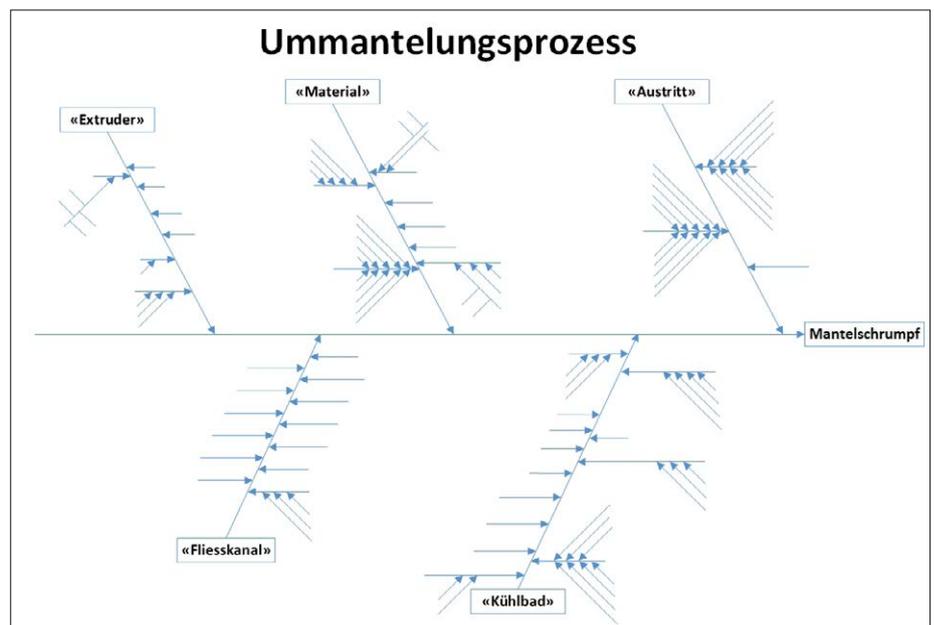
» **Silvan Walker**¹,
Prof. Daniel Schwendemann¹,
Prof. Dr. Olaf Tietje²,
Beat Schmucki³

Übermässiges Nachschrumpfen (post-shrinkage) des Kabelmantels von Glasfaserkabeln (Fiber Optics) erzeugt Druckkräfte auf die Fasern, was zu Dämpfungserhöhungen und Qualitätseinbussen führt. Ziel des Projektes war es, diesen Mantelschrumpf auf ein Minimum zu reduzieren oder gar zu eliminieren. Anhand von Analysen, Versuchen und Simulationen sollte vertieftes Wissen über den Schrumpf und seine Beeinflussung aufgebaut werden, sodass der Nachschrumpf bestenfalls vorhergesagt und basierend darauf, die Extrusionswerkzeuge und die Prozessführung optimiert werden können.

FO-Kabel (Fiber Optic) sind Glasfaserkabel zur schnellen Datenübertragung durch Glasfasernetze bis in die Gebäude und die Wohnungen der Teilnehmer. Es werden Indoor- und Outdoor-Kabel unterschieden:

Indoor-Kabel werden eingesetzt für Inhouse-Verkabelung für Fibre to the Home (FTTH), für Datennetzwerke und Gebäudeautomatationen sowie als Verbindungskabel zwischen Hausübergabepunkt (HÜP) und Datendose in der Wohnung. Sie sind verlegbar in Brüstungskanälen, Rohranlagen und Steigzonen und eignen sich zum Spleissen im Hausanschlusskasten und in der Datendose. Die Glasfaser-Innenkabel sind typischerweise mit zwei oder vier Fasern bestückt und weisen eine geringe Brandlast auf.

¹ IWK an der HSR Rapperswil, ² HSR Hochschule für Technik, Rapperswil, ³ Datwyler Cabling Solutions AG, Altdorf



Einflussanalyse

Grafiken: IWK

Outdoor-Kabel werden eingesetzt für FTTx, Fibre-to-the-Home-Netze. Sie sind metallfrei und enthalten typischerweise bis zu 24 Fasern.

In den letzten Jahren wurde die Dimension der FO-Produkte laufend reduziert, währenddem die Bedürfnisse der FO-Kabel in Bezug auf post-shrinkage stark gestiegen sind. Um die hohe Qualität sowohl im Indoor- als auch im Outdoor-Bereich zu verbessern, ist es unabdingbar, die Produktionsprozesse unter Kontrolle zu haben. Der Mantelschrumpf ist eine Folge der Materialeigenschaften und des Extrusionsprozesses, welcher für die Ummantelung der Kabel eingesetzt wird.

Einflussfaktoren und Zielgrößen

In einem ersten Schritt wurden die Zielgrößen, wie beispielsweise der Man-

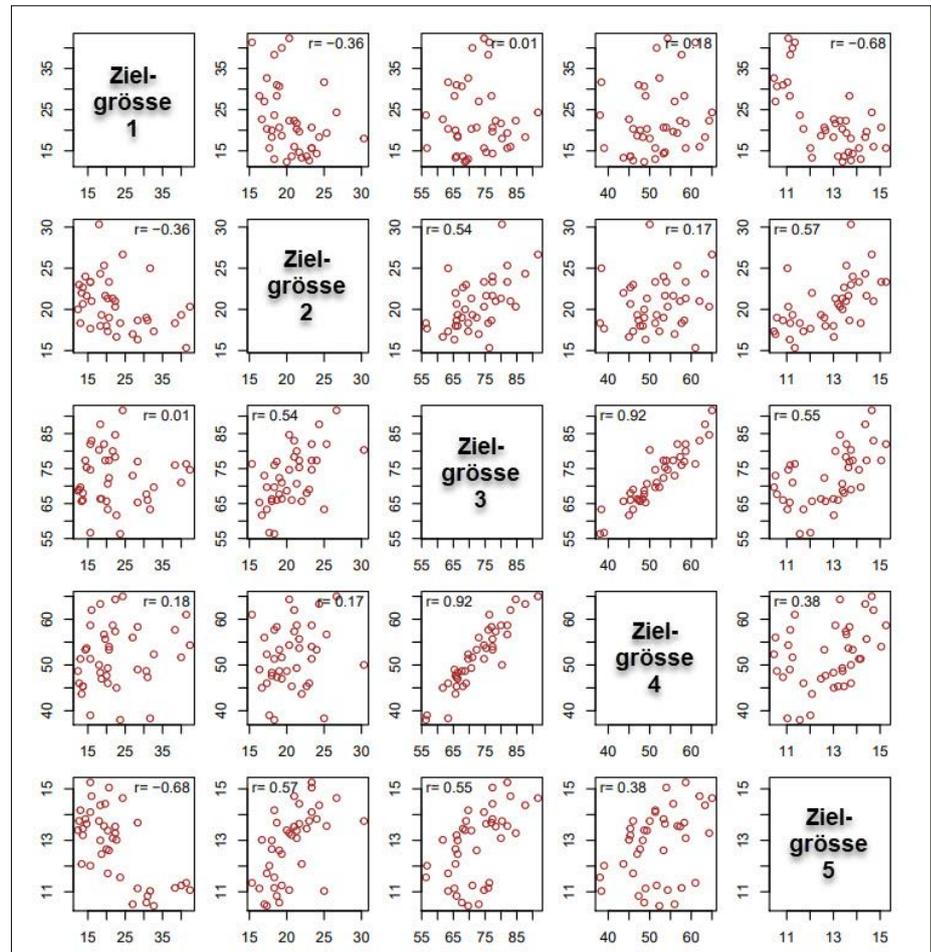
telschrumpf, und deren Testmethoden exakt definiert. Parallel dazu wurden kunststofftechnische Analysen durchgeführt und Thesen aufgestellt, welche anhand der Resultate bestätigt oder widerlegt werden sollten. Im zweiten Schritt wurde der Ummantelungsprozess grundlegend betrachtet und alle möglichen Einflüsse auf die Zielgrößen anhand von Ishikawa-Diagrammen dokumentiert.

Anschließend wurden alle Einflussfaktoren kategorisiert und mittels einer Systemgrenze gefiltert. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde nur der Ummantelungsprozess mittels Extrusion betrachtet. Alle Analysen wurden auf den bestehenden Extrusionslinien und mit den produktionsüblichen Kunststoffen durchgeführt. Es wurde keine Modifizierung des Mantelmaterials durchgeführt und keine zusätzlichen Anlagenkomponenten wurden hinzu-

gefügt. Variiert wurden nur bestehende Anlagenparameter sowie die Geometrie von Schmelze führenden Düsentteilen des Ummantelungswerkzeuges.

Screening

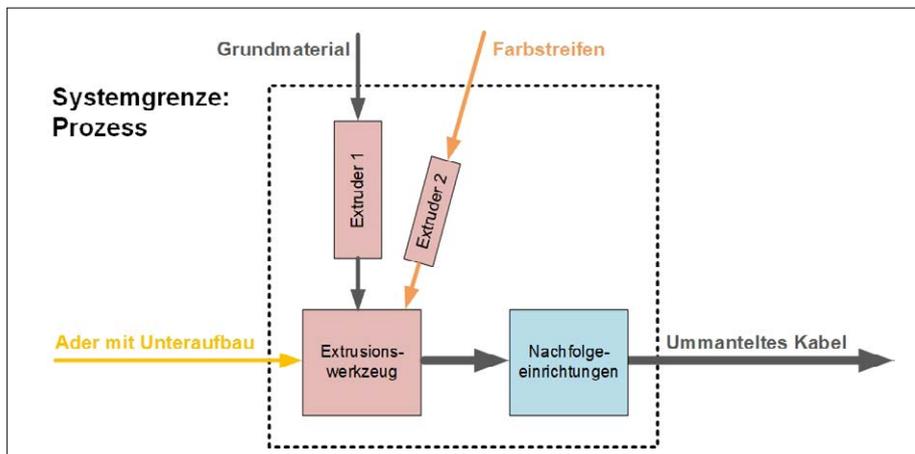
Das Resultat der Ursachenanalyse wurde auf 10 zu variierende Faktoren eingegrenzt, deren Einfluss auf insgesamt 8 Zielgrößen hin untersucht werden soll. Daraus wurde ein erster Versuchsplan erarbeitet, welcher auf der statistischen Versuchsplanung basiert. Damit soll ein Screening durchgeführt werden, um die Signifikanz der Faktoren auf die jeweiligen Zielgrößen aufzuzeigen. Angenommen wurden lineare Einflüsse mit zwei Faktorstufen (-1, 1) sowie teilweise nichtlineare Einflüsse mit drei Levels (-1, 0, 1). Ausgearbeitet wurde für das Screening ein 2⁹⁻⁴ Versuchsplan mit 32 Experimenten, mit zusätzlich 8 Experimenten, um die Nichtlinearitäten einzelner Faktoren sowie einen speziellen Faktor, welcher nur in Kombination mit einer Stufe eines anderen Faktors vorkommt, abzubilden. Mit diesem Versuchsplan konnte eine Auflösung IV erreicht werden, womit kein Faktor mit einer Zweifach-Wechselwirkung vermengt ist. Dies bedeutet, dass diese Effekte auseinandergehalten werden können. Einzelne Faktoren können mit Dreifach-Wechselwirkungen vermengt sein, ebenfalls können Effekte zwischen Zweifach-Wechselwirkungen und weiteren Zweifach-Wechselwirkungen nicht auseinandergehalten werden. Die Anzahl der Wechselwirkungen mit 9 Faktoren berechnet sich als die Summe der Auswahlmög-



Korrelation von Zielgrößen

lichkeiten von 2 bis 9 Faktoren. Neben der Auswahl von 9 einzelnen Faktoren gibt es 502 Zwei- oder Mehrfach-Wechselwirkungen. Ein vollständiger Versuchsplan mit 10 Faktoren und 2 Faktorstufen würde einen 2¹⁰ Versuchsplan mit 1024 Experimenten bedeuten. Der vollständige Versuchsplan konnte für das Screening auf 40 gezielte

Experimente reduziert werden, ohne vorerst grundlegende Einflüsse zu vernachlässigen. Die 40 Experimente konnten innerhalb von vier Tagen auf der Produktionsanlage durchgeführt und im Anschluss die Muster hinsichtlich der definierten Zielgrößen hin geprüft werden. Zusätzlich wurden während der einzelnen Experimente parallel zu den aufgezeichneten Anlageparametern zusätzlich 20 Messwerte dokumentiert und ausgewertet. Zunächst wurden die wesentlichen Parameter der Zielgrößen wie Mittelwert, Median, Quartile, Maximum und Minimum sowie Varianz bestimmt. Anschliessend wurden die Verteilungsfunktionen charakterisiert und als Boxplots dargestellt. Die Verteilungen der Zielgrößen wurden im Folgenden charakterisiert durch ihre Häufigkeitsverteilung, ihre empirische, kumulative Verteilungsfunktion und durch den Shapiro-Wilk-Test bei Log-Normalverteilung. Weiter wurden die Standardabweichungen für alle Zielgrößen mittels Pooling berechnet sowie die Korrelation



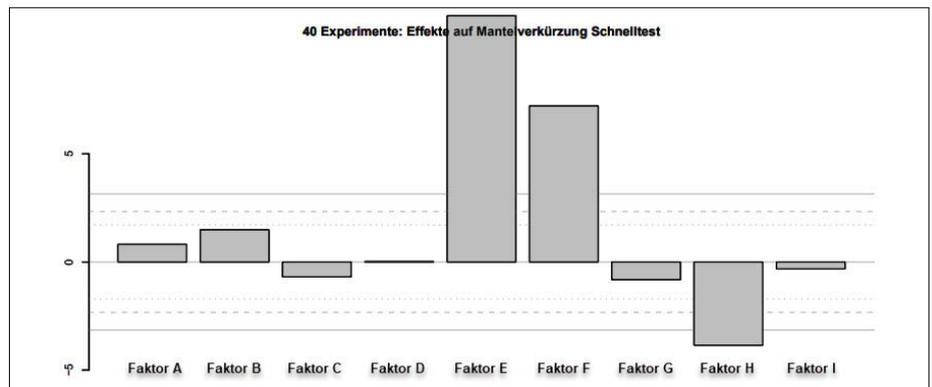
Abgrenzung des Systems

zwischen den Zielgrößen, welche dasselbe Phänomen messen, betrachtet. Zu den Wirkungen der Faktoren (Faktoreffekte) auf die Zielgrößen werden jeweils die 95%-, 99%- und 99.9%-Konfidenzintervalle dargestellt. Mit Hilfe der t-Quantile und der Standardabweichung der Zielvariablen können die Konfidenzintervalle für diese Faktoreffekte auf die Zielgrößen berechnet werden. Daraus werden alle Faktoren ersichtlich, welche einen signifikanten Effekt auf die jeweilige Zielgröße haben, positiv wie auch negativ. Die Effekte der Zweifach-Wechselwirkungen wurden analog der Faktoreffekte berechnet und ausgewertet. Bei den Faktoren, bei welchen 3 Ausprägungen untersucht wurden, wurde die Relevanz der Nichtlinearitäten betrachtet.

Optimierung

Zur Optimierung der Zielgrößen basierend auf dem Screening kommen mehrere Methoden in Frage:

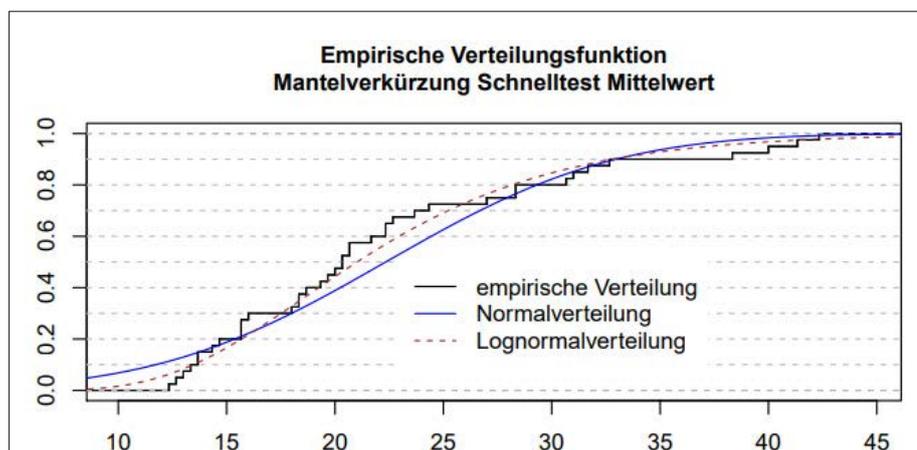
1. Experiment mit den besten Zielwerten auswählen. Dafür muss nichts Weiteres gemacht werden, als zu jeder Zielgröße das passende Experiment aus dem Screening auszuwählen, welches die besten Ergebnisse liefert.
2. Für jeden Faktor die bessere Ausprägung heraussuchen. Die bessere Ausprägung eines Faktors ist diejenige, die eine Zielvariable in die richtige Richtung beeinflusst.
3. Die beste Stufenkombination zwischen den vorliegenden Werten linear interpolieren. Diese Optimierung anhand von Regression kann linear oder nichtlinear durchgeführt werden. Neben den Fak-



Konfidenzintervalle und Faktoreffekte auf bestimmte Zielgrößen

toren können auch Wechselwirkungen mitberücksichtigt werden. Betrachtet wurden alle drei Möglichkeiten. Diejenigen Experimente, die bei den 40 ersten Experimenten im Screening die besten Zielwerte erreicht haben, wurden wiederholt. Anhand dessen konnte die Reproduktion der Ergebnisse geprüft werden, vereinzelt wurden nicht signifikante Faktoren geändert, um dies weiter zu belegen. Hinsichtlich dreier Zielgrößen wurde die bessere Ausprägung jedes Faktors herausgesucht und zu neuen Experimenten kombiniert. Aufgrund der Regressionsanalyse wurden die Faktorausprägungen so gewählt, dass die drei Zielvariablen optimiert wurden. Diese Experimente wurden anhand eines 3⁴-Versuchsplans genauer analysiert. Dabei wurde nur ein Teil der ursprünglich 10 Variablen neu variiert, der andere Teil wurde konstant gesetzt, da dieser gemäss Screening keinen signifikanten Einfluss hatte. Hinsichtlich der Hauptzielgröße «Nach-

schrumpfen des Kabelmantels» konnte mit der Optimierung keine zusätzliche Verbesserung erreicht werden. Die besten Ergebnisse wurden bereits mit einem Experiment im Screening erzielt. Diese konnten durch die Optimierung jedoch klar reproduziert sowie nicht signifikante Faktoren bestätigt werden. Auf Basis der statistischen Versuchsplanung wurden im gesamten Projekt über 100 Versuchskabel hergestellt und ausgewertet. Basierend auf den erarbeiteten Grundlagen, den aufgestellten Thesen sowie den Simulationsresultaten, wurden neuartige Werkzeugkonzepte erarbeitet und umgesetzt. Durch die statistische Versuchsplanung und Auswertung konnte die Hauptzielgröße «Nachschrumpf» um bis zu 30%, bei einer Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit von 50%, verbessert werden. Durch die genaue Betrachtung einzelner Faktoren, konnten weitere Phänomene aufgezeigt werden. Ebenfalls konnten weitere Faktoren ermittelt werden, welche einen starken Einfluss auf gewisse Zielgrößen aufweisen. Die Analyse und Optimierung von Extrusionsprozessen mithilfe von DoE am Beispiel der Ummantelung von FO-Kabeln hinsichtlich des post-shrinkage konnte erfolgreich umgesetzt werden.



Verteilung der Messwerte

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
 Oberseestrasse 10
 CH-8640 Rapperswil
 +41 55 222 47 70
 iwkw@hsr.ch
 www.iwk.hsr.ch