

Entwicklung und Evaluierung eines serientauglichen LDA-Sensors für die hochdynamische und hochgenaue Messung der Garngeschwindigkeit in der Spulerei

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Martin Linden
aus Zell/Mosel

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Clemens Merten

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2010

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
Wissenschaftliche Institute in Verbindung
mit der Universität Stuttgart
Denkendorf
2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Firma ViEnCo GmbH in Mönchengladbach.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor. Dr.-Ing. Heinrich Planck, Direktor des Instituts für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Clemens Merten des Institutes für Chemische Verfahrenstechnik, für die Übernahme des Korreferates und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Ich bedanke mich bei Herrn Dipl.-Ing. Heitmann, Leiter der Stapelfasertechnologie am ITV Denkendorf, und bei Frau Dr. Ausheyks für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und die wertvollen Diskussionen und Ratschläge.

Bei allen Mitarbeitern des Forschungsbereichs Stapelfasertechnologie bedanke ich mich für das sehr gute Arbeitsklima und für die Unterstützung, die ich bei der Durchführung der Verfahrensabsicherung und der technologischen Messreihen erhalten habe.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Kollegen der ViEnCo GmbH und insbesondere Herrn Prof.-Dr. F. Hermanns von der Hochschule Niederrhein für die Unterstützung, die wertvollen Anregungen und die vielen konstruktiven Diskussionen.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	2
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
KURZFASSUNG	8
ABSTRACT	9
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	10
2 STAND DER TECHNIK UND WAHL DES GEEIGNETEN MESSPRINZIPS	14
2.1 GARNQUALITÄTSÜBERWACHUNG IN DER SPULEREI	14
2.2 FUNKTIONSWEISE EINER SPULMASCHINE	18
2.3 LÄNGEN- UND GESCHWINDIGKEITSMESSUNG AN GARNEN	20
2.3.1 Allgemein.....	20
2.3.2 Conometer-Methode und Modifikationen	22
2.3.3 Reibradmethode	24
2.3.4 Fadenzugkraftsignal.....	25
2.3.5 Garnladung	25
2.3.6 Optisches Ortsfilterprinzip.....	27
2.3.7 Korrelationsmethode	29
2.3.8 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	31
2.3.9 Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren beim Einsatz in der Spulerei.....	36
2.4 REINIGERSYSTEME	39
2.4.1 Garnungleichmäßigkeiten.....	40
2.4.2 Funktionsweise von Garnreinigern.....	41
2.4.3 Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Garnfehlerlänge.....	45
3 ZIEL DER ARBEIT UND LÖSUNGSWEG	48
4 ANFORDERUNGEN AN EINEN LDA-SENSOR FÜR DIE SPULEREI	50

5	KONZEPTION UND ENTWICKLUNG DES NEUARTIGEN UND KOSTENGÜNSTIGEN LDA-SENSORS.....	58
5.1	LDA-GRUNDLAGEN.....	58
5.2	LDA-SENSOR-KONZEPT	66
5.3	LDA-SENSOR-ENTWICKLUNG.....	70
5.3.1	<i>Optik</i>	70
5.3.2	<i>Elektronik</i>	79
6	VERFAHRENSABSICHERUNG.....	82
6.1	AUFGABENSTELLUNG.....	82
6.2	DURCHFÜHRUNG	83
6.3	ERGEBNISSE	93
6.3.1	<i>Bildstörung</i>	93
6.3.2	<i>Spulgeschwindigkeit</i>	96
6.3.3	<i>Garnnummer und Garn aus unterschiedlichen Rohstoffen</i>	100
6.3.4	<i>Fadenzugkraft</i>	104
6.3.5	<i>Diskussion und Schlussfolgerungen</i>	112
7	TEXTILTECHNOLOGISCHE EVALUIERUNG.....	114
7.1	AUFGESPULTE GARNLÄNGE	114
7.1.1	<i>Aufgabenstellung</i>	114
7.1.2	<i>Versuchsablauf</i>	116
7.1.3	<i>Ergebnisse</i>	119
7.2	ERFASSUNG DER GARNFEHLERLÄNGE MIT DEM LDA-SENSOR.....	123
7.2.1	<i>Aufgabenstellung</i>	123
7.2.2	<i>Versuchsablauf</i>	125
7.2.3	<i>Ergebnisse</i>	126
7.2.4	<i>Fazit</i>	136
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	137
9	LITERATURVERZEICHNIS	140
10	ANHANG	150

Abkürzungsverzeichnis

α_{in}	Einfallswinkel senkrecht zur Oberfläche
β	Keilprismawinkel: $\beta = 1,0^\circ$
γ	Divergenzwinkel des Laserstrahls
$\Delta Soll$	Absolute Abweichung zur Garn-Soll-Länge
θ	Winkel zwischen Referenz- und Messstrahl
θ_k	Strahldivergenz in den Ebenen k , $k = [1, 2, 3]$
λ	optische Wellenlänge
λ_{VCSEL}	Wellenlänge des verwendeten Lasers: $\lambda_{VCSEL} = 850 \text{ nm}$
σ	Standardabweichung
$2\sigma SS$	Spulstellen- und partiebezogene Streuung
$2\sigma Gr$	Gruppen- und partiebezogene Streuung
τ	Zeitverschiebung bei der Korrelationsmethode
ω_i	Kreisfrequenz
A	Amplitude
A_i	Amplitude der elektromagnetischen Welle E_i
$ADC1$	Analog-Digital-Converter 1
$ADC2$	Analog-Digital-Converter 2
BL	Berührungslos
D	Garnfehler-Durchmesser
E_i	Feldstärke der elektromagnetischen Welle i wobei $i = [1, 2]$
\vec{e}_L	Einheitsvektor Laser – Streupartikel
\vec{e}_{PD}	Einheitsvektor Streupartikel – Photodetektor
f_i	Frequenz

f_D	Dopplerfrequenz aus Sicht des Detektors, Schwebungsfrequenz, Messfrequenz
FFT	Fast Fourier Transform
f_L	Frequenz der Laserstrahlung
f_P	Dopplerfrequenz aus Sicht des Streupartikels
$FPGA$	Field Programmable Gate Array
g	Gangzahl einer Nutentrommel
$H(v)$	Häufigkeit in einem Geschwindigkeitsintervall
HDL	Hochdynamisches Längensignal
I	Lichtintensität
i	Indexvariable $i = [1, 2]$
L	Garnlänge
LDA	Laser Doppler Anemometrie
L_{Ist}	Gemessene Ist-Garnlänge
L_K	Empfänger-Abstand bei der Korrelationsmethode
L_{MV}	Länge des Messvolumens in Strahlebene senkrecht zum Garnlauf
L_{Soll}	Soll-Garnlänge
$L_{SollEco}$	Korrigierte Solllänge für Ecopack-System
$L_{SollLDA}$	Korrigierte Solllänge für LDA-Sensor
L_{Zettel}	Zettellänge
LKF	Längenkorrekturfaktor
LKF_{Eco}	Längenkorrekturfaktor für Ecopack-System
LKF_{LDA}	Längenkorrekturfaktor für LDA-Sensor
\vec{n}	Normalenvektor
n_{BK7}	Brechungsindex von BK7-Glas bei $\lambda = 850$ nm: $n_{BK7} = 1,51$

n_L	Brechungsindex von Luft unter Normalbedingungen: $n_L = 1,00$
OA	Ortsabhängigkeit der Dopplerfrequenz im Messvolumen
R_P	Reflexionskoeffizient für parallel polarisiertes Licht
R_S	Reflexionskoeffizient für senkrecht polarisiertes Licht
$S\&H1$	Sample and Hold- Einheit des ADC1
$S\&H2$	Sample and Hold- Einheit des ADC2
SNR	Signal-to-noise ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
t	Zeit
T_P	Transmissionskoeffizient für parallel polarisiertes Licht
T_S	Transmissionskoeffizient für senkrecht polarisiertes Licht
TDG	Trommeldrehgebersignal
U	Umfang-Fördermenge einer Nutentrommel
$ug2s$	Bezeichnung für eine 2-gängige symmetrische Nutentrommel
$ug2$	Bezeichnung für eine 2-gängige asymmetrische Nutentrommel
v	Garngeschwindigkeit
$VCSEL$	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
v_K	Durch Korrelationsmethode ermittelte Geschwindigkeit
v_p	Geschwindigkeit des Streupartikels
v_s	Spulgeschwindigkeit
w	Strahldurchmesser

Kurzfassung

Die Spulmaschinenhersteller sind bestrebt, die erzeugte Garn- und Spulenqualität, sowie die Maschinenproduktivität immer weiter zu steigern. Dies gelingt jedoch nur durch genaue Überwachung des Spulprozesses. Bis heute ist es jedoch nicht gelungen, eine der wichtigsten Prozessgrößen in der Spulerei mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand serienmäßig in jeder einzelnen Spulstelle zu erfassen: die momentane Garngeschwindigkeit. Diese ist aufgrund der Garnverlegung auf der Spulenoberfläche mittels Nutentrommel hohen Beschleunigungen ausgesetzt. Diese hochdynamische Garngeschwindigkeit enthält einen sehr hohen Informationsgehalt über die Qualität des Spulprozess. Die Erfassung und Auswertung der momentanen Garngeschwindigkeit ermöglicht eine Erhöhung der Spulen- und Garnqualität, sowie der Spulmaschinenproduktivität. Zu diesem Zweck wurde ein Sensor auf Basis der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) entwickelt, der erstmals die Vorteile der LDA-Technologie (berührungslos, hochgenau und hochdynamisch) mit einer kostengünstigen Sensorbauweise vereint. Dies gelingt durch den Einsatz modernster elektronischer Komponenten (FPGA-Technologie) und der Verwendung von aktuellen VCSEL-Halbleiterlasern, sowie einer für die LDA-Technik neuartigen Strahlaufteilung und Strahlführung. Durch diese Kombination wird, für die Messung am laufenden Garn, die hohe Funktionalität von Labor-LDA's erreicht, jedoch mit einem wesentlich geringeren Aufwand. Somit ist eine wirtschaftliche Anwendung der LDA-Technologie im Spulbetrieb erstmals möglich. Das Verfahren wurde anhand zweier ausgewählter Anwendungen technologisch erprobt. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz des LDA-Sensors die Garnqualität, die Spulenqualität und die Spulmaschinenproduktivität signifikant erhöht.

Abstract

The aim of the manufacturers of winding machines is to continuously increase yarn and bobbin quality as well as the machine productivity. This, however, is only possible by strict control of the winding process. Until today, it has not been possible to determine one of the most important process parameters in the winding room under the conditions of economically justifiable expenditure for each individual winding position: the present yarn speed. This speed is exposed to considerable accelerations due to yarn shift on the bobbin surface by means of a grooved drum. This highly dynamical yarn speed contains vital information on the quality of the winding process. The acquisition and evaluation of the present yarn speed enables the increase of the bobbin and yarn quality as well as the increase of the productivity of the winding machine. For this purpose, a sensor based on the principle of Laser Doppler Anemometry (LDA) was developed, which for the first time combines the advantages of LDA-technology (contactless, highly precise, highly dynamical) with a low-cost sensor design. This can be achieved by the use of most modern electronic components (FPGA-technology) and by the use of current VCSEL-semiconductor lasers as well by innovative beam splitting and guidance. This combination enables the provision of a high degree of functionality of lab LDAs during the measurement of the running yarn – however at considerably reduced expenditure. In this way, for the first time the economic application of LDA-technology in winding process has become possible. The process was tested technologically based on two separately selected applications. It could be shown that the use of the LDA-sensor significantly increases yarn and bobbin quality as well as the productivity of winding machines.

1 Einleitung und Problemstellung

Die Spulerei ist technologisch zwischen der Ringspinnerei und den Weiterverarbeitungsprozessen, wie beispielsweise der Weberei, Strickerei oder Wirkerei angesiedelt. Sie dient dem technologisch notwendigen Umspulprozess, bei dem aus Kopsen mit relativ wenig Garnmenge großvolumige Kreuzspulen mit guten Abzugseigenschaften hergestellt werden. Für den unterbrechungsfreien und produktiven Betrieb der Hochleistungsmaschinen in den Weiterverarbeitungsprozessen ist eine kontinuierlich steigende Garn- und Spulenqualität erforderlich. Die dazu nötige Qualitätssicherung findet prozessbedingt in der Spulerei statt. Zudem wird im hart umkämpften Textilmarkt auch von den Spulmaschinenherstellern höchste Maschinenproduktivität verlangt. Eine Steigerung der Spulgeschwindigkeiten würde die Produktivität erhöhen. Dies ginge jedoch auf Kosten der Spulen- und Garnqualität.

Eine gleichzeitige Steigerung von Produktivität und Qualität stellt eine Herausforderung dar, da die stark automatisierten Spulmaschinen technologisch sehr ausgefeilt sind. Die Maschinen der drei größten Hersteller unterscheiden sich nur noch in Details. Eine genaue Analyse des Spulprozesses lässt ein aussichtsreiches Optimierungspotential im Bereich der Prozessüberwachung erkennen. Während des Spulprozesses werden eine Vielzahl von Prozessparametern gemessen: Darunter fallen beispielsweise die Drehzahl der Antriebsstrommel als Maß für die Spulgeschwindigkeit, die Spulendrehzahl, die Fadenanwesenheit und die Fadenzugkraft. Auffällig ist jedoch, dass eine wesentliche, prozessbestimmende Kenngröße nicht erfasst wird: die momentane Garngeschwindigkeit.

Die momentane Garngeschwindigkeit enthält im Spulprozess einen sehr hohen Informationsgehalt, da der Geschwindigkeitsverlauf exakt die Garnverlegung auf der Spulenoberfläche wiedergibt. Aufgrund der vorherrschenden Garnverlegung der Spulmaschine ist der momentane Garngeschwindigkeitsverlauf starken Schwankungen unterworfen. Eine Messung der momentanen Garngeschwindigkeit ist aus Sicht der Spulenqualität, der Garnqualität und der Produktivität sinnvoll, wie die beiden nachfolgenden Beispiele zeigen:

1. Durch zeitliche Integration des momentanen Geschwindigkeitsverlaufs kann die aufgespulte Garmlänge bestimmt werden. Die aufgespulte Garmlänge wird zurzeit in den meisten Fällen durch Zählung der Antriebsstrommelumdrehungen (Conometer-Methode) gemessen /1/. Aufgrund von Schlupfmechanismen zwi-

schen Trommel und Spule ist dieses Verfahren relativ ungenau. Für die Webevorbereitung ist die Längengenauigkeit jedoch ein wichtiges Qualitätsmerkmal: Beim Gatterabzug werden sehr viele Kreuzspulen parallel abgezogen. Um eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit zu erhalten, ist es von Vorteil, dass alle Kreuzspulen die gleiche Garnlänge aufweisen. Hierdurch wird der Aufwand in der Restespulerei und der Nachsteckbedarf von leergelaufenen Spulen im Gatter verringert. Außerdem wird so verhindert, dass Spulen ungleichen Durchmessers zum Einsatz kommen, was direkten Einfluss auf die Fadenspannung im Gatter und somit auf die Gleichmäßigkeit im Gewebe hat. Aus diesem Grund wurde ein berührungslos arbeitendes Längenmess-Verfahren entwickelt, welches die Genauigkeit der Garnlängenerfassung deutlich verbessert und nach dem Korrelationsprinzip arbeitet. Eine Messung der momentanen Garngeschwindigkeit ist mit einem solchen System jedoch nicht möglich.

2. Ein Kriterium, welches sowohl die Garnqualität und die Produktivität positiv beeinflusst, ist die exakte Erfassung der Garnfehlerlänge. Diese kann nur durch Kenntnis der momentanen Garngeschwindigkeit bestimmt werden. Das Garn wird permanent auf Garnfehler wie beispielsweise Dünn-, Dickstellen oder Fremdstoffe überwacht. Durch gezieltes Ausreinigen von Garnfehlern wird der Wert des Garns gesteigert. Bemerkenswert dabei ist, dass 100 % des produzierten Garns auf Fehler kontrolliert wird. Daher ist die Spulerei die letzte Stufe der Qualitätssicherung der Spinnerei. Die Ausreinigung von Garnfehlern erfolgt durch die so genannte Durchmesserlängenbewertung. Kurze Dickstellen (Nissen) stören in der Weiterverarbeitung und in der Fertigware weniger, als lange Dickstellen. Ob ein Fehler aus dem Garn ausgereinigt werden muss oder nicht, ist demnach auch von der Garnfehlerlänge abhängig. Die Garnfehlerlänge wird jedoch ausnahmslos über die Drehzahl des Spulenantriebs (Conometer-Methode) gemessen [2]. Aufgrund der hohen Dynamik der Garngeschwindigkeit ist die Garnfehlerlängenbestimmung über die Spulgeschwindigkeit jedoch fehlerhaft. Um dennoch alle störenden Garnfehler auszureinigen, müssen die Reinigerkriterien unnötig scharf eingestellt werden, wodurch die Ausreinigungsquote hoch ist und die Produktivität verringert wird. Jeder ausgereinigte Garnfehler wird durch einen so genannten Spleißer ersetzt, der streng genommen als eine Qualitätseinbuße gewertet werden muss. Gelingt es nun durch eine geeignete Sensorik die momentane Garngeschwindigkeit zu messen, so kann die Genauigkeit der Garnfehlerlängenbewertung wesentlich gesteigert werden. Dies wiederum führt dazu, dass besser zwischen auszureinigenden und nicht stören-

1 Einleitung und Problemstellung

den Garnfehlern unterschieden werden kann. Somit kann eine optimale Einstellung der Reinigerkurve vorgenommen werden und dementsprechend weniger Ausreinigungen sind erforderlich. Die Produktivität der Maschine steigt. Weniger Ausreinigungen bedeuten auch weniger Spleißer, wodurch eine Verbesserung der Garnqualität erreicht wird.

Der Grund, warum die momentane Garngeschwindigkeit im Spulprozess noch nicht erfasst wird, liegt in der Tatsache begründet, dass bis heute keine geeignete Messtechnik zur Verfügung steht, die wirtschaftlich in jeder einzelnen Spulstelle eingesetzt werden kann.

Die Messung der momentanen Garngeschwindigkeit in einer Spulmaschine ist aus mehreren Gründen technisch anspruchsvoll:

1. Die Messmethode sollte berührungslos arbeiten, um Schlupf und Beschädigungen am Garn zu vermeiden.
2. Auf das Garn wirken sehr große Beschleunigungen, die durch die Garnverlegung mittels Nutentrommel verursacht werden. Die Messtechnik muss in der Lage sein, diese Beschleunigungen zu erfassen.
3. Der zu messende Geschwindigkeitsbereich ist sehr groß. Beachtet man die durch den Spulprozess verursachten hohen Garnbeschleunigungen, so liegt der tatsächliche Garngeschwindigkeitsbereich je nach Spulgeschwindigkeit zwischen 100 m/min und mehr als 2.500 m/min.
4. Die Messgenauigkeit muss so hoch sein, dass Verbesserungen in der Produktivität und Qualität zu erreichen sind.
5. Die Messtechnik muss im Praxiseinsatz sicher und zuverlässig funktionieren.
6. Die Kosten für einen serienmäßigen Einsatz einer geeigneten Messtechnik müssen sich innerhalb kurzer Zeit amortisieren.

Es steht eine Technologie zu Verfügung mit der die hochdynamische Garngeschwindigkeit berührungslos und hochgenau gemessen werden kann. Hierbei handelt es sich um die so genannte Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). Der Aufbau und die Funktionsweise bestehender Systeme sind jedoch relativ komplex und der Anschaffungspreis dementsprechend hoch, so dass sich diese Geräte trotz des hohen Informationsgewinns über den Spulprozess und der damit verbundenen Vorteile nicht wirtschaftlich in einer Spulmaschine im Serieneinsatz verwenden lassen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines für die besonderen Anforderungen des Spulprozess zugeschnittenen LDA-Sensors. Dabei werden erstmals die Vorteile der LDA-Technologie (berührungslos, hochgenau und hochdynamisch) mit einer kostengünstigen Sensorbauweise vereint. Dies gelingt durch den Einsatz modernster elektronischer Komponenten und der Verwendung von aktuellen VCSEL-Halbleiterlasern, sowie einer für die LDA-Technik neuartigen Strahlaufteilung und -führung. Durch diese Kombination wird für die Messung am laufenden Garn die hohe Funktionalität von Labor-LDA's erreicht, jedoch mit einem wesentlich geringeren Aufwand. Somit ist erstmals eine wirtschaftliche Anwendung der LDA-Technologie im Spulbetrieb möglich, die neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Produktivität und der Spulen- und Garnqualität aufzeigt.

2 Stand der Technik und Wahl des geeigneten Messprinzips

2.1 Garnqualitätsüberwachung in der Spulerei

Der Spulprozess ist technologisch überwiegend zwischen dem Ringspinnprozess und der Weiterverarbeitung (z.B. Weberei, Webereivorbereitung, Wirkerei, Strickelei, Zwirnerei) angesiedelt. Die Garnträger aus der Ringspinnerei – so genannte Kopse – weisen nur eine sehr geringe Garnkapazität von ca. 40 – 80 g auf, die ein übermäßiges Ansteigen der Nebenzeiten in der Weiterverarbeitung verursacht. Eine Hauptaufgabe des Spulprozesses ist das Umspulen mehrerer Kopse zu großen Spulen mit hoher Garnkapazität -meist so genannte Kreuzspulen- bei gleichzeitiger Verbesserung des Ablaufverhaltens (siehe Abb. 1). Eine weitere wichtige Hauptaufgabe ist die Ausreinigung von unerwünschten Garnfehlern und Fremdkörpern /3/.

Die Herstellung der Kreuzspulen erfolgt meist nach dem Prinzip der „wilden Wicklung“. Hierbei wird die konische oder zylindrische Spule von einer Nutentrommel reibschlüssig angetrieben und das Garn durch die spezielle Nutengeometrie hin und her verlegt. Die Nutentrommel dient somit gleichzeitig als Spulenantrieb und Garnführer. Bei der Garnverlegung überquert jede folgende Schicht die gelegten Fäden und es entsteht eine Verkreuzung der Fäden, die der Kreuzspule ihren Namen verleiht. Durch das Verlegemuster hat die Kreuzspule feste und stabile Kanten, deshalb kommt der Spulenträger ohne seitliche Scheiben aus. Die verlegten Fäden kreuzen sich unabhängig vom Spulendurchmesser immer mit dem gleichen Winkel /4/. Dies hat den Vorteil, dass die Spule „über Kopf“ mit hoher Geschwindigkeit und geringer Fadenzugkraft abgezogen werden kann. Die Garnkapazität einer Kreuzspule beträgt typischerweise bis zu 4 kg.

Eine wesentliche Eigenschaft von automatisierten Spulmaschinen, so genannten „Spulautomaten“ ist die vollautomatische Verbindung zweier Garnenden. Als Garnverbindung kommen meist Spleißer zum Einsatz. Spleißer sind reibschlüssige Verbindungen der einzelnen Garnfasern ohne nennenswerte Durchmesserzunahme des Garns. Allerdings ist die Festigkeit eines Spleißers in der Regel etwas geringer als die des eigentlichen Garns und gilt deswegen als potentielle Schwachstelle. Eine weitere Möglichkeit zur Garnverbindung stellen Knoter dar, auf die aber aufgrund der geringeren Verbreitung nicht weiter eingegangen wird. Erst durch die vollautomatische Garnverbindung wird ein automatisierter Kopswechsel möglich.

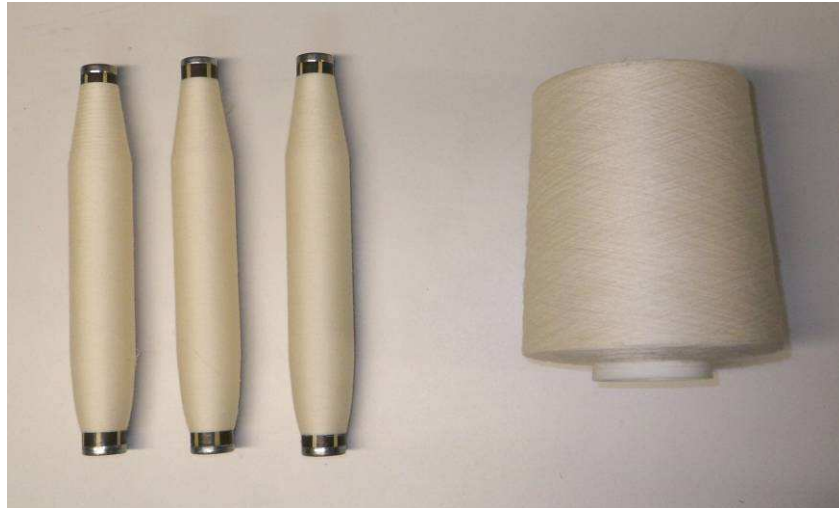


Abb. 1: Mehrere Kops werden zu einer Kreuzspule umgewickelt

Der Ablauf gestaltet sich folgendermaßen: Der Spulvorgang wird durch einen leer-gelaufenen Kops unterbrochen. Dieser wird durch eine entsprechende Sensorik erkannt und durch einen neuen, vollen Kops ersetzt. Ein Greiferrohr übergibt das Garnende des Kopses an die Spleißvorrichtung. Eine Saugdüse greift sich das Garnende der Spule und legt dieses ebenfalls in die Spleißvorrichtung ein. Dort wird die Garnverbindung automatisch hergestellt und der Spulvorgang kann fortgesetzt werden. Erst die automatische Garnverbindung steigerte die Bedeutung der Spulerei. Unter anderem ist eine automatische Ausreinigung von Garnfehlern und Fremdkörpern möglich geworden. Deshalb wird die Spulerei heute als ein sehr wichtiges Qualitäts-Management-Instrument in der textilen Fertigungskette angesehen /5/. Der typische Aufbau einer Spulmaschine wird in Kapitel 2.2 näher erläutert.

Spulenqualität

Die Spulenqualität bestimmt die Produktivität und auch die Qualität in der Weiterverarbeitung. Folgende Faktoren sind dabei von Bedeutung:

- Spulengeometrie
- Ablaufverhalten
- Verlegequalität (z.B. Fehlführungen, Abschläger)
- Spulendichte und -härte
- Garnlänge
- Gleichmäßigkeit des Parafinauftrages

Je nach Art der Weiterverarbeitung sind die Faktoren von unterschiedlicher Wichtigkeit. Thomas gibt einige Beispiele über den Einfluss der Faktoren bei unterschiedlichen Weiterverarbeitungsstufen und hebt dabei die Bedeutung der Spulerei als Schlüsselfunktion im textilen Fertigungsprozess hervor /6/.

Um den Ausschuss in der Webereivorbereitung beim Gatterabzug (gleichzeitiger Abzug vieler Kreuzspulen) gering zu halten und leergelaufene Hülsen zu vermeiden, ist für die Webereivorbereitung eine einheitliche Garnlänge sehr wichtig /7/. Wie hoch das Einsparpotential bei Verbesserung der Längenmessung sein kann, zeigt die Beispielrechnung in Kapitel 4. Die Bestimmung der aufgespulten Garnlänge, sowie die Längen- und Geschwindigkeitsmessung von Garnen im Allgemeinen sind in Kapitel 2.3 beschrieben.

Garnqualität

Treten in der Weiterverarbeitung Qualitätsprobleme auf, die ihre Ursache in der Ringspinnerei haben, so ist deren Behebung in der Regel entweder überhaupt nicht mehr möglich oder aber meist sehr teuer. Zur Verdeutlichung dienen folgende Beispiele:

- Ungleichmäßiges Gestrick oder Gewebe verursacht durch lange Dickstellen.
- Erhöhte Stillstandszeiten in der Weberei aufgrund von Schussgarnbrüchen, verursacht durch Schwachstellen im Garn.
- Ungleichmäßiges Erscheinungsbild nach dem Färben aufgrund von nicht färbaren Fremdfasern.
- Moire-Effekt im Gewebe wegen periodischen Garnfehlern.

Grundsätzlich gilt: Je später ein Garnfehler in der Produktionskette gefunden wird, desto teurer werden die Folgekosten. Schlichter schreibt, dass die Kosten für Garnbrüche in den Weiterverarbeitungsstufen größer sein können, als der Produktivitätsverlust in der Spulerei, der durch die Ausreinigung des Garnfehlers entsteht /8/. Als Ursache für Garnbrüche werden u. a. Masseungleichmäßigkeit und vermehrte Dick- und Dünnstellen genannt. Um die Produktivität und die Qualität in der Weiterverarbeitung sicherzustellen zu können, ist eine Qualitätskontrolle vor der Weiterverarbeitung zwingend erforderlich. Aufgrund der Besonderheit des Ringspinnprozesses und der Vielzahl von Spinnstellen ist eine ausreichende Kontrolle der Garnqualität während des Spinnprozesses wegen des Kosten- und Automatisierungsaufwands nur sehr schwer zu erreichen.

Entwicklungen gehen hin zur Erhöhung der Produktivität in der Spulerei /9/. Es ist jedoch zu beachten, dass die Erhöhung der Spulgeschwindigkeit nicht zwangsläufig auch eine Produktivitätssteigerung bedeutet /10/. Da die Kosten der Spulerei in der textilen Fertigungskette mit wenigen Prozentpunkten vergleichsweise gering sind, ist die Erhöhung der Produktivität in der Spulerei weniger wichtig zu bewerten, als die Erhöhung der Spulen- und der Garnqualität, da diese eine Produktivitätssteigerung in den Weiterverarbeitungsprozessen bewirken.

Die Bedeutung der Spulmaschinen als ideale Stelle für eine Qualitätskontrolle der Ringspinnerei ist seit langer Zeit bekannt.

Kappeler beschreibt den auf der ITMA 87 angestoßenen Trend zur Optimierung der technologischen Eigenschaften zur Verbesserung der Reinigung, der Erhöhung der Sauberkeit des Garns und zur Steigerung der Spulenqualität /11/.

In der Spulerei können mit geeigneten Sensorsystemen - so genannte Garnreiniger - Garnfehler direkt erkannt und mit dem wirtschaftlich geringsten Aufwand behoben werden. Douglas beschreibt, dass aufgrund der 100 %-Prüfung der Garnqualität nicht nur Garnfehler erkannt werden, sondern auch typische Laborwerte wie Nummernabweichung und Gleichmäßigkeit über die gesamte Produktion generiert werden können /12/.

Die Garnreiniger prüfen permanent den Garndurchmesser. Es erfolgt eine automatische Bewertung von Garnfehlern bezüglich ihres Durchmessers und ihrer Länge. Bei Überschreiten einer bestimmten Schwelle werden diese aus dem Garn entfernt und durch eine Spleißverbindung oder in selteneren Fällen durch einen Knoten ersetzt. Mit Hilfe von Garnreinigern gilt die Spulerei mittlerweile als 100 %-Qualitätsüberwachung des Ringspinnprozesses /13/. Die Thematik Garnreiniger und insbesondere die Längenbewertung des Garnfehlers werden in Kapitel 2.4 detailliert behandelt.

Gebald beschreibt, dass rund ein Drittel aller Abstellungen in der Weberei auf fehlerhafte Spulen zurückzuführen sind und ein Drittel aller Abstellungen durch Garnfehler verursacht werden /14/. Das restliche Drittel sind sonstige Gründe. Es wird auch festgestellt, dass viele Abstellungen in der Strickerei auf die Spulerei und Spinnerei zurückzuführen sind und dass Produktivitätssteigerungen in der Weberei und Strickerei aufgrund von verbesserter Spulen- und Garnqualität zu erwarten sind.

Frey erläutert, dass ca. 25 % der Fehler in der Gestrick-Herstellung durch Garnfehler verursacht werden /15/. Die Untersuchung zeigt, dass es sinnvoll ist, Vereinbarungen zwischen Strickern und Garnherstellern bezüglich der Garnqualität zu treffen, um eine Produktivitäts- und Qualitätssteigerung in der Strickerei zu erhalten. Dabei muss eine möglichst gleichmäßige Qualität angestrebt werden. Qualitätsausreißer und –ausnahmen sind zu vermeiden. „Jede einzelne ausgelieferte Garnspule muss den spezifizierten Anforderungen genügen“ /15/. Diese Aussage bestätigt die Wichtigkeit der Überwachung der Garn- und der Spulenqualität in der Spulerei.

2.2 Funktionsweise einer Spulmaschine

Die grundsätzliche Funktionsweise der Spulmaschine ist bei den drei größten Spulmaschinenherstellern Oerlikon Schlafhorst (Deutschland), Savio (Italien) und Murata (Japan) ähnlich. Mehrere Spulstellen werden über eine Zentralsteuerung bedient. Über diese werden Spulstellengruppen und Partien eingerichtet. Die Partie besteht aus Parametern wie Spulgeschwindigkeit, Fadenzugkraft, Garnnummer, aufzuspulende Garmlänge pro Spule usw.. Unterschiedliche Gruppen können mit unterschiedlichen Partien versehen werden, so dass eine Spulmaschine gleichzeitig verschiedene Partien abarbeiten kann. Die Spulstellen arbeiten autark voneinander, d.h. sie verfügen über eine eigene Spulstellensteuerung, die über ein Bussystem mit der Zentralsteuerung kommuniziert. Der Spulstellenrechner erhält so die Partiedaten und übernimmt die Steuerung der Spulstelle.

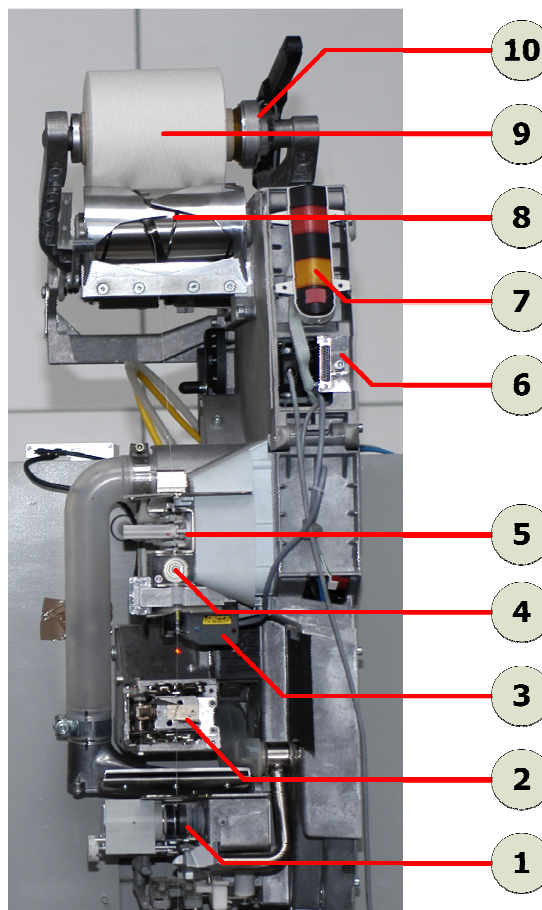
Je nach Anwendung sind die einzelnen Spulstellen in unterschiedlichen Ausführungsformen erhältlich. Man kann drei Hauptausführungsformen unterscheiden:

1. Manuelle Bestückung von Kopsen im Rundmagazin
2. Automatische Kopszuführung über Transportband
3. Umspulen von Kreuzpulen

Abb. 2 stellt eine Schlafhorst Spulmaschine vom Typ Autoconer 338 in einer Umspulvariante dar. Bei dieser Variante werden beispielsweise wenige großvolumige Kreuzspulen zu mehreren kleinen Kreuzspulen mit definierter Garmlänge umgespult, um einen Gatterabzug für die Webereivorbereitung zu ermöglichen.



Abb. 2: Spulmaschine in Umspulvariante



- 1 Fadenbremse / 2 Spleißvorrichtung / 3 Reinigermesskopf/ 4 Fadenzugkraftsensor
5 Paraffineureinrichtung / 6 Spulstellenrechner / 7 Bedieneinheit
8 Nutentrommel / 9 Kreuzspule / 10 Spulenrahmen

Abb. 3: Spulstelle einer Spulmaschine

In Abb. 3 ist eine einzelne Spulstelle vom Typ Autoconer 338 dargestellt. Bevor das Garn auf die Kreuzspule (9) aufgewickelt wird, durchläuft das von Spule oder Kops abgezogene Garn mehrere Aggregate bzw. Sensoren, die im nachfolgenden erläutert werden:

Die Fadenbremse (1) ist bei der Autoconer 338 als Tellerspanner ausgeführt. Mit Hilfe der Fadenbremse (1) lassen sich Fadenzugkräfte bis ca. 80 cN einstellen. Zusammen mit dem Fadenzugkraftsensor (4) ergibt sich eine Fadenzugkraftregelung, die es ermöglicht eine konstante Fadenzugkraft über die gesamte Spulenreise einzuhalten. Die Regelung hat einen positiven Einfluss auf die Qualität der Kreuzspule (9) bezüglich ihrer Dichte, Festigkeit und Härte. Die Spleißvorrichtung (2) ermöglicht, wie im vorhergehenden Unterkapitel schon genauer beschrieben, das automatische Verbinden zweier Garnenden. Dadurch können Garnbrüche, Garnschnitte oder leergelaufene Kopse automatisch ohne Eingriffe des Bedienpersonals behoben werden. Besonders hervorzuheben ist die Eigenschaft des Spleißes als garngleiche Verbindung. Der Spleiß hat im Gegensatz zu einem Knoten keine relevante Durchmesserzunahme und nur geringe Verluste in der Festigkeit. Der Reini-germesskopf (3) misst kontinuierlich den Garndurchmesser und löst im Garnfehlerfall wie im vorhergehenden Unterkapitel beschrieben einen Reinigerschnitt aus. Mit Hilfe des Paraffineurs (5) wird während des Spulvorgangs permanent Paraffin auf das Garn aufgetragen. (In der Abbildung ist lediglich die Paraffineureinrichtung zu sehen. Die Paraffinrolle ist nicht dargestellt.) Der Paraffinauftrag verringert die Garnreibung. Die Nutentrommel (8) stellt gleichzeitig den Spulenantrieb und die Garnverlegeeinrichtung dar. Diese Trommel ist mit einem Direktantrieb versehen. Die drehbar auf dem Spulenrahmen (10) gelagerte Kreuzspule steht in Reibungs-kontakt mit der Trommel und wird an ihrem Umfang in Bewegung versetzt.

2.3 Längen- und Geschwindigkeitsmessung an Garnen

2.3.1 Allgemein

Die Wichtigkeit der Garnlängenmessung zeigt sich in der Webereivorbereitung: Die Längsstreuung von Spule zu Spule sollte möglichst gering sein, um die entstehende Abfallmenge und den Nachsteckbedarf leergelaufener Spulen zu reduzieren. Je genauer die Garnlänge gemessen werden kann, desto höher ist die Produktivität in der Webereivorbereitung. Das wirtschaftliche Optimierungspotential wurde bereits vor mehr als drei Jahrzehnten erkannt und ausführlich untersucht /16/.

Definition der Längengenauigkeit:

In der Literatur werden die erreichbaren Längengenauigkeiten oft angegeben, jedoch ohne den Begriff Längengenauigkeit zu definieren. Dadurch ist der direkte Vergleich der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Systeme häufig nicht möglich. In der Regel bezieht sich die Längengenauigkeit auf die Standardabweichung σ einer Normalverteilung. Es ist üblich die Genauigkeit in den Intervallen $+\sigma$, $\pm\sigma$, oder $\pm 2\sigma$ anzugeben (siehe Abb. 4). Zur Veranschaulichung dient folgendes Beispiel: Auf einem Gatter befinden sich 100 Spulen. Von den 100 Spulen sollen 95 Spulen eine Längenabweichung von unter 1 % aufweisen. Dies entspricht dem Intervall $\pm 2\sigma$, da hier 95,5 % der Fläche innerhalb der Normalverteilung liegen. Demnach muss ein entsprechendes Messsystem eine Längengenauigkeit von $\pm 2\sigma \leq 1\%$ betragen. Ist die Längengenauigkeit mit $\pm\sigma = 1\%$ angegeben, so haben nur noch 68 Spulen eine Längenabweichung kleiner 1 %. Bei der Längengenauigkeit $+\sigma = 1\%$ sind es nur noch 34 Spulen. Dies verdeutlicht, wie wichtig die Definition des Begriffs Längengenauigkeit ist, um verschiedene Messsysteme miteinander vergleichen zu können. In dieser Arbeit wird die Längengenauigkeit, wenn nicht anders angegeben, mit der $\pm\sigma$ -Methode definiert. Um die oben genannte Anforderung von 95 Spulen mit einer Abweichung von $\leq 1\%$ zu erfüllen muss demnach die Längengenauigkeit bei $\pm\sigma \leq 0,5\%$ liegen.

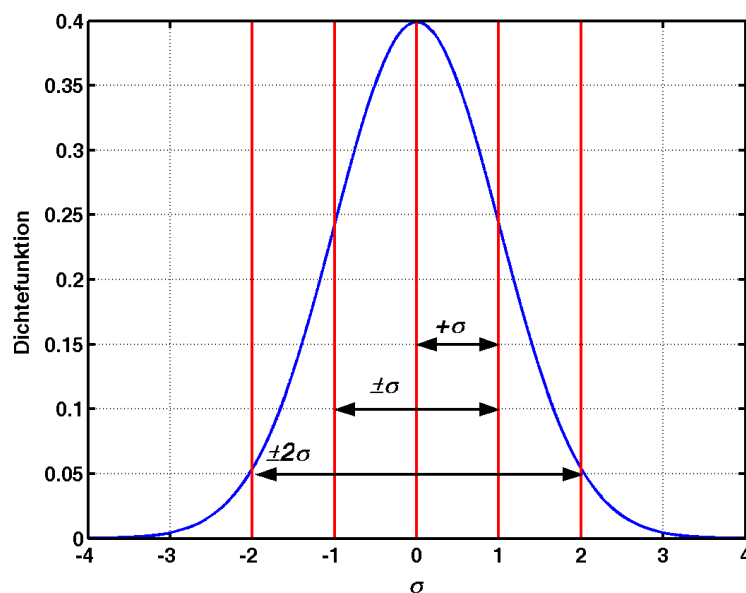


Abb. 4: Das Intervall $+\sigma$ beinhaltet 34,2 %, $\pm\sigma$ beinhaltet 68,3 % und $\pm 2\sigma$ beinhaltet 95,5 % der Fläche unter der Dichtefunktion (Normalverteilung)

Braun beschreibt, dass während des Spulvorgangs enorme Garngeschwindigkeitsänderungen bzw. hohe Garnbeschleunigungen auftreten, die die Messtechnik vor große Herausforderungen stellt /16/. Zusätzlich wurde der Einfluss des Kraft-Dehnungsverhaltens und der Fadenzugkraft untersucht, mit dem Resultat, dass diese beiden Einflussgrößen nur wenige Promille ausmachen und somit die Längenmessung mit einer Genauigkeit von $\pm\sigma \leq 0,5\%$ prinzipiell möglich ist.

Bis heute wird in der Spulerei lediglich die aufgespulte Garnlänge bestimmt. Dazu wurden verschiedene Verfahren entwickelt, auf die nachfolgend eingegangen wird. Die Garngeschwindigkeit wurde bisher nur im Labormaßstab gemessen. Zu einem Serieneinsatz der Geschwindigkeitsmessung ist es bis heute nicht gekommen. Oft wird der Hinweis gegeben, dass die Geschwindigkeitsmessung aufgrund der hohen Garndynamik nur mit einem erheblichen messtechnischen Aufwand zu bewerkstelligen ist, der in einem serienmäßigen Einsatz unwirtschaftlich wäre. Um dennoch einen Überblick zu erhalten, welche Messtechnik prinzipiell am ehesten für die Garngeschwindigkeits- und Garnlängenmessung in der Spulerei geeignet ist, werden auch die Messprinzipien betrachtet, mit denen außerhalb der Spulerei Garne vermessen werden.

2.3.2 Conometer-Methode und Modifikationen

Den Stand der Technik und die mit Abstand kostengünstigste Methode stellt bei den großen Spulmaschinenherstellern die Messung der Garnlänge nach der so genannten Conometer-Methode dar. Die Ursprünge der Conometer-Methode wurden in den 60er Jahren von der Firma Schlafhorst entwickelt. Als Maß für die aufgespulte Garnlänge dient die Anzahl der Umdrehungen des Spulenantriebs, multipliziert mit einem trommelspezifischen Korrekturfaktor. Ein Beispiel für das Funktionsprinzip ist in /1/ gegeben. Heute entstehen in der Spulmaschine für dieses Verfahren keinerlei Zusatzkosten. Die Trommeln werden einzelmotorisch angesteuert. Diese Antriebe benötigen eine Drehzahlregelung. Zur Garnlängenberechnung wird der zur Regelung erforderliche Drehzahlsensor verwendet. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass zwischen dem Trommelantrieb und der Spule undefinierter Schlupf auftritt, wodurch es zu erheblichen Messfehlern kommen kann. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit bei diesem Verfahren sind diverse Modifikationen entwickelt worden:

Stutz beschreibt, dass durch gleichzeitige Messung der Spulendrehzahl, des Spulendurchmessers und der Trommeldrehzahl der Einfluss des Schlupfes zwischen

Trommel und Spule teilweise kompensiert werden kann /17, 18/. Problematisch ist jedoch die exakte Erfassung des Spulendurchmessers, da dieser relativ genau gemessen werden muss, um eine exakte Garnlänge zu erhalten: Die Spule wird im Bereich des Antriebs abhängig vom Rahmendruck und der Spulenhärte mehr oder weniger stark eingedrückt, wodurch Fehler bei der Bestimmung des Spulendurchmessers auftreten.

Eine Möglichkeit zur indirekten Messung des Spulendurchmessers ist die Ermittlung des Drehzahlverhältnisses zwischen Trommeldrehzahl und Spulendrehzahl. Allerdings muss hier der Schlupf und gegebenenfalls die Konizität der Spule mittels eines zu ermittelnden Korrekturfaktors berücksichtigt werden. Dieses Verfahren stellt eine Verbesserung zur reinen Trommeldrehzahlmessung dar. Mit diesem Verfahren werden gleichzeitig der Spulendurchmesser und die Garnlänge mit sehr wenig Aufwand mit einer Genauigkeit von ca. 3 - 5 % bestimmt.

Die Firma Savio beschreibt eine Anordnung mit direkter Durchmesserbestimmung /19/. Hier wird der Spulendurchmesser mittels eines Laser-Abstandssensors berührungslos erfasst. Die Messung findet in einem Bereich der Spulenoberfläche statt, der nicht durch den Anpressdruck des Rahmens beeinflusst wird. Das System trägt die Bezeichnung C.A.M. (Computer Aided Metering). Laut Firmenprospekt wird der Garnausschuss mit diesem System um den Faktor drei verringert /20/.

Giles stellt einen Spulendirektantrieb vor /21/. Die Fadenverlegung erfolgt mit einer Nutentrommel. Die Nutentrommel und der Spulenantrieb sind mit einem Getriebe gekoppelt. Somit tritt kein Schlupf zwischen Spule und Trommel auf. Zusätzlich wird der Spulendurchmesser erfasst. Die Berechnung der Fadenlänge erfolgt durch die drei Größen Nutentrommeldrehzahl, Spulendrehzahl und Spulendurchmesser. Nachteilig bei dieser Methode ist der hohe mechanische Aufwand für den Antrieb, sowie die sensorische Erfassung des Spulendurchmessers. Die Längengenauigkeit wurde nicht genannt.

Muta entwickelte ebenfalls einen Spulenantrieb /22/. Die Garnverlegung ist mit einem eigenen Motor versehen und erfolgt demnach unabhängig vom Spulenantrieb. Die Garnlängenberechnung erfolgt über die drei Größen Spulendurchmesser, Spulendrehzahl und Auslenkung der Garnverlegung. Auch hier ist ein hoher mechanischer Aufwand für die Garnverlegung erforderlich. Die Genauigkeit ist nicht angegeben.

Nachteilig bei der Conometer-Methode und allen Modifikationen ist, dass nur die Bewegung der mechanischen Komponenten erfasst wird. Aus dieser Bewegung wird auf die Garnlänge und die Garngeschwindigkeit geschlossen. Umweltbedingungen, Spul- und Garnparameter haben Einfluss auf die Messgenauigkeit und können systembedingt nicht kompensiert werden.

2.3.3 Reibradmethode

Um die oben genannten Nachteile der indirekt messenden Conometer-Methode zu vermeiden, ist eine direkte Messung der Garnlänge bzw. der Garngeschwindigkeit erforderlich. Die einfachste Methode der direkten Messung ist die Reibradmethode. Hier wird das Garn berührend über ein Messrad geführt, wodurch dieses über Haftreibung in Drehung versetzt wird. Die Umfangsgeschwindigkeit des Reibrades entspricht der Garngeschwindigkeit, unter der Annahme, dass kein Schlupf auftritt und dass das Garn einen unendlich geringen Durchmesser aufweist. Mit Kenntnis des Reibraddurchmessers und der Reibraddrehzahl erhält man die Garngeschwindigkeit /23/. Die Haftreibung wird in den meisten Fällen durch eine mehrmalige Umschlingung des Garns um das Reibrad sichergestellt (Seilreibung). Die Garnlänge erhält man durch Zählung der Reibradumdrehungen und Multiplikation mit einer Reibradkonstante. Die Reibradmethode stellt bis heute eine einfache und zuverlässige Garnlängen- und Garngeschwindigkeitsmethode mit einer großen Messgenauigkeit dar. Allerdings hat diese Methode auch einen erheblichen Nachteil: Es handelt sich hierbei um ein berührendes Messverfahren. Insbesondere bei höheren Abzugsgeschwindigkeiten kommt es zu einer Verringerung der Garnqualität bis hin zu Garnschädigungen.

Im Spulprozess unterliegt die Garngeschwindigkeit aufgrund der Garnverlegung mittels Nutentrommel hochdynamischen Schwankungen. Die Beschleunigungen auf dem Garn sind dementsprechend hoch. Würde zur Längenmessung ein Reibrad eingesetzt, so könnte dieses den hohen Beschleunigungen aufgrund der Massenträgheit nicht folgen. Zwischen Reibrad und Garn kommt es zu Schlupf, der die Längenmessung erheblich beeinflusst. Weiterhin führt die massenbehaftete Messeinrichtung aufgrund der Fadenchangierung zu zerstörerischen Fadenzugkraftspitzen.

Aufgrund der potentiellen Gefahr der Garnschädigung und des Schlupfs bei hoher Garndynamik und der damit verbundenen Ungenauigkeiten wird die Reibradmethode in der Spulerei im Allgemeinen nicht eingesetzt.

2.3.4 Fadenzugkraftsignal

Eine weitere Alternative zur Bestimmung der Garnlänge wird in /24/ und /25/ beschrieben. Bei diesem Verfahren wird die Garnlänge während des Spulprozesses über das Fadenzugkraftsignal (FZK-Signal) bestimmt. Dies wird durch die spezielle Kops-Bewicklung möglich. Die Ringbank einer Spinnmaschine wandert zyklisch und asymmetrisch auf und ab und sorgt so für den speziellen Aufbau der Garnlagen eines Kopses an jeder einzelnen Spinnstelle. Der Kopsaufbau ist somit bei allen Spinnstellen einer Spinnmaschine gleich. Pro Ringbankzyklus wird bei allen Spinnstellen die gleiche Menge Garn aufgewickelt. Beim späteren Kopsabzug über Kopf wandert der Garnablösepunkt zyklisch von oben nach unten und umgekehrt. Je nach Bewegungsrichtung des Garnablösepunktes steigt oder fällt die Fadenzugkraft. Dieser Zyklus kann mit einem empfindlichen Fadenzugkraftsensor gemessen werden. Durch Zählung der Perioden der Grundfrequenz des FZK-Signals und Multiplikation mit einem Korrekturwert erhält man so die aufgespulte Garnlänge. Die angegebene Messunsicherheit zur Bestimmung der aufgespulten Garnlänge ist bei dieser Methode mit $\pm\sigma \leq 0,5\%$ angegeben.

Diese Methode hat allerdings auch Nachteile: Die Spulstellen müssen mit einem empfindlichen Fadenzugkraftsensor direkt hinter dem Kopsabzug ausgestattet werden. Außerdem muss der Korrekturwert stichprobenartig für einige Kopse einer Charge aufwändig im Labor ermittelt werden. Der dadurch entstehende logistische und zeitliche Aufwand ist für den Produktionsbetrieb praktisch nicht umsetzbar.

2.3.5 Garnladung

Eine permanente Messung der Garngeschwindigkeit und der Garnlänge direkt am Garn ist mit der Garnladungsmethode möglich. Besonders vorteilhaft ist hier die prinzipielle Berührungslosigkeit des Verfahrens. Die Methode wurde erstmals in den 60er Jahren erwähnt und entwickelte sich von einer Laufzeitmessung zu einem Ortsfrequenz-Filterverfahren. Die erste Anwendung der Laufzeitmessung bestand aus zwei Elektroden, die räumlich versetzt am Garn berührungslos angebracht wurden. Die erste Elektrode markiert das laufende Garn mit Ladungsträgern. Die Ladungsträger wandern mit dem Garn bis zur zweiten Elektrode und werden dort ausgelesen. Die Laufzeit zwischen den Elektroden ist ein Maß für die Fadengeschwindigkeit /26-28/. Die Garnlänge wird durch zeitliche Integration der Garngeschwindigkeit bestimmt. Die Verfahren wurden hauptsächlich im Bereich der Strickerei entwickelt, um den Garnverbrauch zu messen. Das Verfahren wurde aber

auch zur Geschwindigkeitsmessung von Kunststoffoberflächen und Kunststoffbändchen verwendet /29/. Ebenfalls in den 60ern wurde eine verwandte Methode im Bereich der Chemiefasern entwickelt. Eine Variante besteht aus drei Elektroden die hintereinander angeordnet sind. Die erste Elektrode stellt eine Sprühelektrode dar, die einen charakteristischen Ladungspuls auf das laufende Garn aufbringt. Durch Bewegung des Garns trifft die Ladungsmarkierung zunächst auf die zweite Elektrode, die daraufhin eine Zeitmessung startet. Die dritte Elektrode, die in einem definierten Abstand zur zweiten Elektrode angeordnet ist, stoppt die Zeitmessung bei Registrierung der Ladungsmarkierung. Aus der verstrichenen Zeit und dem räumlichen Abstand zwischen zweiter und dritter Elektrode errechnet sich die Garngeschwindigkeit /30/. Eine alternative Variante wurde ohne Sprühelektrode realisiert /31/. Hier wird die Tatsache genutzt, dass das Garn durch Reibung an vorgelagerten Fadenführelementen mit elektrischen Ladungen versehen ist und dass diese ungleichmäßig auf dem Garn verteilt sind. Die beiden im definierten Abstand zueinander angeordneten Elektroden messen den zeitlichen Verlauf dieser Ladungsverteilung. Die Garngeschwindigkeit wird durch eine Korrelationsberechnung bestimmt. Das Signal der ersten Elektrode wird so lange verzögert, bis es die höchste Ähnlichkeit mit dem Signal der zweiten Elektrode aufweist. Die Garngeschwindigkeit entspricht der Division aus Elektrodenabstand zur Laufzeitverschiebung.

Pusch beschreibt, dass technologische Informationen über textile Verarbeitungsprozesse nicht nur im Mittelwert sondern insbesondere im Momentanwert der Messgröße stecken /32/. Als Beispiel wird die Garngeschwindigkeitsmessung in der Rundstrickmaschine zur Erfassung von Nadeldefekten genannt. In diesem Zusammenhang wurde die Idee der Garngeschwindigkeitsmessung mit Hilfe der Fadenladungskorrelation aufgegriffen. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Messdynamik für die Anwendung in einer Strickmaschine zu gering ist. Als Alternative wurde die Laser-Doppler-Anemometrie genannt, die jedoch aus Kostengründen nicht eingesetzt werden konnte. Daher wurde eine Eigenentwicklung eines Garnladungssensors angestrebt /33/. Schäfer beschreibt die Entwicklung eines Garnladungssensors, der auf Basis des Ortsfrequenz-Filterverfahrens arbeitet /34/. Bei dieser Methode wird das Garn über zwei kammartige Elektroden geführt, die versetzt ineinander angeordnet sind. Bei der Bewegung des Garns über die Elektrodenstruktur wird ein elektrisches Signal erzeugt, dessen Frequenz proportional zur Garngeschwindigkeit ist. Die detaillierte Funktionsweise und der Aufbau der Sen-

sorik werden von Duan erläutert /35/. Vorteile des Verfahrens sind die Berührungslosigkeit und die kostengünstige, leicht herzustellende Hardware.

Nachteilig ist insbesondere die Abhängigkeit vom Material und der Garnfeinheit. Die Messgenauigkeit schwankt je nach Fasermaterial. Außerdem ist das Sensorprinzip für sehr feine Materialien nur bedingt geeignet. Bei gröberen Feinheiten kann es zu Signalausfällen kommen. Für die Spulerei sind insbesondere zwei Punkte von Nachteil. Zum einen ist die relativ lange Bauform der Elektrode von 100 mm für die beengten Platzverhältnisse in einer Spulstelle unvorteilhaft. Zum anderen sinkt die Messgenauigkeit mit steigendem Geschwindigkeitsbereich. In der Spulerei ist ein Bereich von 1 : 10 (Verhältnis von kleinster zu größter Geschwindigkeit) nicht unüblich. Hier ist die mittlere quadratische Abweichung mit 5 % angegeben und somit für eine hochgenaue Messung nicht ausreichend /36/.

Schäfer beschreibt weitere Anwendungsgebiete des Garnladungssensors /37/. Dazu gehören die Strickerei (Rundstrickmaschinen), Greifer-Webmaschinen und die Spulerei. Eine neuere Veröffentlichung des Garnladungssensors gibt die Messunsicherheit mit 1 - 2 % an, ohne jedoch den Begriff Messunsicherheit zu definieren. Bei den Messungen muss der Geschwindigkeitsbereich vorab eingestellt werden. Dazu stehen drei Bereiche zur Auswahl (80 – 240 m/min, 150 – 450 m/min und 400 – 1.200 m/min). Die maximale Geschwindigkeit ist mit 1.200 m/min angegeben, demnach kann der übliche Geschwindigkeitsbereich einer Spulmaschine nicht vollständig abgedeckt werden.

2.3.6 Optisches Ortsfilterprinzip

Die Geschwindigkeitsmessung nach dem optischen Ortsfilterprinzip wird seit einigen Jahrzehnten überwiegend in nicht-textilen Prozessen durchgeführt. Kreuzer entwickelte die theoretischen Grundlagen zur Dimensionierung des optischen Aufbaus /38/. Aizo vergleicht das optische Ortsfilterprinzip mit der Laser-Doppler-Anemometrie /39/. Beim optischen Ortsfilterprinzip handelt es sich ebenfalls um ein Ortsfrequenz-Filterverfahren, wie es im vorhergehenden Unterkapitel 2.3.5 beschrieben worden ist. Anstelle der elektrischen Ladung wird eine statistisch verteilte Oberflächenrauigkeit als Informationsträger genutzt und die kammartigen Elektroden werden durch ein optisches Gitter ersetzt. Die Oberfläche wird durch ein Linsensystem auf dem optischen Gitter abgebildet. Die Gitterspalten stehen dabei senkrecht zur Bewegungsrichtung der Oberfläche. Eine zweite Linse, die sich hinter dem optischen Gitter befindet, fokussiert das vom Gitter durchgelassene Licht auf

einen Photoempfänger. Das Gitter funktioniert als Ortsfilter und hat die Wirkung eines Bandpasses. Bei Bewegung der Oberfläche entsteht am Photodetektor eine zur Garneschwindigkeit proportionale Frequenz. Nachteilig bei diesem Verfahren ist eine Entfernungsabhängigkeit der gemessenen Geschwindigkeit zwischen Messempfänger und Oberfläche. Um die Entfernungsabhängigkeit zu minimieren, ist eine aufwändige telezentrische Optik erforderlich. Die Oberflächenrauigkeit muss statistisch verteilt sein. Periodische Oberflächenstrukturen (z.B. bei Zwirn) können zu Fehlmessungen führen. Vorteilhaft gegenüber der Garnladungsmethode ist eine bessere Ortsauflösung aufgrund der kleineren Messfläche.

Zufällig schwankende Helligkeitsunterschiede (Fremdlicht, unregelmäßige Oberflächenbeschaffenheit des bewegten Messguts, Eigenbewegung der Lichtquelle) führen zu Störsignalen. Das Resultat können fehlerhafte Geschwindigkeitsmessungen sein. Daher ist man bestrebt die Störsignale auszublenden. Baxtor beschreibt dazu spezielle Anordnungen optischer Gitter /40/. Durch eine Differenzgitteranordnung wird das zu messende Streulicht in zwei Komponenten aufgeteilt und auf zwei separate Photoempfänger geleitet. Die Anordnung ist so ausgelegt, dass sich bei Differenzbildung beider Photodetektorsignale die Störsignale aufheben. Nachteilig bei optischen Gittern und insbesondere bei Differenzgitteranordnungen ist die für eine hohe Messgenauigkeit notwendige hohe Präzision des Gitters.

CCD-Zeilenkameras können ebenfalls als optische Gitter eingesetzt werden. Die Vorteile liegen im monolithischen Aufbau, d.h. das Gitter und der Detektor sind in einem Bauteil - im CCD-Chip - vereint. Dadurch entfällt die Abbildungsoptik zwischen Gitter und Empfängerdiode. Durch eine speziell angesteuerte Zeilenkamera und eine entsprechend adaptierte Elektronik sind das Entfernen der Störfrequenzen und eine Richtungserkennung möglich. Durch die elektronische Ausführung des Gitters spricht man von einem aktiven Gitter. Fiedler beschreibt zahlreiche Anwendungen /41/. Christofori stellt eine mathematische Beschreibung der aktiven Gitteranordnung und Optimierungsmechanismen vor /42/. Die Messunsicherheit wird mit 0,2 % für Geschwindigkeiten von 1 - 3.000 m/min angegeben, wobei der Begriff Messunsicherheit nicht weiter definiert wurde /43/. Außerdem wurden keine Angaben zur maximalen Messdynamik aufgeführt. Christofori beschreibt die Anwendung des so genannten „Ortgitter-Anemometer“ für textile Flächengebilde /44/.

Die Anwendung des optischen Ortsfilterprinzips mit einfachen Strichgittern und Abbildungsoptik in der Spulerei wurde erstmals 1986 von Allemann erwähnt /45/.

Hintergrund der Entwicklung war eine Verbesserung der Garnlängenmessung zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit in der Zettlerei. Die Idee wurde 2005 von der Firma Murata aufgegriffen /46/ und auf der ITMA 2007 als PLC-Sensor-Prototyp (Precice Length Control) vorgestellt. Das aktive Gitter wird durch ein Photodiodenarray realisiert. Durch Differenzanordnung können Störsignale unterdrückt werden. Angaben zur erreichten Garnlängengenauigkeit sind jedoch nicht bekannt.

2.3.7 Korrelationsmethode

Bei der Korrelation wird die Geschwindigkeit mit Hilfe einer Laufzeitmessung durchgeführt. Zwei im Abstand L_K befindliche Sensoren generieren jeweils ein Signal ausgehend von der statistisch verteilten physikalischen Eigenschaft des Gegenstands. Dies können beispielsweise eine statistisch verteilte Oberflächenrauigkeit, Dichteschwankungen, oder eine Ladungsverteilung sein. Abhängig von der zu messenden physikalischen Größe werden unterschiedliche Sensoren eingesetzt. Beide Signale werden einem Korrelator zugeführt, der ein Signal so lange um die Zeit τ verschiebt, bis beide Signale eine maximale Übereinstimmung aufweisen bzw. der Korrelationskoeffizient maximal ist. Die Geschwindigkeit v_K des Gegenstandes beträgt nach Gleichung 2-1:

$$v_K = \frac{L_K}{\tau} \quad 2-1$$

Die Berechnung der Korrelation ist in der Regel eine mathematisch aufwändige Methode, die einen entsprechenden Bedarf an Rechenkapazität bedingt. Es bestehen jedoch Möglichkeiten diesen Aufwand zu minimieren. Eine besonders einfache Ausführungsform eines Korrelators wird erstmals 1971 von Mesch aufgeführt /47/. Hierbei werden die Gleichanteile der Sensorsignale gefiltert und anschließend der Wechselanteil mit Hilfe der Vorzeichenfunktion auf 1 Bit quantisiert. Durch die 1 Bit-Quantisierung ist es möglich, die Korrelationsberechnung in einfacher Logikbauweise als Laufzeitregelkreis zu realisieren.

Die Erprobung dieses Korrelationsrechners erfolgte an Zweiphasenströmungen. Mesch und Fritsche beschreiben einen solchen Korrelationsrechner unter Verwendung optischer Sensorik und stellen die systematischen und statistischen Fehlerquellen dar /48, 49/. Es wird gezeigt, dass die Fehler mit wachsendem Messpunkt-
abstand L_K der Sensoren und mit wachsender Signalbandbreite sinken. Gleichzeitig steigt jedoch die Neigung zum Einstellen auf falsche Extrema in der Korrelations-

funktion. Zusätzlich sinkt der maximale Korrelationskoeffizient mit wachsendem Messpunktabstand.

Mesch beschreibt, dass die möglichen Einsatzgebiete des Korrelationsrechners in erster Linie von der Wahl der Sensorik bestimmt werden /50/. Es werden unterschiedliche Applikationen genannt und Vorschläge für die entsprechende Sensorik gegeben. Hervorgehoben werden die Automatisierbarkeit und der große Messbereich. Außerdem wird hergeleitet, dass die Streuung der Korrelationsfunktion (bzw. Messunsicherheit) mit steigender Messzeit auf Kosten der Bandbreite wächst. Das Verfahren ist also entweder genau oder dynamisch.

Im textilen Bereich wurde die Korrelationsmethode erstmals 1973 von Lünenschloß erwähnt /51/. Dort wurde die Fasergeschwindigkeit im Faserleitkanal mit Hilfe optischer Sensoren berührungslos bestimmt.

Wulforst gibt einen groben Überblick über verschiedene Sensorsysteme zur Messung der Geschwindigkeit von Garnen und Flächengebilde /52/. Der Schwerpunkt liegt auf der Korrelationstechnik nach dem oben beschriebenen Korrelationsrechnerprinzip („1 Bit-Quantisierung“ oder „Digital-Korrelator“). Es wird darauf hingewiesen, dass ein Einrasten auf Nebenmaxima der Korrelationsfunktion möglich ist, wodurch es zu Fehlmessungen kommen kann. Als Vorteilhaft werden die Berührungslosigkeit, der große Geschwindigkeitsbereich und die einfache Sensorik genannt.

Zeitler beschreibt detailliert die Funktionsweise und Dimensionierung der Komponenten eines Laufzeit-Korrelators und dessen Einsatz in der Spulerei zur Erhöhung der Genauigkeit der Garnlängenmessung /53, 54/. Es werden alternative Messmethoden wie die Laser-Doppler-Anemometrie oder Messräder genannt. Die LDA-Technik wird jedoch, wie auch schon von Pusch (Garladung) in /32/ beschrieben, als zu teuer angesehen. Die Messräder weisen zuviel Schlupf auf und schädigen möglicherweise die Garnoberfläche. Die Conometer-Methode wird als zu ungenau betrachtet. Bei der Angabe der Messgenauigkeit des Laufzeit-Korrelators wird zwischen reproduzierbarer und absoluter Genauigkeit unterschieden. Die absolut aufgespulte Garnlänge wird nur prozentgenau erfasst. Begründet wird dies mit einer starken Dekorrelation, verursacht durch die hohe Fadendynamik. Da die Fadendynamik jedoch auf allen Spulstellen relativ gleich ist, liegt die reproduzierbare Genauigkeit der Garnlängen von Spule zu Spule unter 0,5 %.

Der Einsatz des Laufzeit-Korrelators als Garnlängenmessgerät in einer Spulmaschine wurde 1994 von der Firma Schlafhorst patentiert /55/. Die Problematik, dass sich der Laufzeit-Korrelator auf Nebenmaxima einregelt und somit Fehlmessungen verursacht, wurde durch Vorgabe einer Führungsgröße gelöst. Die Führungsgröße wird von der Antriebsgeschwindigkeit abgeleitet und dient als Messbereichsvorgabe des Korrelators. Die grobe Einstellung erfolgt daher nach der klassischen Conometer-Methode. Die Feinmessung der Garnlänge ist Aufgabe des Laufzeit-Korrelators.

Die geschichtliche Garnlängenmessung bei der Firma Schlafhorst, mit dem Hintergrund der Verbesserung der Produktivität und der Wirtschaftlichkeit der Webereivorbereitung, Weberei und Zwirnerie, ist in /56/ dargestellt. Dabei stellt der Laufzeit-Korrelator mit dem Produktnamen Ecopack den Stand der Technik dar. Die in der Praxis erreichbare (relative) Längenmessgenauigkeit von Spule zu Spule ist mit besser als 1 % angegeben. Mit dem Ecopack wird nur die aufgespulte Garnlänge ermittelt.

Größter Nachteil bei der Garnlängenmessung mit der Laufzeit-Korrelationsmethode ist die stark eingeschränkte Messdynamik. Die Laufzeitkorrelation basiert auf einem statistischen Messverfahren. Dadurch gehen große Geschwindigkeitsschwankungen, wie sie beim Spulvorgang auftreten nur gemittelt ein. Die Messdynamik ist auf wenige Hertz beschränkt. Eine Messung der momentanen Garngeschwindigkeit ist mit einem Laufzeit-Korrelator im Spulprozess nicht möglich. Ein weiterer Nachteil ist dass die beiden Sensorsignale statistisch verteilt sein müssen. Weisen die Signale eine Periodizität auf, wie dies zum Beispiel bei Zwirn der Fall ist, so besteht die Möglichkeit, dass sich der Laufzeit-Korrelator auf diese Periodizität einregelt und eine fehlerhafte Garnlänge berechnet.

2.3.8 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)

Die Laser-Doppler-Anemometrie wurde erstmals 1964 von Yeh und Cummins erwähnt /57/. Die ersten Geräte arbeiteten nach dem Referenzstrahl-Verfahren. Fünf Jahre später veröffentlichte Penny das Zweistrahl-Verfahren /58/. Die wichtigsten LDA-Lehrbücher, wurden von Durst, Melling, Withelaw /59/, Drain /60/, Ruck /61/ und zuletzt von Albrecht /62/ publiziert. Darin werden der Aufbau, die Funktionsweise und unterschiedliche Applikationen vorgestellt. Bei der Laser-Doppler-Anemometrie handelt es sich um ein berührungslos und punktorientiert arbeitendes Messverfahren, bei dem die Geschwindigkeit eines Objektes durch in-

direkte Messung von dopplerverschobenem Licht bestimmt wird. Die Funktionsweise wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

Die Hauptanwendungsgebiete der LDA-Technik finden sich in Forschung und Entwicklung. Darunter fallen beispielsweise Strömungsuntersuchungen im Windkanal für die Flugzeug-, Automobil- und Schifffahrtsindustrie oder Verbrennungsvorgänge in Motoren und Gasturbinen. Es werden hauptsächlich Geschwindigkeiten von Streupartikeln in gasförmigen und flüssigen Strömungen untersucht. Prinzipiell können aber auch Geschwindigkeiten von Festkörpern gemessen werden. Trotz immer günstigerer Laserquellen und leistungstarker, billiger Rechenkapazität ist die LDA-Technologie in der Prozessindustrie noch nicht sehr verbreitet.

Im Folgenden werden LDA-Systeme beschrieben, die einen besonders geringen Platzbedarf aufweisen oder aufgrund des Aufbaus verhältnismäßig kostengünstig sind. Außerdem werden Beispiele genannt, in denen die LDA-Technologie im textilen Bereich eingesetzt wurde.

Miniaturisierung und Vereinfachung von LDA's

Betrachtet man die Kosten aller Komponenten eines Labor-LDA's, so kommt man je nach Ausstattung auf Beträge weit über 50.000,- €. Hinzu kommen die Faktoren Wartungsaufwand, Platzbedarf und der Einsatz von geschultem Personal. Dieser Aufwand ist für die meisten Anwendungen in der Prozessindustrie, insbesondere für die Spulerei, zu hoch. Daher gibt es Bestrebungen, die Kosten für LDA-Geräte zu senken und den Einsatz zu vereinfachen.

Dopheide beschrieb schon 1987 die Möglichkeit den optischen Teil eines Low-Cost-LDA für damals unter 1.000,- DM herzustellen /63/. Es werden Laserdioden als kostengünstige Laserquelle und sogenannte Avalanche-Photodioden¹ als Empfänger vorgeschlagen.

Grünhaupt untersuchte ein LDA-System für eine prozesstechnische Anwendung /64/. Dieses LDA-System dient als richtungsempfindliches Geschwindigkeits- und Längen-Messsystem zur Regelung eines schnellen Servosystems. Durch den Einsatz eines temperaturgeregelten Diodenlasers und einer einfachen Auswertelektronik

¹ Avalanche-Photodioden (APD) sind empfindlich und schnell. Durch Anlegen einer hohen Sperrspannung tritt durch Stoßionisation ein Lawinen- (Avalanche) Effekt auf. APD's haben daher eine hohe „interne“ Verstärkung.

ist dieses System wesentlich preiswerter als ein herkömmliches Labor-LDA. Als Nachteile werden die geringe Messgenauigkeit, die Vibrationsempfindlichkeit und die für einen Serieneinsatz immer noch zu hohen Kosten genannt.

Niccum entwickelte ein kompaktes Zweistrahl-LDA mit Laserdiode zur Messung der Geschwindigkeit bzw. des Verzugsverhaltens von Chemiefasern in der Spinnerei /65/. Das Sensor-konzept wurde mittlerweile weiterentwickelt und als Messgerät zur berührungslosen, genauen Geschwindigkeits- und Längenmessung eingesetzt /66, 67/. Als geeignete Oberflächen werden u. a. Draht, Kabel, Glasfaser, Pappe, Papier, Webprodukte, Fasern, Gummi, Teppich, Plastikfolie und -bänder sowie Baustoffe genannt.

Für den Weltraumeinsatz wurde ein Mini-LDA mit besonders kompakter Bauform entwickelt /68/. Die Abmessungen der glasfasergekoppelten Messsonde betragen lediglich 30 x 40 mm. Die Signalanalyse für das Mini-LDA erfolgt mit moderner FPGA-Technologie. FPGA steht für Field Programmable Gate Array, ein frei programmierbarer Logikbaustein. Dieser besteht aus vielen tausend Logik-Gattern, die frei untereinander per Programm verbunden werden können. Im FPGA können je nach Bedarf verschiedene Algorithmen realisiert werden /69/. Mit Hilfe der FPGA-Technologie ist es erstmals möglich eine FFT-Analyse mit geringem Aufwand und ohne PC in Echtzeit durchzuführen.

An der PTB Braunschweig wurde ein Referenzstrahl-LDA zur Längenmessung bewegter Messgüter wie z.B. Textilien, Kabel, Drähte, Folien usw. entwickelt, mit dem Ziel eine berührungslose Alternative zu konventionell abrollenden Längenmessgeräten aufzuweisen. Erstmals wurde das Konzept der Messeinrichtung 1978 erwähnt /70/. Nachteilig bei diesem Konzept ist der sehr geringe messbare Geschwindigkeitsbereich.

Zervos erläutert die Entwicklung, Untersuchung und Erprobung des PTB-Referenzstrahl-LDA /71/. Der Geschwindigkeitsbereich wurde wesentlich erweitert. Dazu wurde eine Mehrbereichs-Elektronik mit 11 unterschiedlichen, sich überlappenden Arbeitsbereichen entwickelt. Die Bereichsumschaltung erfolgt dabei automatisch. Ein Nachteil des PTB-Referenzstrahl-LDA ist, dass der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor des Messguts und dem Messstrahl exakt eingestellt werden muss. Die optimale Einstellung wird in /72/ erforscht.

Zervos vergleicht das Zweistrahl-LDA-Prinzip mit dem PTB-Referenzstrahl-LDA /73/. Als Hauptvorteil des PTB-Systems wird die Unempfindlichkeit des Abstands

der Messgutoberfläche genannt. Im Gegensatz dazu muss beim Zweistrahl-LDA das Messgut im Messvolumen geführt werden. Als Hauptnachteil des PTB wird der Einsatz in rauen Umgebungen genannt, bei denen es zu starken Erschütterungen kommt (z.B. Walzstraßen). Hier ist eine exakte Überlagerung zwischen Referenz- und Streulicht schwierig.

Abou-Zeid untersuchte erstmals den Einsatz eines Diodenlasers in einem Referenzstrahl-LDA /74/. In Bezug auf einen HeNe-Laser (Gaslaser mit Helium-Neon-Gemisch) ergeben sich Vorteile vor allem in der kleineren Baugröße, der höheren Lebensdauer, dem besseren Wirkungsgrad und einem hochspannungsfreien Betrieb. Die höhere Laserleistung führt zu einem besseren Signal-Rausch-Abstand des Messsignals. Die Wellenlänge im nahen Infrarotbereich führt bei gleicher Dopplerfrequenz zu höheren Objektgeschwindigkeiten. Es werden Messunsicherheiten von $\pm 0,1\%$ genannt. Nachteilig sind mögliche Modensprünge, bei denen sich die Emissionswellenlänge des Diodenlasers sprunghaft ändern kann. Um diese zu unterdrücken, ist eine aufwändige Steuerung der Emissionswellenlänge und Laserleistung über Injektionsstrom und Temperatur erforderlich.

Einsatz der LDA-Technologie in textilem Umfeld

Das PTB-Referenzstrahl-LDA wurde zur Längenmessung florbesetzter Textilien als Alternative zu abrollenden Messrädern erprobt /75/. Aufgrund der Florcharakteristik erreichen abrollende Messräder nur eine Messgenauigkeit von typischerweise $\pm 2\%$ bis $\pm 4\%$ und können die Oberfläche nachhaltig beschädigen. Mit dem berührungslos arbeitendem LDA konnte eine um den Faktor 10 verbesserte Messgenauigkeit nachgewiesen werden.

Abou-Zeid weist darauf hin, dass bei dem PTB-Referenzstrahl-LDA ein konstanter Winkel zwischen Messstrahl und Messgutoberfläche eingehalten werden muss, wodurch dieses LDA nur für stationäre Messung geeignet ist /76/. Daher wurde am PTB für mobile Messungen ein Zweistrahl-LDA mit Diodenlaser und der oben beschriebenen Mehrbereichs-Elektronik entwickelt. Die Messgenauigkeit ist für den ungünstigsten Fall mit $\pm 0,2\%$ angegeben.

Das PTB-Zweistrahl-LDA wurde als mobiles Messgerät an Stoffmessmaschinen unter Praxisbedingungen erprobt /77/. Die Messgenauigkeit wurde mit $0,3\%$ angegeben. Die Kosten für das PTB-Zweistrahl-LDA und für das PTB-Referenzstrahl-LDA wurden damals jeweils auf eine Größenordnung von 10.000,- DM geschätzt /78/.

2 Stand der Technik und Wahl des geeigneten Messprinzips

Die Idee des PTB-Referenzstrahl-LDA wurde vom DTNW Krefeld aufgegriffen /79/. Es wurde eine entsprechende Messsonde konstruiert und eine einfache Messsignalauswertung entwickelt. Das LDA wurde an textilen Warenwickelmaschinen mit verschiedenen Materialien und Warengeschwindigkeiten bis 50 m/min erprobt. Laut Anforderungsliste soll das LDA als einfaches Sensormodul konzipiert sein, das unabhängig von Material- und Oberflächenbeschaffenheit und unabhängig von Umgebungseinflüssen arbeitet und zwecks Geschwindigkeitsregelung kompatibel mit der Maschinensteuerung ist /80/. Messungen mit dem DTNW-LDA haben ergeben, dass die LDA-Technik eine höhere Messgenauigkeit erreicht, als abrollende Messräder, da diese insbesondere bei höheren Wickelgeschwindigkeiten schlupfbehaftet sind /81/. Der HeNe-Laser des DTNW-LDA's wurde durch einen Diodenlaser ersetzt und die Signalanalyse vereinfacht /82, 83/. Die Messungenauigkeit wurde für eine Warenwickelgeschwindigkeit von 10 m/min bis 140 m/min mit $\pm 0,3\%$ angegeben. Die Kosten für ein solches LDA-System wurden damals zwischen 10.000,- DM und 15.000,- DM geschätzt. Es wurden Messungen an Spulmaschinen erwähnt, auf die jedoch nicht weiter eingegangen wurde.

Im textilen Anwendungsbereich wird die LDA-Technologie für wissenschaftliche Untersuchungen genutzt. Aufgrund der universellen Anwendbarkeit werden für diese Untersuchungen aufwändige Labor-LDA's bevorzugt. So wurden beispielsweise 1987 am ITV-Denkendorf erste Strömungsuntersuchungen am Faserleitkanal einer Rotorspinnmaschine durchgeführt. Die Messungen haben gezeigt, dass das LDA eine gute Alternative zur Sondenmesstechnik (Pitot-Rohr, bzw. Prandtl'sches Staurohr) und Durchflussmesstechnik (Rotameter) darstellt. Besonders vorteilhaft ist, dass durch die berührungslose Methode die Strömung nicht beeinflusst wird. Aufgrund des geringen Messaufwands und des hohen Informationsgehalts der Messergebnisse, stellt die LDA-Technik ein geeignetes Werkzeug dar, um strömungstechnische Optimierungen durchführen zu können /84/.

Es wurden auch Untersuchungen beim Friktionsspinnen mit einer miniaturisierten Messsonde durchgeführt. Die Messung fand nicht nur an frei fliegenden Fasern statt, sondern auch auf der Garnoberfläche. Aus der Geschwindigkeit der Garnoberfläche wurde auf die Garndrehzahl geschlossen /85/.

In der Spinnereivorbereitung haben Luftströmungen eine große Bedeutung. Die Strömungsverhältnisse bestimmen die Faserbewegung und steuern somit den eigentlichen Verarbeitungsprozess. Außerdem haben die Strömungsmechanismen bei einigen Prozessstufen einen bedeutenden Einfluss auf die Schmutzausscheidung.

Einige Strömungsuntersuchungen im textilen Bereich wurden durch die LDA-Technologie erst zugänglich gemacht. So konnte die Faserbewegung an der Karde aufgrund der baulichen Gegebenheiten erstmals überhaupt gemessen werden /86/. Über weitergehende Untersuchungen an Reinigungsmaschinen und Karde wird in /87/ berichtet. Messungen mit einem LDA an Karde und Strecke sind in /88/ beschrieben.

LDA-Messungen an bewegtem Garn wurden schon 1974 von Dubbeldam durchgeführt /89/. Zum Einsatz kam ein Zweistrahl-LDA. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Elektronik (Spektralanalysator) konnten nur konstante Garngeschwindigkeiten gemessen werden. Die maximal gemessene Geschwindigkeit betrug 3.000 m/min.

2.3.9 Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren beim Einsatz in der Spulerei

Mesch vergleicht vier optische Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit bewegter Oberflächen /90/. Es wird zwischen kohärenten (optisches Gitter und Zweistrahl-LDA) und inkohärenten Lichtquellen (optisches Gitter und optische Korrelationsmethode) unterschieden. Kohärente Lichtquellen emittieren Lichtwellen gleicher Frequenz und Phase und ermöglichen somit Interferenzerscheinungen. Die vier unterschiedlichen Verfahren sind mathematisch vergleichbar wenn man sie als Raumgittermethode betrachtet. Ein Vorteil der kohärenten Methoden ist, dass diese prinzipiell unabhängiger von der Oberflächenstruktur sind, als die inkohärenten Methoden, vorausgesetzt der Laserstrahldurchmesser ist größer als die Unebenheiten der Oberflächenstruktur. Nachteilig sind gegebenenfalls die relativ hohen Kosten des Lasers und der Photodetektoren. Die inkohärenten Verfahren sind meist weniger aufwändig und daher meist kostengünstiger. Speziell bei der inkohärenten Gittermethode muss beachtet werden, dass das Gitter speziell an die Oberflächenstruktur angepasst werden muss, um ein gutes Messsignal zu erhalten. Außerdem besteht eine starke Abhängigkeit der Messfrequenz vom Objektstand. Diese Abhängigkeit kann nur mit einer aufwändigen telezentrischen Optik behoben werden.

Zeitler vergleicht die verschiedenen Verfahren Messrad, Korrelator und LDA am laufenden Faden /91/. Ein spezieller Versuchsstand soll dabei die Abzugsverhältnisse in einer Spulstelle simulieren. Der Faden wird von einer Spule über ein Vorspulgerät durch eine schlupffrei arbeitende Galette abgezogen. Die Bildstörfrequenz wird mit der Galette durch eine Geschwindigkeitsmodulation von 1 Hz und

0,25 m/s bei einer Grundgeschwindigkeit von 16,5 m/s simuliert. Die durch die Fadenverlegung verursachte, hochdynamische Garndynamik wird ignoriert. Die unterschiedlichen Messgeräte werden auf die Tauglichkeit zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der Garnlänge getestet. Untersucht werden zwei Labor-LDA's der Firma Dantec, ein Messrad der Firma Schmidt, ein Korrelator der Firma Dantec/Invent und ein Korrelator der Uni-Karlsruhe. Bezüglich der Geschwindigkeitsmessung erzielen die LDA's die besten Ergebnisse. Aufgrund der Mittelungszeiten im μs -Bereich wird nicht nur die Bildstörfrequenz sehr gut aufgelöst, sondern es werden auch schnelle Garnfluktuationen sichtbar. Das Messrad gibt die Bildstörung ebenfalls wieder. Die Korrelator-Messgeräte haben aufgrund der statistischen Auswertemethode sehr lange Mittelungszeiten und können daher die Bildstörung nicht auflösen. Diese Messgeräte sind daher für dynamische Geschwindigkeitsmessungen nicht geeignet. Bei der Längenmessung ist die Streuung aller Messgeräte kleiner als 1 %. Die Abweichung vom Referenzwert ist kleiner als 2 %. Demnach sind für die reine Längenmessung prinzipiell alle untersuchten Geräte geeignet. Für den Einsatz in einer Spulstelle muss jedoch berücksichtigt werden, dass die hochdynamische Garnverlegung bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurde.

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Messverfahren, mit denen eine Längenmessung oder Geschwindigkeitsmessung an einer Kreuzspulmaschine möglich ist. Es werden die einzelnen Vor- und Nachteile hervorgehoben.

Mit der Conometer-Methode ist nur eine indirekte Bestimmung der Garnlänge möglich, da im Wesentlichen nur die Umdrehungen der Nutentrommel gezählt werden. Aufgrund von Schlupf zwischen Trommel und Spule ist diese Methode relativ ungenau. Eine Erfassung der Garngeschwindigkeit ist nicht möglich. Es ist jedoch die preiswerteste Methode.

Die Erfassung der Garnlänge und der Garngeschwindigkeit mit einem Messrad ist im Kreuzspulprozess nicht möglich. Aufgrund der hohen Garndynamik tritt trotz Mehrfachumschlingung Schlupf auf. Durch die Fadenchangierung hervorgerufenen Fadenzugkraftspitzen kommt es zu Schädigungen an der Garnoberfläche und es treten Garnbrüche auf. Daher werden Messräder in der Kreuzspulerei trotz der relativ geringen Kosten nicht eingesetzt.

Die Bestimmung der Garnlänge über die Fadenzugkraft konnte sich in der Praxis nicht durchsetzen, da die Längenmessung durch eine Stichprobe der Kopse einer

2 Stand der Technik und Wahl des geeigneten Messprinzips

Partie aufwändig im Labor kalibriert werden muss. Für dieses Verfahren ist die Spulstelle mit einem weiteren, empfindlichen Fadenzugkraftsensor auszustatten. Eine Geschwindigkeitsmessung mit geringer Dynamik ist prinzipiell möglich.

<i>Messverfahren</i>	<i>v</i>	<i>L</i>	<i>BL</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
Conometer	✗	✓	✓	Keine Zusatzkosten	Ungenau, erfasst Fadenlänge indirekt über Trommelantrieb
Messrad	✓	✓	✗	Kostengünstig	Berührend, ungenau
FZK-Signal	○	✓	✗	Genauere Länge	„Kalibrierung“ der Kopse im Labor, hochdynamischer FZK-Sensor erforderlich
Garnladung	✓	✓	✓	Kostengünstig	Geringe Dynamik
optisches Gitter	✓	✓	✓	Genau	Aufwändige Optik
Laufzeit-Korrelator	○	✓	✓	Genauere Länge	Sehr geringe Dynamik
LDA	✓	✓	✓	Hochgenau, hochdynamisch	Technisch aufwändig, teuer

✓: Ja ✗:Nein ○: Möglich

Tab. 1: Übersicht über die Messverfahren

Ein wesentlicher Vorteil der nachfolgenden Messverfahren ist die Berührungslosigkeit. Es tritt keine mechanische Schädigung des Garns auf, das Garn wird nicht abgebremst, die Fadenzugkraft wird nicht erhöht und Schlupf hat keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Die Garnladungsmethode kann die Garnlänge relativ genau im Promillebereich bestimmen. Nachteilig ist jedoch die Baugröße. Die Elektrodenlänge beträgt je nach Ausführungsform mehr als 10 cm. Dadurch wird die räumliche Auflösung und somit die Dynamik beschränkt. Hochdynamische Geschwindigkeiten sind daher nicht messbar. Vorteilhaft sind die geringen Herstellkosten.

Das optische Gitter hat eine räumliche Auflösung von wenigen Zentimetern. Dynamische Messungen sollten somit theoretisch möglich sein, wurden jedoch in der Literatur noch nicht beschrieben. Die erreichbare Genauigkeit hängt in erster Linie von der Gitterpräzision und der Justierung ab. Über die Kosten eines optischen Gitters für den Einsatz einer Spulstelle ist wenig bekannt. Jedoch stehen die Kosten in einem umgekehrten Verhältnis zur Gitterpräzision und dem Aufwand zur Kompensierung der Justiertoleranz.

Das Laufzeit-Korrelationsverfahren hat sich bisher als einziges berührungsloses Verfahren zur Garnlängenmessung in der Kreuzspulerei durchgesetzt (Ecopack, Fa. Oerlikon Schlafhorst). Die Messgenauigkeit wird mit $\pm\sigma \leq 0,5\%$ angegeben. Hochdynamische Geschwindigkeitsmessungen sind mit diesem System nicht möglich.

Die LDA-Methode verursacht die mit Abstand höchsten Kosten im Vergleich zu den oben genannten Verfahren. Dafür bietet das Verfahren die beste erzielbare Genauigkeit für die Garnlänge und die Garngeschwindigkeit. Aufgrund der höchsten räumlichen Auflösung liegt die erreichbare Dynamik je nach Oberflächenbeschaffenheit im zweistelligen kHz-Bereich, womit die Garndynamik in der Kreuzspulerei sicher erfasst werden kann. Nachteilig bei konventionellen LDA's ist die geringe Größe des Messvolumens im Submillimeter-Bereich, wodurch das Verfahren empfindlich auf Justierfehler reagiert. Der erhebliche technische und bauliche Aufwand ist nicht zu vernachlässigen. Bis heute beschränkt sich der Einsatz der LDA-Technologie in der Spulerei auf wissenschaftliche Untersuchungen.

Der direkte Vergleich der Messverfahren zeigt, dass das berührungslose LDA-Verfahren am besten dazu geeignet ist, die Garngeschwindigkeit und die Garnlänge hochgenau und hochdynamisch zu erfassen. Gelingt es, die LDA-Technologie an die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der Spulerei anzupassen, so bietet das hochgenaue und hochdynamische LDA-Verfahren das größte Potential zur Verbesserung der Produktivität und zur Steigerung der Garn- und Spulenqualität.

2.4 Reinigersysteme

Reinigersysteme sind feste Bestandteile von Spulmaschinen. Diese bewerten Garnfehler hinsichtlich Durchmesser und Länge und entfernen diese bei Überschreiten einer festgelegten Grenze aus dem Garn. Die Messung der Garnfehlerlänge erfolgt ausschließlich über die Conometer-Methode. Die Conometer-Methode gibt jedoch

nur die Spulgeschwindigkeit und nicht die momentanen Garngeschwindigkeit wieder. Die Spulgeschwindigkeit gibt die momentane Garngeschwindigkeit nur sehr ungenau wieder, es entstehen Messfehler bis zu $\pm 40\%$. Durch Kenntnis der momentanen Garngeschwindigkeit kann die Garnfehlerlängenbewertung und somit die Ausreinigung wesentlich optimiert werden. Zur Erfassung der momentanen Garngeschwindigkeit bietet sich, wie in Kapitel 2.3.9 dargestellt wurde, die LDA-Technologie an.

Das Ziel des Garnreinigens liegt darin, die störenden Fehler aus dem Garn herauszuschneiden, ohne den Nutzeffekt der Spulmaschine zu stark zu beeinträchtigen /92/. An dieser Stelle werden die Garnfehler-Thematik und die Funktionsweise von Garnreinigern erläutert.

2.4.1 Garnungleichmäßigkeiten

Garnungleichmäßigkeiten werden im Allgemeinen in zwei Gruppen unterteilt /2/:

1. **Die statistisch bedingten Schwankungen der Faseranzahl eines Stapelgarns und der daraus resultierenden Unregelmäßigkeit des Garndurchmessers.** Die statistisch bedingte Schwankung der Faseranzahl stellt den so genannten Garnkörper dar. Die Durchmesser Schwankung des Garnkörpers folgt einer Normalverteilung. Die Streuung der Verteilung ist im Wesentlichen von den Spinnparametern und dem Vorlagematerial abhängig. Im textilen Endprodukt stört die Ungleichmäßigkeit nicht, sofern die Streuung der verarbeiteten Garne konstant ist.
2. **Die Garnfehler, die durch Fremdstoffe, Maschinenfehler, Bedienungsfehler oder die Umgebungsbedingungen verursacht sind.** Diese lassen sich in Dick- und Dünnstellen unterteilen. Charakteristisch für Garnfehler ist, dass diese deutlich aus dem normalverteilten Durchmesser des Garnkörpers herausragen. Typische Maschinenfehler, die Garnfehler verursachen sind z.B. unrunde Streckzylinder. Bedienungsfehler können unsaubere Andreher oder eingesponnener Flug sein. Fremdstoffe können ebenfalls wesentliche Garnfehler verursachen.

Im textilen Endprodukt können Garnfehler störend wirken und so den Wert der Ware mindern bzw. den Ertrag verringern. Daher ist es wichtig störende Garnfehler zu vermeiden. Als Faustregel gilt: Je früher ein Garnfehler in der textilen Prozesskette gefunden wird, desto kostengünstiger ist seine Behebung. Die Entscheidung, ob ein Garnfehler störend ist oder nicht, hängt von vielen Faktoren ab. Insbeson-

dere die Art der Weiterverarbeitung (Weberei, Wirkerei, Strickerei) spielt eine Rolle. Daher sind eine genaue Charakterisierung der Garnfehler und die Kenntnis über die weitere Verarbeitung des Garns erforderlich. Locher erforscht unterschiedliche Garnfehler, deren Ursachen und Vermeidungsstrategien /93/. Die Einordnung der Garnfehler findet in kurze periodische Garnfehler, sich wiederholende Imperfektionen und seltene Langfehler statt. Imperfektionen teilen sich wiederum in Noppen (sehr kurze Dickstellen), Dickstellen und Dünnstellen auf. Es ist möglich, anhand der Art des Garnfehlers auf dessen Ursache zu schließen. Je nach Garnfehler liegt die Ursache in:

- Der Qualität des Rohmaterials
- Den Prozessparametern
- Dem Zustand der Produktionsmaschinen und Wartung
- Der Ausbildung und Erfahrung der Mitarbeiter

Mögliche Ursachen von Garnfehlern und Vermeidungsstrategien wurden untersucht und eine detaillierte Übersicht entwickelt /94/.

Ein weiteres zentrales Problem sind Fremdstoffkontaminationen. Diese unterteilen sich nach Haldemann in Fremdkörper, Fremdfasern und Samenöl /95/. Je feiner die Garne ausgesponnen werden, desto eher treten Fremdstoffe in Erscheinung und stören in fertigem Gewebe oder Gewirk. Fremdstoffe sind auch verantwortlich für einen Anstieg der Dick-, Dünnstellen und Noppen, da diese den Verzugprozess im Streckwerk stören. Untersuchungen haben gezeigt, dass Fehlstellen durch Fremdstoffverseuchung um Faktor 1,5 ansteigen können.

2.4.2 Funktionsweise von Garnreinigern

Die Funktionsweise eines Garnreinigers lässt sich am einfachsten durch folgende Definition beschreiben: „Unter einem Garneiniger wird eine an textilen Spulmaschinen beliebiger Art anzubringende Vorrichtung verstanden, die den durchlaufenden Faden auf seine Gleichmäßigkeit abtastet und bei Ungleichmäßigkeiten wie Einschnürungen, Verdickungen, Flusen usw. ein Kontrollsignal abgibt; dieses Signal kann zum Abstellen der entsprechenden Spulstelle, zum Abschneiden des Fadens an der entsprechenden Ungleichmäßigkeitsstelle benutzt werden“ /2/. Dabei werden die zeitlichen Schwankungen der Garndicke während des Spulvorgangs in elektrische Signale umgewandelt. Diese Signale werden einer Auswerteinrichtung

zugeführt, die bei Auftreten eines Garnfehlers das Kontrollsignal zum Entfernen des Garnfehlers abgibt.

Die Hauptaufgabe von Garnreinigern besteht darin die Garnfehler anhand ihres Durchmessers und ihrer Länge einzuordnen, den Garnfehler bei Überschreiten einer definierten Grenze zu entfernen und durch einen Spleißer zu ersetzen.

Die Garnfehlerlänge wird bei modernen Systemen indirekt über die Conometer-Methode bestimmt. Die hochdynamische Garngeschwindigkeit geht nicht in die Längenmessung ein, wodurch es zu erheblichen Fehlern bei der Garnfehlerlängenbestimmung kommen kann. Dieser Aspekt wird in Unterkapitel 2.4.3 detailliert beschrieben.

Der Garnfehlerdurchmesser wird entweder optisch oder kapazitiv erfasst. Es wurde ein Vergleich der beiden Verfahren durchgeführt /92/. Die kapazitive Methode misst demnach die Garnmasse bzw. den Garnquerschnitt. Nachteilig ist, dass das Verfahren empfindlich auf Feuchtigkeitsänderungen reagiert. Das optische Verfahren arbeitet nach dem Durchlichtprinzip. Je größer der Garndurchmesser, desto höher ist die Abschattung. Im Vergleich zum kapazitiven Verfahren wird also nicht der Garnquerschnitt, sondern der Garndurchmesser eindimensional bestimmt. Die beiden unterschiedlichen Verfahren haben Vor- und Nachteile, so dass das entsprechende Verfahren individuell für den jeweiligen Einsatzzweck ausgewählt werden sollte.

Darüber hinaus wurden weitere zahlreiche optische Verfahren untersucht, um den Garndurchmesser zu bestimmen. Beispielsweise wurden drei optische Verfahren miteinander verglichen: Die integrierende Abschattungsmethode, ein Laserscanverfahren und eine Methode mit einer CCD-Zeilenkamera /96/. Die integrierende Abschattungsmethode entspricht im weitesten Sinne der Methode, wie sie in handelsüblichen Reinigern verwendet wird. Sie ist am billigsten, weist aber laut Untersuchung die größten Probleme hinsichtlich Materialabhängigkeit, Materialkompaktheit und der Beleuchtung auf. Das Laserscanverfahren misst sehr exakt und ist sehr gut reproduzierbar. Nachteilig sind die geringen Abtastgeschwindigkeiten, bewegte mechanische Teile und der hohe Preis. Die Zeilenkameramethode ist problematisch bezüglich der Beleuchtung. Allerdings ist diese flexibler als das Laserscanverfahren und kann außer dem absoluten Durchmesser weitere Garnparameter bestimmen. Schwerdtner untersuchte den Einsatz einer CCD-Zeilenkamera in Kombination mit einer Laserlichtquelle /97/. Es wurden unterschiedliche Messanordnungen rea-

lisiert, darunter die optische Differentiation und die Beugungsanordnung. Je nach verwendetem Material (Monofilament, Multifilament und Stapelfasergarn) erlaubt das Verfahren eine sehr exakte Bestimmung des Durchmessers. Das Verfahren wird in Garnreinigern jedoch nicht eingesetzt.

Garnreiniger messen permanent den Garndurchmesser. Es besteht jedoch die Notwendigkeit, kurze Dickstellen, von langen Dickstellen zu unterscheiden. Kurzfehler stören im fertigen Endprodukt weniger als Langfehler und können somit im Garn verbleiben. Daher wird in Reinigern die Durchmesserinformation mit der Längeninformation verknüpft /2/. Es wird somit eine Durchmesser-Längenbewertung für jeden einzelnen Garnfehler durchgeführt. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Qualität vom produzierten Garn zu erfassen. Überschreitet ein Garnfehler festgelegte Grenzen, ist es möglich den Spulprozess zu unterbrechen, und den Garnfehler zu entfernen.

Moderne Reinigersysteme beinhalten auch klassische Laboraufgaben. So werden zum Beispiel die Garngleichmäßigkeit, sowie daraus abgeleitete Größen protokolliert. Im Gegensatz zum Spinnereilabor ist eine Erfassung über 100 % der Produktion möglich. Durch die Möglichkeit, Garnfehler zu dokumentieren, Garnfehler bei Bedarf gezielt aus dem Garn entfernen zu können und der 100 %-Produktionsüberwachung sind Garnreinigersysteme zu einem wichtigen Qualitätsmanagementsystem in der Spinnerei geworden.

Klassierungsmechanismen

Kurze Dickstellen (Nissen) stören in der Weiterverarbeitung und in der Fertigware weniger, als lange Dickstellen. Eine Ausreinigung wird demnach durch einen zweidimensionalen Zahlenwert, bestehend aus Länge und Durchmesser ausgelöst. Man spricht auch von einer Durchmesser-Längenbewertung. Dieser zweidimensionale Zahlenwert wird in einer so genannten Klassiermatrix bzw. einem Klassierfeld dargestellt. Eine detaillierte Funktionsweise der Klassierung ist beispielsweise in /98/ dargestellt. Die Klassiermatrix ist ein rechtwinkliges Koordinatensystem, dessen x-Achse der Garnfehlerlänge und die y-Achse dem relativen Garnfehlerdurchmesser entsprechen. Jeder Garnfehler stellt dann genau einem Punkt in der Klassiermatrix dar.

Durch die zweidimensionale Darstellung sind in der Klassiermatrix Bereiche auszumachen, die unterschiedlichen Fehlern entsprechen. Z.B. finden sich Noppen, Kurzfehler, Langfehler und Doppelfäden sowie Dünnstellen an unterschiedlichen

Stellen in der Klassiermatrix wieder. Daher wird die Klassiermatrix herstellerabhängig in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Z.B. unterteilt die Firma Uster die Klassiermatrix in vier Klassen: Neps < 1 cm (Noppen), Shorts 1 – 8 cm (Kurzfehler), Long > 8 cm (Langfehler) und Thin (Dünnstellen).

Die Grundlagen der Garnreinigung werden in /99/ erläutert. Dort wird u. a. beschrieben, dass Garnfehler eine Mindestlänge in Kombination mit einer Mindestgröße aufweisen müssen, um klassiert zu werden. Dies ist erforderlich, um einen Großteil der statistisch bedingten Ungleichmäßigkeiten des Garndurchmessers aus der Klassiermatrix auszublenden. Der Mindestdurchmesser wurde von den Herstellern jedoch so gewählt, dass ein gewisser Teil dieser Garn-Ungleichmäßigkeiten in der Klassiermatrix dargestellt wird. Dies hat den Vorteil, dass die eigentlichen Garnfehler von dem statistisch verteilten Garnkörper unterschieden werden können.

Reinigerkurve

Nach Pidoux stellt eine Reinigerkurve eine beliebig gestaltete Grenze in der Klassiermatrix dar /98/. Oberhalb der Grenze liegende Garnfehler werden aus dem Garn herausgeschnitten und durch einen Spleißer ersetzt. Die Gestaltung der Reinigerkurve hat einen direkten Einfluss auf die Garnqualität. Es gilt der Zusammenhang: Je weniger Spleißer pro Längeneinheit und je enger die Reinigerkurve für nicht tolerierbare Garnfehler, desto höher ist die Garnqualität.

Moderne Garnreiniger verfügen über eine Spleißerüberwachung, um ein gutes Aussehen des Spleißers zu gewährleisten. Dadurch wird sichergestellt, dass weniger störende Garnfehler nicht durch störende Spleißstellen ersetzt werden /100/. Es ist wenig sinnvoll alle Garnfehler auszureinigen /99/. Reinigen bedeutet dass ein störender Fehler durch einen weniger störenden Spleißer ersetzt wird. Die Grenze ab wann die Reinigung stattfindet, wird durch die Reinigerkurve festgelegt. Der Verlauf der Reinigerkurve wird in der Regel von der Abteilung Qualitätssicherung bzw. vom Spinnereilabor festgelegt. Die Festlegung der Reinigerkurve entspricht einer Prozessoptimierung: Die Kurve wird während der Produktion dem Garnkörper angepasst. Danach wird die Reinigerschnittrate (Schnitte/100 km) beobachtet und das gereinigte Garn im Spinnereilabor analysiert oder auch Gewebe dahingehend überprüft, welche Imperfektionen sichtbar sind. Bei Bedarf wird die Reinigerkurve optimiert. Dieser Vorgang wiederholt sich ständig, bis die optimale Reinigereinstellung gefunden wurde. Falls die Reinigerschnittrate zu hoch werden sollte

(> 100 Schnitte/100 km), muss entschieden werden, ob die Reinigergrenze optimiert werden kann, oder ob die Garnqualität durch Optimierungen in der Spinnerei zu verbessern ist.

Typische Reinigerschnittraten

Generell gilt, dass Garnfehler bereits in der Spinnerei zu vermeiden sind. Garnreinigersysteme sollten als Qualitätssicherungssystem angesehen werden, nicht als Qualitätsreparatursystem. Andererseits gilt, dass es kein fehlerfreies Garn gibt. Daher ist ein Optimum zwischen Ausreinigung von Garnfehlern und den Produktivitätseinbußen durch reinigerbedingte Stillstände der Spulstelle zu finden. Folgende Kenngrößen dienen als Richtwerte /99/:

Abhängig vom Material sind ca. 20 bis 100 Fehler-Ereignisse pro 100 km Garn die Regel. Als Fehler-Ereignisse gelten Dickstellen, Dünnstellen oder Fremdfasern. Berücksichtigt man, dass zusätzlich zu den Reinigerschnitten noch Spleißer durch Kopswechsel hinzukommen, so spricht man von einem angemessenen Laufverhalten der Spulstelle, wenn die mittlere Zeit zwischen zwei Spleißvorgängen unter einer Minute liegt. (Für eine Spule mit 100 km Garn ist im Mittel von 30 Kopswechseln auszugehen.)

Nach Färber liegt die Anzahl der fremdfaserbedingten Reinigerschnitte zwischen 2 und 20 Schnitten auf 100 km, wodurch ein theoretischer Nutzeffektverlust von etwa 0,2 % pro Reinigerschnitt entsteht /101/. Eine Reduzierung der Reinigerschnitte ist daher ein wirkungsvoller Beitrag zur Erhöhung der Spulmaschinenproduktivität.

2.4.3 Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Garnfehlerlänge

Die ersten elektronischen Garnreiniger aus den 60er Jahren arbeiteten rein analog. Die Fehlerlänge wurde aus der Zeit abgeleitet /2/. Zur groben Skalierung wurde eine Zeitkonstante abhängig von der vorgewählten Spulgeschwindigkeit eingestellt. Geschwindigkeitsvariationen, sowie der Spulenhochlauf oder eine Unterbrechung des Spulvorgangs wurden bei der Fehlerlängenbestimmung nicht berücksichtigt.

Diese Problematik wurde in den 70er Jahren erkannt. Neuhaus und Klösger haben festgestellt, dass die Fehlerlänge abhängig von der tatsächlichen Garngeschwindigkeit ist /102, 103/. Die Garngeschwindigkeit ist jedoch nicht konstant, sondern variiert zeitlich sehr stark. Diese Geschwindigkeitsvariationen wurden mit der Hülsenkonizität begründet. Das Trommelprofil und die Changierung gingen nicht in

die Berechnungen ein. Als zusätzliche Fehlerquellen werden der Schlupf zwischen Trommel und Spule, sowie der Spulenhochlauf genannt. Es wurde erkannt, dass die Vorgabe einer konstanten Zeitbasis für die Bestimmung der Garnfehlerlänge fehlerbehaftet ist:

„Gleichlange Fehler werden mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch das Messfeld gezogen und somit unterschiedlich lang vom Reiniger beurteilt und ausgeschieden. Besonders ungünstig wirkt sich hier aus, wenn sehr kleine, punktförmige Fehler, die normalerweise nicht erfasst werden sollen, aufgrund geringerer Garngeschwindigkeit so langsam durch den Messschlitz gezogen werden, dass ein größerer Fehler vorgetäuscht wird und ein unnötiger Schnitt erfolgt“ /102/. Eine Stellungnahme der Firma Zellweger AG (Uster) zu diesem Artikel besagt:

„Ein Problem das noch auf eine perfekte Lösung wartet, besteht in der Messung der Länge der Garnfehler unabhängig von der jeweiligen Fadengeschwindigkeit, hervorgerufen durch:

- Anlauf der Spulstelle
- Changierung zwischen kleinem und großem Durchmesser bei konischen Kreuzspulen
- Störantrieb zur Bildverhütung auf der Kreuzspule
- Schlupf zwischen Antrieb, Nutentrommel und Kreuzspule“ /102/.

Zwischenzeitlich erfolgt die Garnfehler-Längenbewertung nicht mehr durch Vorgabe einer festen Zeitbasis, sondern über die Pulse des Trommeldrehgebers, wodurch zumindest der „Anlauf der Spulstelle“ und der „Störantrieb zur Bildverhütung“ mit in die Längenbewertung eingehen.

Das Problem der fehlerhaften Längenbewertung aufgrund der Changierung, der Hülsenkonizität und des Trommelprofils ist jedoch seit den 60er Jahren immer noch ungelöst, wie aktuellere Veröffentlichungen zeigen: „Einerseits geschieht die Erfassung der Werte der Garnfehler mit gewissen Toleranzen, die durch das System für die Erfassung bedingt sind, z.B. ungleichmäßige Geschwindigkeit des Garns. Würde derselbe Garnfehler ein zweites Mal gemessen, könnte er leicht andere Werte ergeben und sogar im Klassierfeld anders klassiert werden“ /104/.

Further beschreibt, wie die Pulse des Trommeldrehgebers (NTP: Nutentrommelpulse) zur Garnfehlerlängenbewertung genutzt werden und weist auf die Probleme

matik Schlupf und Changierung hin /92/. Außerdem wird beschrieben, dass periodische Fehler aufgrund der dynamischen Garngeschwindigkeit nur annähernd periodisch erfasst werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Längenbewertung gleichlanger Garnfehler verschwimmt die Periodizität, was durch Vergleichsmessungen zwischen Garnreiniger und Spinnereilabor bestätigt werden kann.

„Die Geschwindigkeit des den Reiniger beim Spulvorgang durchlaufenden Fadens variiert beispielsweise abhängig von der Verlegefrequenz des Fadens um circa $\pm 35\%$. Entsprechend ungenau sind die nach dem Stand der Technik durch Auswertung der Antriebswalzenimpulse gewonnenen Garnfehlerlängen für die Ausreinigung des Garns“ /105/. Es wird vorgeschlagen, die Durchmessererfassung und die Geschwindigkeitsmessung gleichzeitig mit einem Korellationssensor zu messen. Dieser Sensor ist prinzipiell für die Durchmessererfassung geeignet. Die Umsetzung der exakten Geschwindigkeitsmessung ist jedoch mit der in /105/ beschriebenen Korrelatorlösung systembedingt nicht möglich, da aufgrund des statistischen Verfahrens nur die mittlere Geschwindigkeit gemessen werden kann und nicht die hochdynamische Verlegefrequenz. Gelingt es jedoch die hochdynamische Geschwindigkeit mit einer geeigneten Methode exakt zu erfassen, dann „...sinkt die Zahl der als unzulässig angezeigten Garnfehler deutlich und damit auch die Zahl der Reinigerschnitte oder der Spinnunterbrechungen. Dies führt zu einer verbesserten Garnqualität und einer Steigerung der Produktivität der Arbeitsstelle oder der Textilmaschine“ /105/.

Mit der LDA-Technologie steht eine geeignete Messtechnik zur Erfassung der hochdynamischen Garngeschwindigkeit zur Verfügung, wodurch die Längenbewertung von Garnfehlern wesentlich genauer durchgeführt werden kann. Demnach kann mit einem LDA die Reinigung optimiert und die Produktivität des Spulprozesses gesteigert werden. Jedoch haben die hohen Kosten der LDA-Technologie bis heute einen wirtschaftlichen Einsatz in der Spulerei verhindert.

3 Ziel der Arbeit und Lösungsweg

Die momentane Garngeschwindigkeit und daraus ableitbare Messgrößen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Spulprozess. Die Kenntnis der momentanen Garngeschwindigkeit kann vorteilhaft für die Produktivität, die Garn- und die Spulenqualität genutzt werden. Bisher war es nicht möglich, die momentane Garngeschwindigkeit mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand an jeder einzelnen Spulstelle unter Produktionsbedingungen zu messen. Aus Kapitel 2.3.9 ist hervorgegangen, dass die LDA-Technologie aufgrund des berührungslosen Verfahrens, der hohen Messgenauigkeit und der großen Dynamik die beste Methode ist, die momentane Garngeschwindigkeit zu messen. Jedoch ist bis heute der Aufwand für solche Systeme zu hoch, um diese in der Spulerei wirtschaftlich einsetzen zu können.

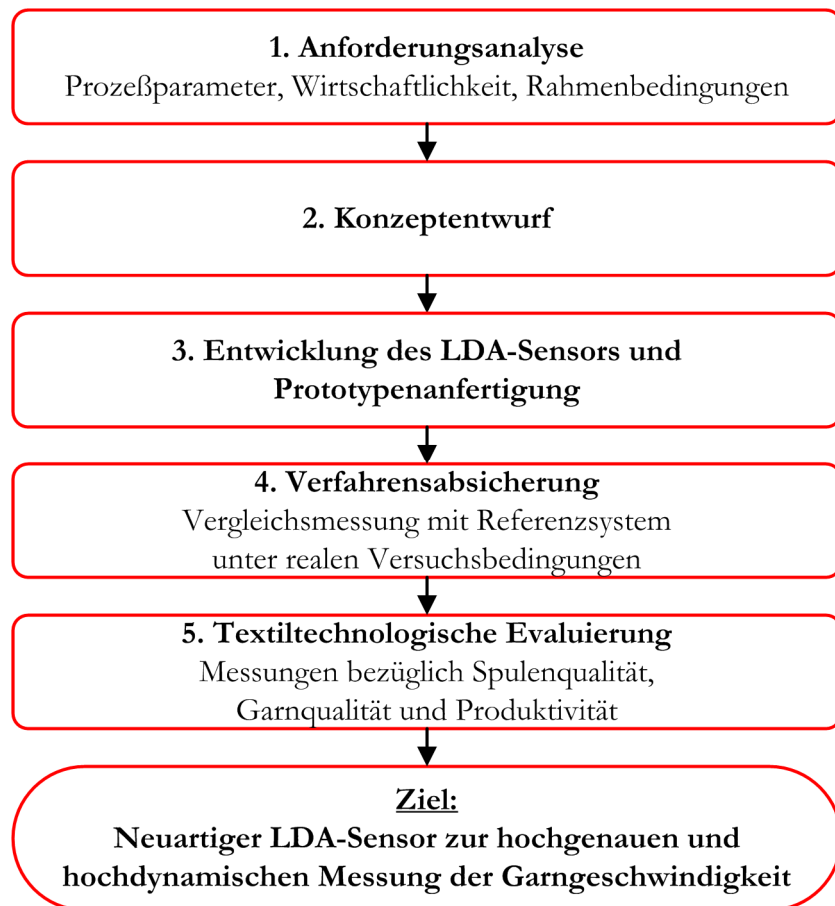


Abb. 5: Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist, ein neuartiges Sensorsystem auf Basis der LDA-Technologie zur Messung der momentanen Garngeschwindigkeit und der Länge zu entwickeln, dass wirtschaftlich in der Spulmaschine eingesetzt werden kann. Zusätzlich wird

3 Ziel der Arbeit und Lösungsweg

das System daraufhin untersucht, welche technologischen Verbesserungen, bezüglich der Garnqualität, der Spulenqualität und der Produktivität, durch die Kenntnis der momentanen Garngeschwindigkeit erreichbar sind.

Zur Erreichung des Ziels der Arbeit werden folgende Meilensteine verfolgt (siehe Abb. 5):

1. Analyse der Anforderungen der Spulerei an ein Sensorsystem zur Erfassung der momentanen Garngeschwindigkeit und der Garnlänge. Ermittlung der Messbereiche der Prozessgrößen Garngeschwindigkeit, Beschleunigung, Dynamik usw.. Untersuchung der wirtschaftlichen Anforderungen: Geforderte Messgenauigkeit, Amortisationskosten, Wartung, Standzeit usw.. Hinzu kommen Rahmenbedingungen wie die zulässige Bauform, Standzeit, Wartungsaufwand etc.
2. Entwurf eines Optik- und Elektronik-Konzepts welches die genannten Anforderungen erfüllt.
3. Entwicklung der Optik und Elektronik entsprechend dem Konzept. Aufbau geeigneter Testeinrichtungen. Stetige Optimierung durch neue Erkenntnisse. Anschließender Aufbau eines LDA-Sensor-Prototypen.
4. Vergleichsmessungen zwischen LDA-Sensor und einem Referenzsystem zur Verfahrensabsicherung. Als Referenzsystem dient ein professionelles Labor-LDA. Durchführung paralleler Messungen in einer Spulstelle mit LDA-Sensor und Labor-LDA unter realen Versuchsbedingungen.
5. Textiltechnologische Evaluierung. Es wird ermittelt, dass aufgrund der hochgenauen und hochdynamischen Geschwindigkeitsmessung Verbesserungen bezüglich der Produktivität, der Garnqualität und der Spulenqualität zu erzielen sind.

4 Anforderungen an einen LDA-Sensor für die Spulerei

Für einen erfolgreichen Seriensatz des LDA-Sensors in jeder Spulstelle einer Spulmaschine sind wichtige Kriterien zu beachten. Darunter fallen beispielsweise die maximale Baugröße sowie die maximalen Kosten, bei denen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Weitere Kriterien, die an dieser Stelle definiert werden, sind der vom LDA-Sensor zu erfassende Geschwindigkeitsbereich, die Dynamik, die zu erreichende Längengenauigkeit usw.

Längengenauigkeit und Wirtschaftlichkeit

Bezüglich der Messung der aufgespulten Garmlänge ist zu beachten, dass sich bereits ein Längenmessgerät (Ecopack-System der Firma Oerlikon-Schlafhorst) erfolgreich auf dem Markt befindet, siehe Kapitel 2.3.7. Dies zeigt, dass Kunden bereit sind, Investitionen in ein reines Längenmessgerät mit geringer Dynamik zu tätigen. Wird für vergleichbare Kosten ein System angeboten, welches zusätzlich noch weitere Leistungsmerkmale aufweist, so ist davon auszugehen, dass ein solches System von Kunden noch erfolgreicher angenommen wird.

Die Längengenauigkeit des Ecopack-Systems ist mit $\pm\sigma = 0,5\%$ angegeben /56/. Ecopack-Systeme werden vorzugsweise auf solchen Spulmaschinen eingesetzt, die Spulen für die Webereivorbereitung produzieren, da die Längengenauigkeit insbesondere in dieser Prozessstufe ein wichtiges Qualitätsmerkmal ist. Beim Gatterabzug werden sehr viele Kreuzspulen parallel abgezogen. Um eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit zu erhalten, ist es von Vorteil, dass alle Kreuzspulen die gleiche Garmlänge aufweisen. Man verringert den Aufwand in der Restespulerei und den Nachsteckbedarf von leergelaufenen Spulen im Gatter.

Durch die Einsparungen lässt sich abschätzen, welche Zusatzkosten für ein Längenmesssystem vom Markt akzeptiert werden. Tab. 2 gibt ein typisches Rechenbeispiel aus der Webereivorbereitung (Gatterabzug zur Kettbaumherstellung) wieder. Die Spulen werden unter folgenden Bedingungen produziert: Baumwolle Nm 68 mittlerer Qualität (3,- €/kg) mit 1.200 m/min Spulgeschwindigkeit unter Vollproduktionsbedingungen. Der Maschinennutzeffekt beträgt 80 %, die Maschine produziert auf 300 Spulstellen.

Dies entspricht einer Produktion von 7.420 kg/Spulstelle und Jahr, bzw. Kosten von 22.260,- € pro Jahr und Spulstelle. Wird die aufgespulte Länge mit der herkömmlichen Conometer-Methode ($\pm\sigma = 2,5\%$) gemessen, so entsteht ein Aus-

4 Anforderungen an einen LDA-Sensor für die Spulerei

schuss von 557,- € pro Jahr und Spulstelle. Kann dieser Ausschuss durch Einsatz verbesserter Längenmesstechnik ($\pm\sigma = 0,5\%$) auf 111,- € pro Jahr und Spulstelle verbessert werden, so entspricht dies einer jährlichen Einsparung von 445,- € pro Spulstelle. Da sich Investitionen in der Textilbranche sehr schnell amortisieren müssen, entspricht die jährliche Einsparung in etwa den Investitionskosten. Aus dieser Berechnung wird abgeschätzt, dass die maximalen Kosten für einen LDA-Sensor im niedrigen dreistelligen Bereich liegen dürfen und vergleichbar mit dem bereits auf dem Markt befindlichen Ecopack-System sein müssen. Die Längengenauigkeit des LDA-Sensors sollte mindestens der des Ecopack-Systems von $\pm\sigma = 0,5\%$ entsprechen, um den beschriebenen Amortisationseffekt zu erzielen.

Rohstoffpreis		4,00	€/kg
Spulgeschwindigkeit		900	m/min
Titer		68	Nm
Arbeitsstunden/Tag		24	h
Nutzeffekt		80	%
Produktionstage		365	Tage
Anzahl Spulstellen		300	
Produktion/Spulstelle		378.432	km/a
		5.565	kg/a
Kosten/Jahr/Spulstelle		22.260,71	€/a
Ausschuss/Spulstelle bei 2,5% Längengenauigkeit	2,5%	556,52	€/a
Ausschuss/Spulstelle bei 0,5% Längengenauigkeit	0,5%	111,30	€/a
Einsparung pro Spulstelle	2,0%	445,21	€/a
Einsparung bei 300 Spulstellen		133.564,24	€/a

Tab. 2: Einsparpotential beim Gatterabzug durch hochgenaue Längenmessung

Garnmaterial und Nummernspektrum

Damit ein LDA-Sensor am Markt akzeptiert wird, muss dieser ein breites Garn- und Nummernspektrum abdecken können. Zu den Garnen gehören ringgesponnene Stapelfasern, Kompakt- und Coregarne sowie Zwirne. Der messbare Nummernbereich sollte zwischen Nm 10 und Nm 200 liegen.

Geschwindigkeitsbereich und Dynamik

Ein wesentlicher Vorteil der LDA-Technologie ist, im Gegensatz zur Laufzeit-Korrelationsmethode, die hohe Messdynamik. Die Korrelationsberechnung kann aufgrund des statistisch basierten Verfahrens nur die mittlere Geschwindigkeit erfassen. Die Dynamik ist mit der Laufzeit-Korrelationsmethode daher auf wenige Hertz beschränkt. Die momentane Garngeschwindigkeit wird jedoch insbesondere beim Spulprozess von großen Beschleunigungen beeinflusst. Die Anforderungen an die Messtechnik in Bezug auf den Geschwindigkeitsbereich und der zu erwartenden Dynamik (Beschleunigungen) lassen sich am leichtesten mit dem so genannten „Garnförderprofil“ herleiten: Die Zunahme der geförderten Garmlänge wird in Abhängigkeit vom Trommeldrehwinkel erfasst. Man erhält somit eine trommelspezifische Kennlinie, wie sie in Abb. 6 zu sehen ist. Die entsprechende Trommel ist in Abb. 7 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine 2-gängige, symmetrische Nutentrommel (ug2s). Symmetrisch bedeutet, dass die Nutengeometrie spiegelsymmetrisch ausgeführt wurde. 2-gängig bedeutet, dass sich die Trommel 2-mal drehen muss, um das Garn einmal von links nach rechts zu bewegen. Für einen vollständigen Doppelhub (Hin- und Herbewegung) sind bei einer 2-gängigen Trommel also 4 Umdrehungen erforderlich.

Durch zeitliche Differentiation der Kennlinie aus Abb. 6 erhält man das Garnförderprofil. Der zeitliche Verlauf des Garnförderprofils ist in erster Linie von der mechanischen Ausgestaltung der Nutentrommel abhängig. Abb. 8 stellt die Garnförderprofile für die 2-gängige symmetrische Nutentrommel dar. Die beiden Garnförderprofile entsprechen somit den theoretischen Geschwindigkeitsverläufen des Garns beim Aufspulprozess bei einer minimalen Spulgeschwindigkeit von 300 m/min und einer maximalen Spulgeschwindigkeit von 2.000 m/min (Abb. 8). Die beiden Profile weisen aufgrund der Nutentrommelgeometrie denselben Verlauf auf. Allerdings ändert sich bei der Variation der Spulgeschwindigkeit die Achsenskalierung der beiden Diagramme. Man kann erkennen, dass die Garngeschwindigkeit eine hohe Dynamik aufweist. Die momentanen Garngeschwindigkeiten liegen bei einer Spulgeschwindigkeit von 300 m/min zwischen 194 m/min und 380 m/min. Bei einer Spulgeschwindigkeit von 2.000 m/min liegen diese zwischen 1.293 m/min und 2.530 m/min, Dies entspricht einem Bereich von +27 % und -35 % der mittleren Geschwindigkeit. Das Garn ist während des Spulprozesses also enormen Beschleunigungen ausgesetzt.

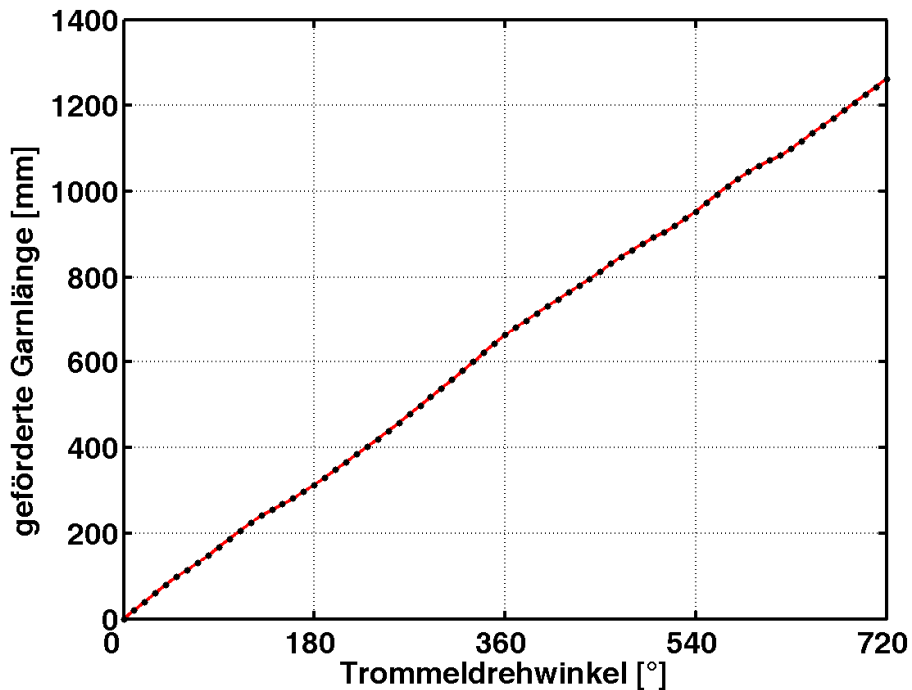


Abb. 6: Geförderte Garnlängen bei einem Doppelhub (4 Trommelumdrehungen)

In den dargestellten Garnförderprofilen sind keine dynamischen Prozesse wie Fadenzugkraft, Dehnung, Fehlführungen usw. berücksichtigt. Diese verursachen weitere Geschwindigkeitsvariationen und erhöhen somit die Signaldynamik zusätzlich. Diese Analyse reicht jedoch aus, um einen Arbeitsbereich des LDA-Sensors festzulegen. Die untere Garngeschwindigkeit liegt bei einer minimalen Spulgeschwindigkeit von 300 m/min bei 194 m/min. Möchte man jedoch den Spulenhochlauf mit erfassen, so ist eine Mindestgeschwindigkeit von 0 m/min wünschenswert. Das Sensorkonzept kann aber aufgrund der geringen anzustrebenden Herstellkosten diese Anforderungen nicht erfüllen, da zusätzliche optische und elektronische Komponenten erforderlich wären. Um diese Problematik zu lösen, soll die Garnlänge während eines vorgegebenen Bereichs des Spulenhochlaufs mit der klassischen TDG-Methode erfolgen. Der so erzielte Fehler ist in Bezug auf eine gesamte Spulenreise klein und es werden keine Zusatzkosten verursacht, da das TDG-Signal fester Bestandteil der Spulstelle ist. Beachtet man eine Reserve für dynamische Fadenzugkraft- und Dehnungsprozesse, so wird die untere zu messende Garngeschwindigkeit auf 100 m/min festgelegt.

Die maximale Spulgeschwindigkeit verursacht im Garnförderprofil maximale Geschwindigkeiten von 2.530 m/min. Beachtet man auch hier eine gewisse Reserve

4 Anforderungen an einen LDA-Sensor für die Spulerei

für die dynamischen Prozesse so muss der Sensor Geschwindigkeiten bis 2.800 m/min erfassen können.

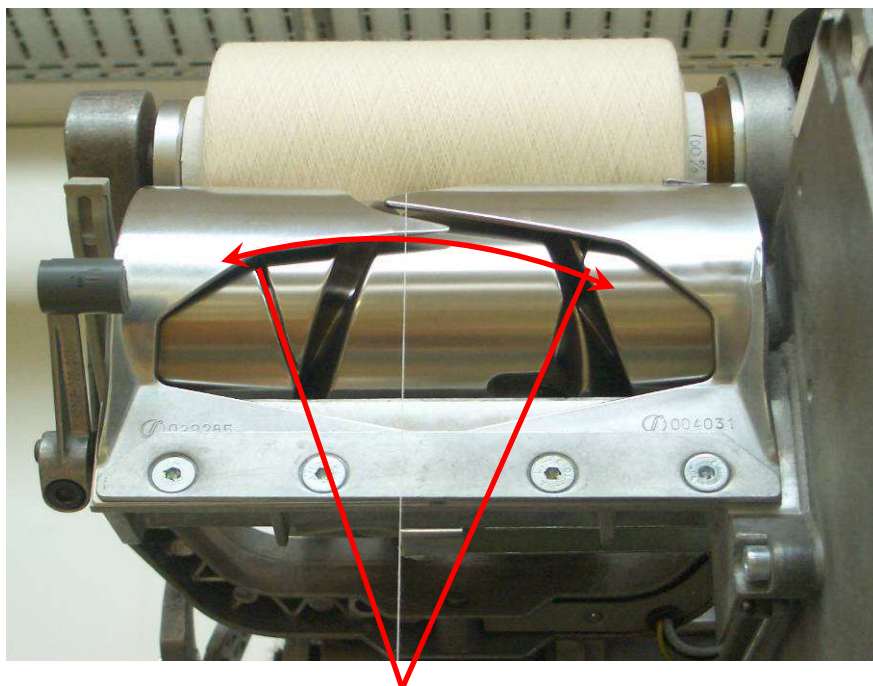


Abb. 7: Garnverlegung durch die Nutentrommel

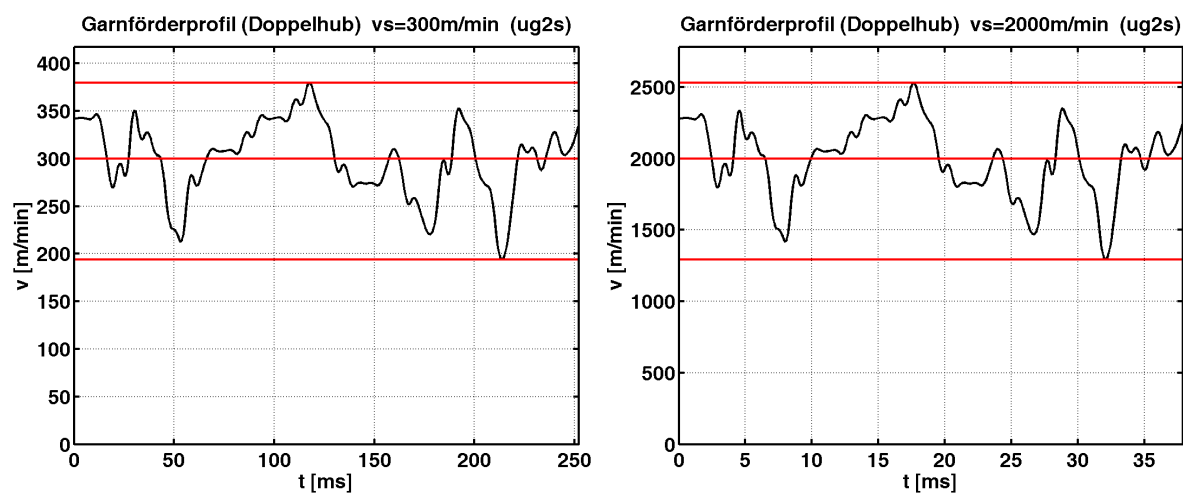


Abb. 8: Garnförderprofil bei einer Spulgeschwindigkeit von 300 m/min (links) und bei 2.000 m/min (rechts)

Eine Frequenzanalyse des Garnförderprofils bei 2.000 m/min Spulgeschwindigkeit ergibt, dass das Signal je Frequenzanteile von mehr als 1,2 kHz enthält (Abb. 9). Bei genauer Betrachtung stellt man fest, dass das Spektrum aus einer Grundfrequenz von 27,5 Hz und aus ganzzahligen Vielfachen dieser Grundfrequenzen besteht. Die Grundfrequenz entspricht der Frequenz eines Doppelhubes. Möchte man den Geschwindigkeitsverlauf messtechnisch erfassen, so ist nach Shannon eine Abtastrate

des Sensorsystems von mindestens 2,4 kHz erforderlich, noch besser ist ein deutlich höherer Wert. Für den LDA Sensor wird eine Abtastrate von mehr als 5 kHz angestrebt.

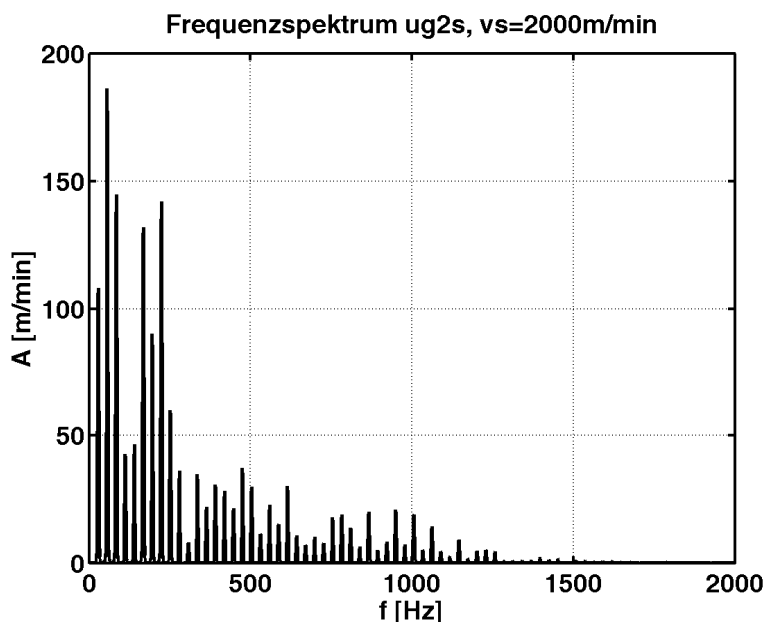


Abb. 9: Fourier-Spektrum bei Spulgeschwindigkeit 2.000 m/min

Hochdynamische Längenmessung zur Reinigeransteuerung

Die Geschwindigkeitsmessung mit dem LDA-Sensor erlaubt eine hochdynamische Längenmessung. Dies erlaubt eine wesentlich verbesserte Längenbewertung von Garnfehlern. Bisher erfolgte die Längenbewertung in einem Reiniger mit Hilfe des Trommeldrehgeber(TDG)-Signals. Dabei dient die Spulgeschwindigkeit als Grundlage der Fehlerlängenbewertung. Wie oben gezeigt wurde, kommt es jedoch zu wesentlichen Abweichungen zwischen Spul- und Garngeschwindigkeit. Um den Fehler bei der Längenbewertung und dessen Auswirkungen genauer untersuchen zu können, muss der LDA-Sensor ein TDG-ähnliches Ausgangssignal erzeugen. Das TDG-Signal ist ein Rechtecksignal mit einer Periodendauer von $1/32$ Umdrehung des Trommelantriebs². Angenommen, die Garngeschwindigkeit wäre zeitlich konstant und der Schlupf zwischen Trommel und Spule vernachlässigbar, so entspricht der Abstand zwischen zwei Flanken des TDG-Signals ca. 5 mm aufgespulter Garnlänge. Wird dem Reiniger anstelle des ungenauen TDG-Signals ein hochdynamisches Längensignal (HDL) Signal eingespeist, dass tatsächlich 5 mm aufgespultem

² Bei Spulstellen der Firma Oerlikon-Schlafhorst.

Garn entspricht, so ist eine deutliche Verbesserung der Längenbewertung von Garnfehlern zu erwarten. Der LDA-Sensor muss also ein HDL-Signal generieren und dieses dem Garnreiniger zuführen.

Einbauposition und Baugröße

Weitere wichtige Kriterien für den Serieneinsatz betreffen die mechanische Ausführungsform des LDA-Sensors. Die beengten Platzverhältnisse in einer Spulstelle erfordern einen äußerst kompakten Aufbau des LDA-Sensors.

Die Spulstellen-Einbaulage sollte so gewählt werden, dass der Garnlauf möglichst ruhig ist. Vorteilhaft ist die Nutzung bereits vorhandener Garnführungselemente. Zusätzliche Garnführer sind unerwünscht, da diese die Fadenzugkraft erhöhen und die Garnqualität verringern.

Größe des Messvolumens

Je ruhiger der Garnlauf ist, desto kleiner kann das Messvolumen des Sensors dimensioniert werden. Ist das Messvolumen zu klein, so kommt es bei unruhigem Lauf zu Signalunterbrechungen und der Geschwindigkeitsverlauf kann nicht lückenlos erfasst werden. Dies wiederum führt zu Fehlern bei der Längenmessung. Eine genaue Analyse des Fadenlaufs und der Einbautoleranzen zwischen Reiniger und Fadenzugkraftsensor ergibt, dass der optimale Durchmesser für das Messvolumen 2 mm beträgt.

Standzeit und Wartung

Eine Spulmaschine läuft üblicherweise mehr als 50.000 Betriebsstunden. Der LDA-Sensor muss so konzipiert sein, dass in dieser Zeit ein zuverlässiger und wartungsarmer Betrieb sichergestellt ist. Bewegliche Komponenten sind zu vermeiden. Etwasige Wartungsarbeiten sollten sich auf das gelegentliche Reinigen der optischen Fenster beschränken.

Übersicht

Die Anforderungen an den LDA-Sensor lassen sich wie in Tab. 3 aufgeführt zusammenfassen. Durch die Erfüllung der hier aufgeführten Kriterien wird es erstmals möglich sein, die momentane Garngeschwindigkeit und -länge in jeder einzelnen Spulstelle hochgenau und hochdynamisch unter wirtschaftlichen Bedingungen berührungslos zu erfassen.

4 Anforderungen an einen LDA-Sensor für die Spulerei

<i>Pos</i>	<i>Anforderung</i>	
1	Längengenauigkeit	$\pm\sigma \leq 0,5 \%$
2	Amortisation der Kosten durch Ausschussverringerung beim Gatterabzug. Maximale Herstellkosten:	Vergleichbar Ecopack-System Oerlikon-Schlafhorst
3	Garnnummernbereich:	Nm 10 – Nm 200
4	Garngeschwindigkeitsbereich:	100 – 2.800 m/min
5	Mindestabtastrate:	5 kHz
6	Reinigeransteuerung mit HDL-Signal zur Verbesserung der Garnfehler-Längenbewertung	Ja
7	Berührungslose Messung: (Nutzung der in der Spulstelle bestehenden Fadenführer)	Ja
8	Optimaler Durchmesser des Messvolumens:	2 mm
9	kompakter Aufbau zum Einbau in eine Spulstelle	
10	Lebensdauer/Betriebsdauer:	> 50.000 h

Tab. 3: Zusammenfassung der Anforderung an einen LDA-Sensor

5 Konzeption und Entwicklung des neuartigen und kostengünstigen LDA-Sensors

Die in Kapitel 4, Tab. 3 gestellten Anforderungen stellen für die Konzeption eines LDA-Sensors zum Einsatz in der Spulerei eine große Herausforderung dar. Um zu verstehen, warum das so ist, ist zunächst ein grundlegendes Verständnis über die Funktionsweise der Laser-Doppler-Anemometrie und der Aufbau eines klassischen Labor-LDA's erforderlich. Diese Thematik wird in Kapitel 5.1 vermittelt.

Die Anwendung der LDA-Technologie am laufenden Garn wird durch ein neuartiges und gleichzeitig besonders kostengünstiges LDA-Sensor-Konzept realisiert. Das neuartige Konzept ist in Kapitel 5.2 beschrieben und führte zu mehreren Patentanmeldungen /106-108/. Der LDA-Sensor kommt mit nur sehr wenigen und einfach aufgebauten optischen Elementen aus. Durch die Wahl eines modernen, kostengünstigen VCSEL-Lasers sind eine hohe Lebensdauer und eine geringe Temperaturabhängigkeit sichergestellt. Die elektronische Signalauswertung erfolgt mit einer kostengünstigen, aber sehr leistungsfähigen Elektronik (FPGA-Technologie). Durch den geringen Platzbedarf der Elektronik und insbesondere der Optik ist die benötigte Baugröße minimal. Erst der Einsatz neuartiger VCSEL-Laser und leistungsfähiger FPGA-Elektronik ermöglichen die Erfüllung aller Anforderungen für den serienmäßigen Einsatz der LDA-Technologie in der Spulerei. Die technische Umsetzung des Konzepts wird detailliert in Kapitel 5.3 erläutert.

5.1 LDA-Grundlagen

Das Grundprinzip der Laser Doppler Anemometrie beruht auf der indirekten Messung der Dopplerverschiebung (Verschiebung der Lichtfrequenz) an bewegten, streuenden Teilchen. Es handelt sich dabei um ein punktorientiertes, berührungsloses, optisches Verfahren aus der Lasermesstechnik. Nachfolgend werden die Signalentstehung und die beiden Hauptverfahren erläutert.

Die nachfolgende Beschreibung der Grundlagen basiert auf den Ausführungen von Rückauer /109/.

Optischer Aufbau und Signalentstehung

Bewegt sich ein Beobachter von einer Lichtquelle weg, vermindert sich aus dessen Sicht die Frequenz des von der Lichtquelle ausgesendeten Lichtes. Die Lichtfarbe wird zum langwelligeren rot verschoben. Läuft der Beobachter auf die Lichtquelle

zu, erhöht sich die vom Beobachter wahrgenommene Frequenz, das Licht wird zum kurzwelligeren blau verschoben. Diese geschwindigkeitsabhängige Frequenzverschiebung heißt Dopplereffekt. Es lassen sich zwei Fälle unterscheiden:

- Bewegter Sender und ruhender Empfänger
- Bewegter Empfänger und ruhender Sender

Bei der LDA kommen beide Fälle zum Einsatz, es findet also eine zweifache Dopplerverschiebung statt. Anhand von Abb. 10 wird der Zusammenhang erläutert.

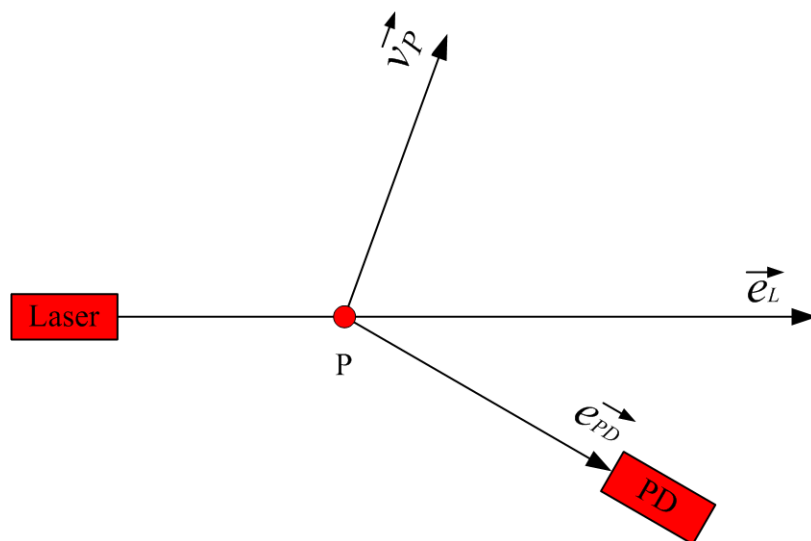


Abb. 10: Schematische Darstellung des zweifachen Dopplereffekts

Im ersten Fall ist die Lichtquelle (Laser) in Ruhe während sich der Empfänger P (der Streupartikel) in Bewegung befindet. Diese Beziehung wird durch Gleichung 5-1 beschrieben, wobei f_P für die Frequenz aus Sicht von P, f_L für die Frequenz der Laserstrahlung, v_P für die Partikelgeschwindigkeit, e_L für den Einheitsvektor der Lichtquelle und c für die Lichtgeschwindigkeit steht.

$$f_P = f_L \left(1 - \frac{\vec{v}_P \cdot \vec{e}_L}{c} \right) \quad 5-1$$

Im zweiten Fall wirken der Partikel P als bewegter Sender und der Detektor PD als ruhender Empfänger, siehe Gleichung 5-2.

$$f_D = f_P \left(1 + \frac{\vec{v}_P \cdot \vec{e}_{PD}}{c} \right) \quad 5-2$$

Der Detektor empfängt also zweifach dopplerverschobenes Streulicht, wie es Gleichung 5-3 verdeutlicht.

$$f_D = f_L \left(1 - \frac{\vec{v}_P \cdot \vec{e}_L}{c} \right) \left(1 + \frac{\vec{v}_P \cdot \vec{e}_{PD}}{c} \right) \quad 5-3$$

Aus Gleichung 5-3 ist ersichtlich, dass die direkte Messung der Dopplerverschiebung schwierig ist, da die zu messende Geschwindigkeit v_P in der Regel sehr klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c ist. Die Dopplerfrequenz liegt demnach im Bereich der Lichtfrequenz (10^{15} Hz) und daher über dem Folgevermögen eines Photodetektors (max. 10^9 Hz).

Um dennoch ein messbares Signal zu erzeugen, wird das so genannte Heterodyning angewendet. Beim Heterodyning werden zwei unterschiedliche elektromagnetische Wellen (E_1 und E_2) gemischt. Dadurch wird die Dopplerverschiebung in ein für den Photodetektor messbaren Frequenzbereich verschoben. Die Funktionsweise ist folgende: Der Photodetektor sieht die Lichtintensität I . I ist direkt proportional zum Betragsquadrat der Summe aus den Feldstärken E der beiden einfallenden elektromagnetischen Wellen E_1 und E_2 (siehe Gleichung 5-4) wobei gilt: $E_i = A_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t)$, $\omega_i = 2\pi f_i$

$$I \propto |E_1 + E_2|^2 \quad 5-4$$

Einsetzen und anwenden eines Produkttheorems ergibt Gleichung 5-5:

$$I \propto A_1^2 \cos^2(\omega_1 \cdot t) + A_2^2 \cos^2(\omega_2 \cdot t) + A_1 A_2 [\cos((\omega_1 - \omega_2) \cdot t) + \cos((\omega_1 + \omega_2) \cdot t)] \quad 5-5$$

Die Überlagerung zweier unterschiedlicher Kreisfrequenzen ergibt zwei weitere Kreisfrequenzen: einmal die Summe und einmal die Differenz von ω_1 und ω_2 . Die ersten beiden Glieder von Gleichung 5-5 liegen im Bereich der Lichtfrequenz und können daher mit dem Photodetektor zeitlich nicht aufgelöst werden. Die zeitlichen Schwankungen werden vom Photodetektor aufintegriert und bilden somit den Gleichanteil. Der 3. Term wird vom Detektor als Wechselsignal erfasst, wobei nur die Differenz $\omega_1 - \omega_2$ der beiden Kreisfrequenzen vom Photodetektor zeitlich aufgelöst werden kann. Die Differenz wird nachfolgend als Messfrequenz f bezeichnet.

Die zentrale Idee bei der LDA-Technik ist die Überlagerung zweier Laserstrahlen f_1 und f_2 unterschiedlicher Frequenz auf einem Photodetektor, wobei mindestens einer der beiden Laserstrahlen dopplerverschoben sein muss. Der Frequenzunterschied wird dabei durch eine Winkeldifferenz θ zwischen den Laserstrahlen erreicht. Die Messfrequenz errechnet sich demnach aus Gleichung 5-6, wobei $\lambda=c/f$ und $\vec{n} = \vec{e}_{L2} - \vec{e}_{L1}$. (Bewegungsrichtung des Partikels steht senkrecht zur mittleren Winkeldifferenz θ)

$$f_D = f_1 - f_2 = f_L \frac{\vec{v}_P (\vec{e}_{L2} - \vec{e}_{L1})}{c} = f_L \frac{2 \sin(\theta/2)}{c} \vec{v}_P \vec{n}$$

5-6

$$f_D = \frac{2v_P \sin(\theta/2)}{\lambda}$$

Folglich ist die am Detektor als Wechselanteil gemessene Frequenz direkt proportional zur Geschwindigkeit und abhängig von der konstanten Laserwellenlänge und dem konstanten Winkel zwischen den Laserstrahlen.

Zweistrahl-Verfahren

Grundsätzlich lassen sich zwei LDA-Verfahren voneinander unterscheiden. Das Referenzstrahl-Verfahren und das Zweistrahl-Verfahren, wobei sich letzteres in der Praxis durchgesetzt hat. Dessen prinzipieller Aufbau ist in Abb. 11 skizziert.

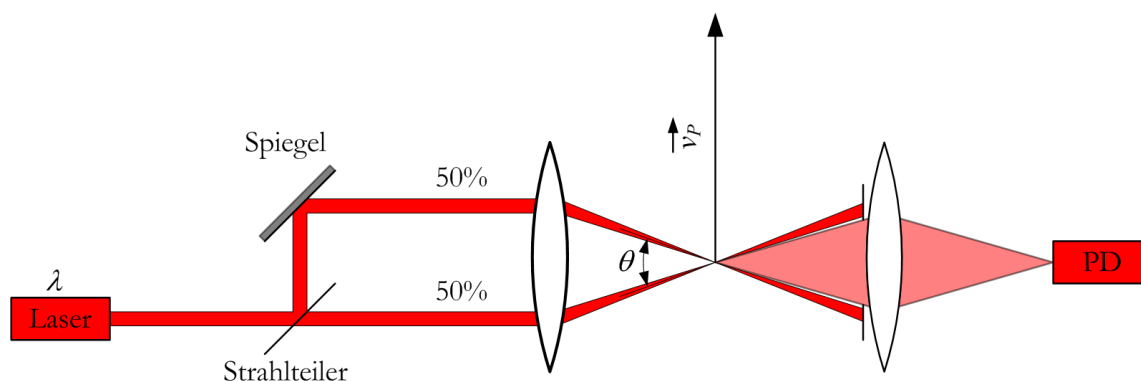


Abb. 11: Prinzipaufbau eines Zweistrahl-LDA

Ein Laserstrahl wird mit Hilfe eines Strahlteilers in zwei parallele Teilstrahlen gleicher Intensität aufgeteilt und mit einer Senderoptik in der Brennebene zur Überlagerung gebracht. Der Schnittpunkt wird als Messvolumen bezeichnet, durch welches die Partikel bewegt werden. Beim Durchflug der Partikel entsteht dopplerverschobenes Streulicht, das durch eine Empfangsoptik auf den Photode-

tektor (PD) geführt wird. Die Teilstrahlen werden zuvor durch Blenden geblockt. Aufgrund des Winkels θ zwischen den fokussierten Laserstrahlen enthält das Streulicht zwei unterschiedliche Dopplerfrequenzen. Der Photodetektor misst durch die Überlagerung (Heterodyning, bzw. Interferenz) die geschwindigkeitsproportionale Schwebungsfrequenz f_D . Da der Photodetektor immer nur die Differenz der dopplerverschobenen Frequenzen sieht, hat die Position des Photodetektors keinen Einfluss auf die Messfrequenz. Daher kann der Detektor auch in sogenannter Rückwärtsstreuung angeordnet werden. Dann bilden Sender- und Empfangsoptik eine Einheit. Dies ermöglicht einen sehr kompakten und justierfreien Aufbau. Da jedoch die Streuleistung in Rückwärtsrichtung sehr gering ist, kommen als Photodetektor nur sehr lichtempfindliche Photomultiplier (s. S. 66) oder Avalanche-Photodioden in Frage.

Referenzstrahl-Verfahren

Beim Referenzstrahlverfahren werden die Teilstrahlen mit unterschiedlicher Intensität aufgeteilt. Üblicherweise liegt das Intensitätsverhältnis der Teilstrahlen im Bereich 95 : 5. Der Strahl mit der geringeren Intensität wird Referenzstrahl genannt und direkt auf den Photodetektor geführt.

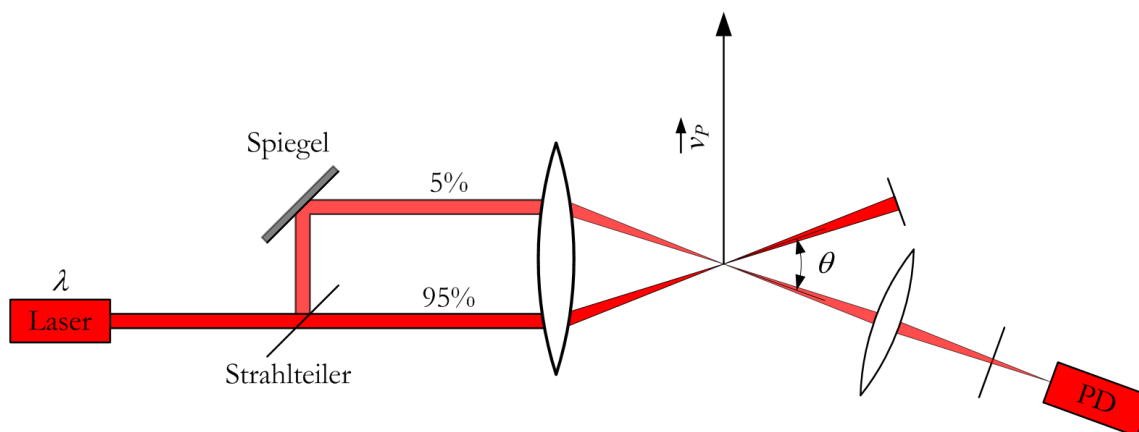


Abb. 12: Prinzipaufbau eines Referenzstrahl LDA

Der intensivere Strahl heißt Messstrahl und dient der Partikelbeleuchtung. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 12 dargestellt. Die Strahlen werden so geführt, dass zwischen den Teilstrahlen ein Winkel θ entsteht. Da der Referenzstrahl direkt auf den Empfänger trifft, findet keine Dopplerverschiebung statt. Das Streulicht vom Messstrahl ist jedoch aufgrund des Winkels zwischen Detektor und Messstrahl dopplerverschoben und interferiert auf der Detektoroberfläche, wodurch die geschwindigkeitsabhängige Schwebungsfrequenz f_D gemessen wird. Vorteil dieser

Anordnung ist, dass die Streuleistung in Empfängerrichtung sehr hoch ist. Daher muss der Empfänger keine hohe Empfindlichkeit aufweisen und ist dementsprechend kostengünstig. Nachteilig ist eine aufwändige Justierung der Empfängerkomponenten auf das Messvolumen.

Signalbearbeitung und –auswertung:

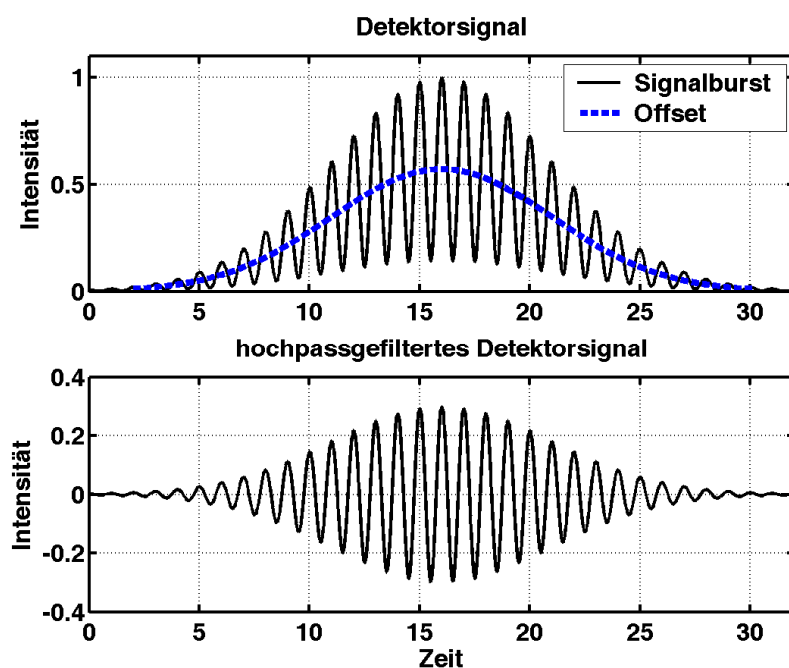


Abb. 13: Ideales Detektorsignal

Die schwarze Linie in Abb. 13 (oben) stellt ein ideales Detektorsignal dar, das bei einem Durchflug eines einzelnen Streupartikels durch das Messvolumen entstehen würde. Dieses Detektorsignal wird auch Signalburst genannt. Der sogenannte Offset (Pedestalfrequenz) ist als gestrichelte Linie eingezeichnet. Er wird durch die Verteilung der Intensität entlang des Laserstrahlquerschnitts verursacht. Beim Durchflug eines Streupartikels durch den Laserstrahl ist die Streulichtintensität proportional zur Laserintensität.

Bei einem Strahlprofil mit normalverteilter Laserintensität folgt der Offset ebenfalls einer Normalverteilung, entsprechend der gestrichelten Linie aus Abb. 13. Für die weitere Signalauswertung ist der Offset störend und wird daher mit einem Hochpassfilter entfernt. Das Resultat ist das Frequenzpaket aus Abb. 13 unten. Die Frequenz entspricht der geschwindigkeitsproportionalen Schwebungsfrequenz f_D .

Die Signalbursts treten zeitlich zufällig auf und können sich je nach Anzahl der Streupartikel im Messvolumen, überlagern. Sie sind variabel in Frequenz, Phase und

Amplitude. Durch Ausfallzeiten zwischen den Bursts, Phasensprüngen und Amplitudenvariationen werden spezielle Verfahren benötigt, um die Schwebungsfrequenz f_D sicher detektieren zu können.

In der Vergangenheit wurden hierzu verschiedene Verfahren entwickelt /59/, wobei an dieser Stelle nur die in der Praxis wichtigsten Verfahren genannt werden:

- Tracker
- Counter
- Spektralanalysator

Der **Tracker** /60/ beinhaltet einen spannungsgeregelten Oszillator (VCO: Voltage Controlled Oscillator), der von der ankommenden Messfrequenz oder der Phase über einen Regelkreis synchronisiert wird. Die VCO-Frequenz stimmt mit der Messfrequenz überein, ist jedoch unterbrechungsfrei, hat eine konstante Amplitude und keine Phasensprünge. Dadurch wird die Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit in einer nachgeschalteten Elektronik erheblich vereinfacht. Der Tracker kann in zwei Bauformen unterteilt werden. Wird der Regelkreis mit der Messfrequenz synchronisiert, so wird das Verfahren „Frequency-locked-loop“ genannt. Wird die Phase des momentan ankommenden Messsignals zur Synchronisation herangezogen, spricht man von „Phased-locked-loop“ oder kurz: PLL. Besonders erwähnenswert ist, dass für Signal-Ausfallzeiten, die bei geringer Streuteilchenkonzentration zwangsläufig auftreten, spezielle Halteschaltungen erforderlich sind, um ein Wegdriften der VCO-Frequenz zu vermeiden. Da das Einregeln auf neue Messfrequenzen eine gewisse Zeit benötigt, ist dieses Verfahren nicht für turbulente Strömungen bzw. nur für Bewegungen mit einer sehr geringen Dynamik geeignet. Außerdem ist ein gutes Signal- zu Rausch-Verhältnis (SNR) für die Funktion des Trackers erforderlich.

Eine rein digitale Auswertung erlaubt das **Counter**-Prinzip /110-112/. Eine spezielle Logik-Schaltung erkennt mittels einem oder mehrerer Schwellwerte Anfang und Ende eines Signالبursts und ermittelt die Dauer einzelner oder mehrerer Perioden mit Hilfe eines schnellen Zählers. Eine Schaltung nach dem Counter-Prinzip kann mit relativ wenig Aufwand realisiert werden, ermöglicht eine Geschwindigkeitsanalyse in Echtzeit und ist für hochdynamische Geschwindigkeitsmessungen geeignet. Nachteilig ist eine besonders hohe Anforderung an die Signalqualität: Für die exakte Bestimmung der Periodendauer ist ein sehr gutes SNR erforderlich.

Die **Spektralanalyse** transformiert das Messsignal mittels Fourier-Transformation intervallweise vom Zeit- in den Frequenzbereich. Die charakteristische Schwingungsfrequenz wird im Frequenzspektrum als Maximalwert angezeigt. Dadurch wird die vom Detektor gemessene Leistung in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Da die Frequenz direkt proportional zur Geschwindigkeit ist, zeigt das Ergebnis alle Geschwindigkeiten, korrespondierend zu ihrer Häufigkeit pro Messintervall, an. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist eine zuverlässige Funktion auch bei schlechtem SNR. In der Vergangenheit benötigte man einen erheblichen Rechenaufwand, so dass keine Echtzeitaufnahmen mit einer Spektralanalyse möglich waren. Mittlerweile ist dies jedoch aufgrund moderner Digitaltechnik möglich.

Typischer Aufbau eines Labor-LDA's

Typische LDA's für Labor-Anwendungen sind relativ aufwändige Geräte. Die Lichtquelle besteht in der Regel aus teuren Gas- oder Festkörperlasern. Der bevorzugte Aufbau ist das Zweistrahl-Verfahren in Rückstreurichtung, bei der Send- und Empfangsweg durch die gleiche Optik geführt werden. Dies vereinfacht zwar die Justierung am Messobjekt wesentlich, allerdings führt dies zu einer komplizierten Optik. Die Optik ist oft in einer externen Sonde untergebracht, die von der restlichen Elektronik und der Laserquelle räumlich getrennt ist. Die optische Verbindung zwischen Laserquelle und Messsonde wird über Glasfaserkabel realisiert.

Um nicht nur den Betrag der Geschwindigkeit zu messen sondern auch deren Richtung wird einer der beiden Laserstrahlen in der Frequenz moduliert. Üblicherweise erfolgt dies mit so genannten akusto-optischen Zellen (Bragg-Zellen). Die Geschwindigkeit Null entspricht der Modulationsfrequenz.

Außerdem besteht die Möglichkeit die Bewegung zwei- (2D) oder dreidimensional (3D) zu erfassen. Die Realisierung des 2D-LDA's findet in der gleichen Messsonde statt wie in der eindimensionalen Variante. Dazu wird ein zweites Strahlenpaar senkrecht zur ersten Strahlenpaarebene erzeugt. Die Kanaltrennung erfolgt entweder über unterschiedliche Polarisation oder Laserwellenlänge. Die 3D-Variante erfolgt über eine separate Messsonde die in einem definierten Winkel zur ersten Messsonde angebracht wird. Die Kanaltrennung erfolgt über eine weitere Laserwellenlänge (Farbtrennung). Wichtig bei der Justierung eines mehrdimensionalen LDA's ist, dass die unterschiedlichen Messvolumina exakt zur Deckung gebracht werden.

Da die Intensität des rückgestreuten Lichts beim Zweistrahlverfahren in Rückstreuung sehr gering und die Frequenz relativ hoch ist, kommt beim Labor-LDA ein Photomultiplier als Detektor zum Einsatz. Hierbei treffen die Photonen auf eine Kathode, wodurch Elektronen frei werden. Durch Anlegen einer Hochspannung werden die Elektronen beschleunigt und treffen auf eine Reihe weiterer Dynoden, wobei bei jeder Stufe mehr Elektronen mitgerissen werden. Die letzte Stufe ist als Anode ausgelegt, bei der die Elektronen zur Masse abfließen. Dieser Strom wird gemessen und dient als Maß für den Photonenfluss.

Die einzelnen Signalbursts werden aus dem Signalverlauf mittels einer Logikschaltung zur Bursterkennung selektiert und über eine leistungsstarke AD-Wandlerkarte in einem PC eingelesen. Die Frequenz jedes einzelnen Bursts wird auf dem PC mittels einer FFT-Berechnung bestimmt. Die Signalauswertung und -darstellung erfolgt ebenfalls auf einem PC.

5.2 LDA-Sensor-Konzept

Im Vergleich zu einem herkömmlichen Labor-LDA ermöglicht die Anwendung der LDA-Technologie am laufenden Garn einen neuartigen optischen Aufbau, der besonders kompakt und mit wenigen Komponenten realisiert werden kann. Die Anforderungen an diese Optik werden wie folgt definiert:

- Eindimensionale Geschwindigkeitsmessung
- Keine Richtungserkennung erforderlich
- Feste Justierung (Garnlauf befindet sich immer an der gleichen Stelle)
- Durchmesser des Messvolumens: 2 mm
- Maximale Bauhöhe: 17 mm inkl. Gehäuse

Die ersten beiden Punkte ermöglichen die Einsparung einer teuren und relativ großen Bragg-Zelle. Die feste Justierung lässt eine Referenzstrahl-Anordnung zu, bei der eine einfache Empfangsoptik verwendet werden kann. Da insbesondere bei der Messung an Garn sehr viel Streulicht in „Vorwärtsrichtung“ auftritt, können kostengünstige Photoempfänger eingesetzt werden.

Der erforderliche große Durchmesser des Messvolumens von 2 mm hat Vor- und Nachteile. Nachteilig ist insbesondere, dass relativ wenig Leistung pro Fläche auf das Garn trifft. Im Vergleich dazu liegt der übliche Durchmesser des Messvolumens bei Labor-LDA's im Sub-Millimeter-Bereich. Somit wird beim LDA-Sensor

weniger Streulichtintensität generiert, wodurch die Modulationstiefe der Messfrequenz auf dem Detektor abnimmt. Dieser Nachteil muss entweder durch mehr Laserleistung oder eine verbesserte Empfänger-Empfindlichkeit kompensiert werden. Vorteilhaft ist jedoch, dass bei dem großen Messvolumen mit einem kollimierten Laserstrahl gearbeitet werden kann. Kollimiert bedeutet, dass der Strahldurchmesser über den gesamten Verlauf den gleichen Durchmesser aufweist. Der Laserstrahl hat eine minimale bzw. beugungsbegrenzte Divergenz. Herkömmliche Labor-LDA's arbeiten immer mit einem fokussierten Messvolumen. Durch die hohe Intensität steht einerseits genügend Streulicht zur Messung der Dopplerfrequenz zur Verfügung. Andererseits ist eine sehr aufwändige Justierung der optischen Bauelemente erforderlich: Zur Vermeidung einer Ortsabhängigkeit der Dopplerfrequenz im Messvolumen müssen die Fokusse beider Strahlen exakt übereinander liegen. Dazu werden bei Labor-LDA's die Strahlteilung und Strahlenlenkung mit unterschiedlichen optischen Komponenten realisiert. Dies erhöht den Platzbedarf und verursacht hohe Kosten. Beim LDA-Sensor entfallen durch den kollimierten Strahl die optischen Elemente zur Fokussierung. Die Strahlteilung und die Strahlumlenkung müssen nicht wie beim Labor-LDA mit verschiedenen Bauteilen realisiert werden. Die gleichzeitige Strahlaufteilung und Strahlumlenkung in nur einem einzigen planoptischen Bauteil lässt sich sehr kostengünstig anwenden und benötigt einen sehr geringen Bauraum. Ein weiterer Vorteil ist die Unempfindlichkeit gegenüber Vibrationen.

Die Strahlkollimierung ist umso besser, je geringer die Strahldivergenz ist. Die geringste Strahldivergenz erreicht man mit einer hohen Strahlqualität. D.h. die Intensität quer zum Strahl muss gaußverteilt sein. Man spricht dann auch von einem transversalen elektromagnetischen Grundmodus (TEM_{00} oder transversal-singlemode). Laser mit einem TEM_{00} -Mode lassen sich besonders gut kollimieren. Dazu zählt beispielsweise der HeNe-Laser. Dieser scheidet jedoch aus Platzgründen für den Einsatz im LDA-Sensor aus. Die geringe Bauhöhe lässt lediglich den Einbau von Diodenlasern zu. Allerdings haben ein Großteil der Diodenlaser, die so genannten Kantenemitter, ein elliptisches Strahlprofil und sind nur mit einer aufwändigen Zylinderoptik zu kollimieren. Hinzu kommen weitere Nachteile wie Temperaturabhängigkeit, Modensprünge und Haltbarkeit. Eine Gruppe von Halbleiterlasern, die Singlemode-VCSEL's, weisen ein kreisförmiges Strahlprofil auf und emittieren Licht im TEM_{00} -Mode. Daher lassen sich diese mit nur einer einzelnen kostengünstigen Kunststoff-Asphäre kollimieren. Diese Art von Laser zeichnet sich

insbesondere durch die Temperaturunempfindlichkeit, eine hohe Kohärenzlänge, die geringen Kosten und die kleine Baugröße aus (siehe Kapitel 5.3.1.1). Single-mode-VCSEL's sind erst seit wenigen Jahren verfügbar, haben jedoch aufgrund der vielen Vorteile schnell Einzug in die Massenproduktion gefunden. So werden beispielsweise optische Laser-Computermäuse millionenfach mit Singlemode-VCSEL betrieben. Nachteilig bei den Singlemode-VCSEL's ist die beschränkte optische Leistung von 1mW.

Erst die Auswahl und die richtige Anordnung der geeigneten optischen Bauteile ermöglichen den serienmäßigen Einsatz des LDA-Sensors.

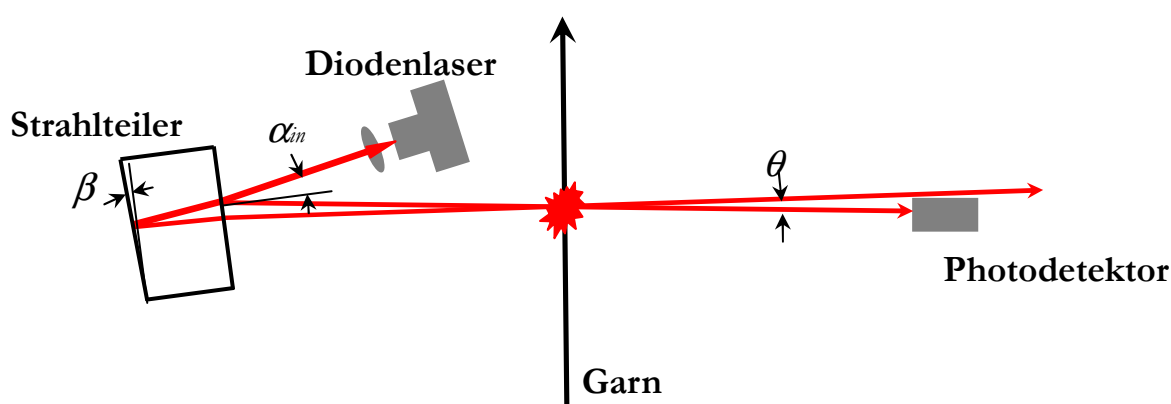


Abb. 14: Optischer Aufbau des LDA-Sensors nach dem Referenz-Strahl-Prinzip

Es wird die in Abb. 14 dargestellte Anordnung gewählt: Der kollimierte Strahl des VCSEL trifft auf ein rückseitig verspiegeltes Keilprisma und wird in zwei Laserstrahlen unterschiedlicher Intensität aufgeteilt. Der hellere der beiden Strahlen bildet den Messstrahl. Der andere, auf den Detektor gerichtete Strahl ist der Referenzstrahl. Das Garn reflektiert überwiegend Licht vom helleren Messstrahl. Bei Bewegung des Garns kommt es zu einer Dopplerverschiebung des reflektierten Lichts. Diese Frequenzverschiebung ist direkt proportional zur Garngeschwindigkeit und abhängig von der Position des Photodetektors.

Die Frequenzverschiebung ist in Relation zur Lichtfrequenz (10^{15} Hz) jedoch zu gering, als dass diese vom Photodetektor direkt erfasst werden kann. Um die Dopplerverschiebung dennoch messen zu können wird der Referenzstrahl durch eine geeignete Strahlteilergeometrie auf den Detektor gerichtet und dort mit dem dopplerverschobenen Streulicht zur Überlagerung gebracht. Die Dopplerfrequenz wird jetzt als Schwebung registriert, die im Bereich weniger MHz liegt. Die Schwebung f_D ist nur noch abhängig vom Winkel θ zwischen den beiden Laserstrahlen,

der Wellenlänge des Lasers λ und der Garngeschwindigkeit v (siehe Gleichung 5-7). Zu beachten ist, dass nur der Betrag der Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum halben Winkel θ erfasst wird.

$$f_D = v \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda} \quad 5-7$$

Die Aufteilung der Laserstrahlen durch das Keilprisma stellt sicher, dass der Winkel zwischen den beiden Laserstrahlen auch bei starken Vibrationen oder Temperaturschwankungen immer konstant ist. Somit ist die gemessene Dopplerfrequenz direkt proportional zur Garngeschwindigkeit und unabhängig von sonstigen Umgebungseinflüssen.

Für die Signalbearbeitung und –auswertung bieten sich das Counter-Verfahren oder der Spektrum-Analyser an. Das Tracker-Verfahren kommt aufgrund der hohen Geschwindigkeitsdynamik beim Spulprozess nicht in Frage. Das Counter-Verfahren hat Vorteile aufgrund der geringen Kosten für die Digitaltechnik. Jedoch muss das Dopplersignal für die digitale Auswertung ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis aufweisen. Dazu ist ein aufwändiger, schmalbandiger, adaptiver Bandpassfilter erforderlich, der die Komplexität des LDA-Sensors erhöhen würde. Die beste Lösung für den LDA-Sensor stellt die Spektralanalyse dar. Die Umsetzung erfolgt mit geringem Aufwand mit Hilfe der modernen FPGA-Technologie. Die hohe Geschwindigkeitsdynamik und ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis stellen für die Spektralanalyse kein Problem dar.

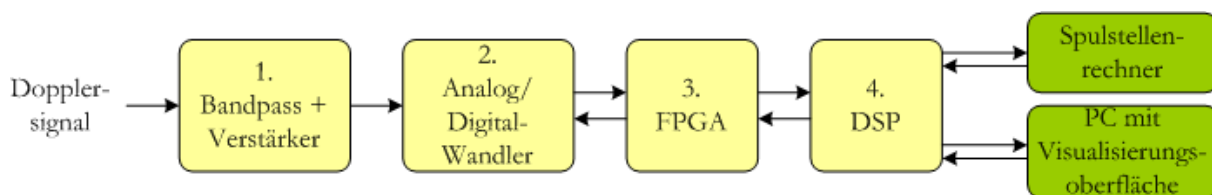


Abb. 15: Blockschaltbild der LDA-Sensor-Elektronik

Das Elektronikkonzept lässt sich wie in Abb. 15 dargestellt zusammenfassen: Das Dopplersignal wird durch einen Transimpedanzwandler und einen Bandpass verstärkt und gefiltert. Anschließend wird das Signal über einen AD-Wandler digitalisiert und mit Hilfe eines FFT-Algorithmus in einem FPGA in den Frequenzbereich transformiert. Aus dem Spektrum wird die momentane Garngeschwindigkeit bestimmt und diese wird einem Digitalen-Signal-Prozessor zugeführt, der die weitere

Signalauswertung übernimmt. Der DSP kommuniziert mit der Spulstelle und optional mit einer Visualisierungsoberfläche.

5.3 LDA-Sensor-Entwicklung

5.3.1 Optik

Nach dem Konzept aus Kapitel 5.2 wurden Prototypen angefertigt. Der optische Aufbau eines Prototyps ist in Abb. 16 dargestellt. Der Strahlenverlauf ist zur Veranschaulichung rot eingezeichnet. Die Funktionsweise wird nachfolgend detailliert beschrieben.

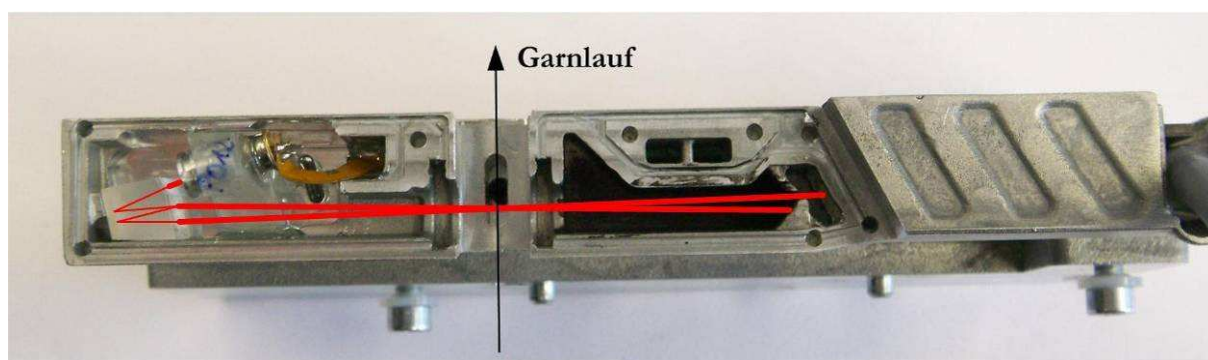


Abb. 16: Vorderansicht des LDA-Sensors mit geöffneter Frontblende. Der Strahlenverlauf ist rot eingezeichnet. Die Bauhöhe beträgt inkl. Gehäuse 17mm.

Für die elektronische Signalaufbereitung ist es vorteilhaft, möglichst geringe Dopplerrfrequenzen zu erzeugen. Mit einer festen Wellenlänge des Lasers und dem durch den Spulprozess vorgegebenen Geschwindigkeitsbereich, hat nur noch der Winkel θ zwischen Mess- und Referenzstrahl einen Einfluss auf die Dopplerrfrequenz. Je kleiner θ gewählt wird, desto geringer wird die Dopplerrfrequenz. Beispielsweise ergibt sich für einen Einfallswinkel des Laserstrahls in das Prisma $\alpha_{in} = 14^\circ$, einer Wellenlänge $\lambda_{VCSEL} = 850 \text{ nm}$ und einem Keilprismawinkel $\beta = 1^\circ$ der Winkel $\theta = 3.06^\circ$. Für eine Garngeschwindigkeit von beispielsweise 1.000 m/min erhält man nach Gleichung 5-7 eine Dopplerrfrequenz von $1047,1 \text{ kHz}$.

Vergleichbar mit dem gewählten Sensoraufbau ist nur das von Drewling entwickelte Konzept /113/. Dort werden ebenfalls mit einem Strahlteiler die Strahlen aufgeteilt und gleichzeitig im Messvolumen zur Überlagerung gebracht. Der wesentliche Unterschied zum hier dargestellten Sensoraufbau besteht jedoch in der Art des Strahlteilers. Im Gegensatz zum Keilprisma wird dort ein so genanntes Köster-Prisma verwendet. Diese Art von Prisma besteht aus zwei rechtwinkligen Dreieck-

prismen, die an ihrer längeren Kathetenfläche verkittet sind. An dieser Verbindungsfläche findet die Strahlteilung statt. Der größte Nachteil sind die hohen Kosten des Köster-Prismas, die auch bei großen Stückzahlen einen wirtschaftlichen Einsatz in der Spulerei ausschließen.

Ein wesentlicher Vorteil des optischen Sensoraufbaus liegt in der fokusfreien Strahlführung. Der Laserstrahl wird unmittelbar nach dem Austritt aus dem Diodenlaser mit einer einfachen Optik kollimiert, das bedeutet man erzeugt einen quasi-parallelen Laserstrahl. Aufgrund der Beugung ist es jedoch nicht möglich, absolut paralleles Licht zu erzeugen. Der Laserstrahl weitet sich in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser und der Wellenlänge mit einem Divergenzwinkel γ auf (Gleichung 5-8). Dies führt zu einer Ortsabhängigkeit der Dopplerfrequenz von der Lage des Garns im Messvolumen /114/.

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{4 \cdot \lambda_{VCSSEL}}{\pi \cdot w}\right) \quad 5-8$$

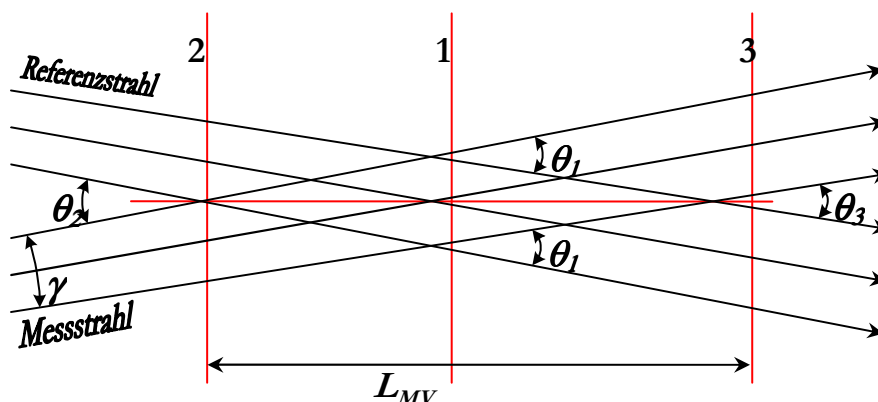


Abb. 17: Ortsabhängigkeit des Winkels θ unter Berücksichtigung der Strahldivergenz γ /114/

Abb. 17 stellt den Referenzstrahl und den Messstrahl dar, die sich im Bereich des Messvolumens überlagern. Beide Strahlen weiten sich von links nach rechts mit dem beugungsbedingten Divergenzwinkel γ auf. Nach /114/ werden 3 Ebenen festgelegt. Ebene 1 ist das Zentrum des Messvolumens und somit die optimale Position für die Führung des Garns. Der Winkel θ_1 entspricht im Fall des LDA-Sensors wie oben hergeleitet $\theta = 3,06^\circ$. Ebene 2 ist der Beginn des Messvolumens. Hier ist der Winkel θ_2 aufgrund der Strahldivergenz γ größer (siehe Gleichung 5-9). Wird das Garn an dieser Position geführt, so erhöht sich die gemessene Doppler-

frequenz f_D nach Gleichung 5-7. Ebene 3 beschreibt das Ende des Messvolumens. θ_2 wird aufgrund der Strahldivergenz γ kleiner (siehe Gleichung 5-10). Die Doppelfrequenz verringert sich entsprechend, wenn das Garn in Ebene 3 geführt wird. Die Länge des Messvolumens L_{MV} ist der Abstand von Ebene 2 bis Ebene 3 und wird mit Gleichung 5-11 berechnet.

Bringt man die relative Veränderung zwischen θ_1 und θ_2 in Bezug zu L_{MV} , so erhält man die prozentuale Ortsabhängigkeit OA des Messvolumens (Gleichung 5-12).

$$\theta_2(w) = \theta_1 + \gamma = \theta_1 + \arcsin\left(\frac{4 \cdot \lambda_{VCSEL}}{\pi \cdot w}\right) \quad 5-9$$

$$\theta_3(w) = \theta_1 - \gamma = \theta_1 - \arcsin\left(\frac{4 \cdot \lambda_{VCSEL}}{\pi \cdot w}\right) \quad 5-10$$

$$L_{MV}(w) \cong 2 \cdot \frac{w}{\sin \theta_1} \quad 5-11$$

$$OA(w) = 100 \cdot \frac{\sin \theta_1}{2 \cdot w} \cdot \left(1 - \frac{\sin \theta_3(w)}{\sin \theta_2(w)}\right) \quad 5-12$$

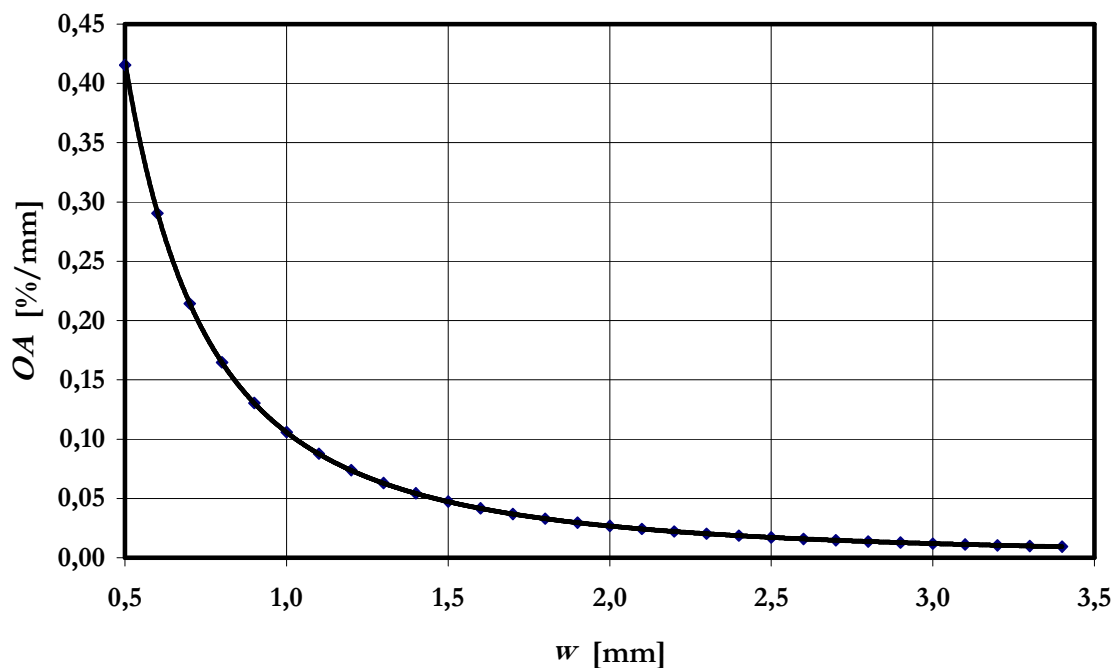


Abb. 18: Ortsabhängigkeit OA als Funktion des Strahldurchmessers w

Abb. 18 stellt die Ortsabhängigkeit in Abhängigkeit des Strahldurchmessers $OA(w)$ für die im LDA-Sensor gewählten Parameter $\lambda_{VCSEL} = 850 \text{ nm}$ und $\theta_1 = 3,06^\circ$ dar.

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass beispielsweise die Ortsabhängigkeit des Messvolumens für einen Strahldurchmesser von 1 mm etwa 0,1 %/mm beträgt. D.h. dass sich die Dopplerfrequenz um 0,1 % verändert, wenn der Garnlauf um 1mm verschoben wird.

Die Wahl des besten Strahldurchmessers wird durch folgende Kriterien festgelegt:

1. Die Ortsabhängigkeit sollte möglichst gering sein.
2. Das Garn muss auch bei einem unruhigen Garnlauf im Messvolumen verbleiben.
3. Es muss genügend Streulicht mit dem Referenzstahl auf dem Detektor interferieren, um eine ausreichende Signalamplitude zu erhalten.

Bezüglich des 1. Kriteriums könnte die Garnposition durch Garnführer reproduzierbar gehalten werden, so dass die Ortsabhängigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Allerdings sind jegliche zusätzliche Garnführer im Spulprozess unerwünscht. Daher sind die Einbautoleranzen in einer Spulmaschine von Spulstelle zu Spulstelle zu betrachten. An einer für den Sensor geeigneten Einbauposition zwischen Reiniger und Fadenzugkraftsensor, ist die Reproduzierbarkeit des Garnlaufs besser als 2mm. Die in Kapitel 4 definierte Längen-Streuung zwischen den einzelnen Spulen schreibt vor, dass die Standardabweichung der aufgespulten Länge kleiner als 0,25 % sein muss. Um den Einfluss der Ortsabhängigkeit gering zu halten, sollte diese kleiner als 0,1 % sein. Der Strahldurchmesser muss also aus Sicht der Ortsabhängigkeit nach Abb. 18 über 1 mm liegen.

Das 2. Kriterium ist ebenfalls abhängig von der Einbauposition des Sensors in der Spulmaschine. Der ruhigste Garnlauf befindet sich in der Nähe des Reinigers. Erfahrungswerte haben gezeigt, dass ein Strahldurchmesser von 2 mm ausreicht um das Garn permanent im Messvolumen zu halten.

Da die im Leistung des im Sensor verwendeten Lasers auf 1 mW begrenzt ist, muss nach dem 3. Kriterium soviel optische Leistung wie möglich auf das Garn gebracht werden, um genügend Streulicht für eine ausreichende Modulationstiefe des Messsignals zu erhalten. Dies gelingt umso besser, je höher die Intensität, bzw. je kleiner der Strahldurchmesser ist.

Resultierend aus obiger Betrachtung und experimentellen Erfahrungswerten liegt der optimale Strahldurchmesser bei 2 mm.

5.3.1.1 Laser

Die Wahl des Lasers ist von entscheidender Bedeutung zur Erfüllung der in Kapitel 4 aufgelisteten Anforderungen. Bezüglich des kompakten Aufbaus, der geringen Kosten und der Langlebigkeit kommen nur spezielle Diodenlaser als Lichtquelle in Frage. Die meisten kostengünstigen Diodenlaser haben jedoch die Eigenschaft die Wellenlänge bei Temperaturänderung sprunghaft zu verändern. Man spricht dann von so genannten „Modensprüngen“. Um eine möglichst konstante Wellenlänge zu halten ist eine aufwändige Temperaturregelung der Diode erforderlich, die die Kosten für das Sensorsystem erhöhen würde. Bei einer speziellen Form von Diodenlasern tritt das Problem der Modensprünge allerdings nicht auf. Hierbei handelt es sich um so genannte oberflächenemittierende Laserdioden mit der Abkürzung VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laserdiode, ausgesprochen: „Vixel“). Hier steht der Resonator³ im Gegensatz zu den „kantenemittierenden“ Laserdioden senkrecht zur Ebene des Halbleiter-Chips. Dadurch kann der Resonator wesentlich kürzer ausgebildet werden, was zum Vorteil hat, dass sich nur eine einzelne Mode ausbilden kann. Dadurch sind Modensprünge und somit sprunghafte Änderungen der Wellenlänge ausgeschlossen. Die Wellenlänge bei der verwendeten 850 nm-VCSEL driftet kontinuierlich mit der Temperatur um 0,06 nm/K. Dieser Drift ist jedoch so gering, dass die Auswirkung auf die Messgenauigkeit vernachlässigt werden kann. Beispielsweise müsste sich die Temperatur um 71 K ändern um einen Messfehler in der Geschwindigkeit von 0,5 % zu erhalten.

VCSEL sind überwiegend im Infrarotbereich erhältlich. Die Wellenlänge des im LDA-Sensor verwendeten Lasers beträgt 850 nm und liegt somit im Bereich der höchsten Empfindlichkeit handelsüblicher Photodetektoren. VCSEL haben für Laser einen hohen Wirkungsgrad. Die elektrische Leistungsaufnahme beträgt bei der eingesetzten Laserdiode 5,2 mW. Die optische Ausgangsleistung liegt dann bei typischerweise maximal 1 mW. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von fast 20 %.

³ Ein Resonator besteht aus zwei sich gegenüberliegenden Spiegeln, die eine Vielfachreflexion ermöglichen. Zwischen den Spiegeln befindet sich ein optisch aktives Medium. Das sich im Medium ausbreitende Licht wird durch stimulierte Emission verstärkt. Überwiegt die Verstärkung die Absorption, tritt ein energiereicher und gerichteter Strahl aus dem Resonator aus. Ein so aufgebautes System wird als Laser bezeichnet

5 Konzeption und Entwicklung des neuartigen und kostengünstigen LDA-Sensors

Durch die geringe Wärmeentwicklung beträgt die Lebensdauer mehr als 100.000 Betriebsstunden.

Durch den kurzen Resonator und die Anregung einer einzelnen Mode sind Single-mode-VCSEL sehr schmalbandig. Dies wiederum hat eine sehr hohe Kohärenzlänge zur Folge. Die Kohärenzlänge beschreibt den maximal zulässigen Wegunterschied den zwei Lichtstrahlen aus einer Quelle haben dürfen, damit bei ihrer Überlagerung noch ein Interferenzmuster entstehen kann. Im Fall des LDA-Sensors bedeutet dies, dass die Strahlen innerhalb des Keilprismas einen gewissen optischen Wegunterschied aufweisen und wegen der großen Kohärenzlänge trotzdem immer noch in Phase sind. Eine hohe Kohärenzlänge ist ebenfalls erforderlich um eine große Modulationstiefe des Messsignals zu erhalten.

Ein weiterer Vorteil der VCSEL ist das runde Strahlprofil. Dieses kommt zustande, weil der Resonator in Multilayertechnologie auf den Wafer aufgebracht wird. Die Resonatorgeometrie kann dadurch kreisförmig ausgebildet werden, man erhält dann ebenfalls ein absolut kreisförmiges Strahlprofil, wodurch wiederum die Kollimieroptik sehr einfach realisiert werden kann. Das runde Profil des kollimierten Laserstrahls ist in Abb. 19 dargestellt.

Aufgrund des senkrecht zur Chip-Ebene stehenden Resonators ist eine schnelle Funktionsprüfung der einzelnen Laser direkt auf dem Halbleitersubstrat möglich. Dadurch verringern sich die Herstellkosten für VCSEL-Laser im Bezug zu anderen Halbleiterlasern wesentlich.

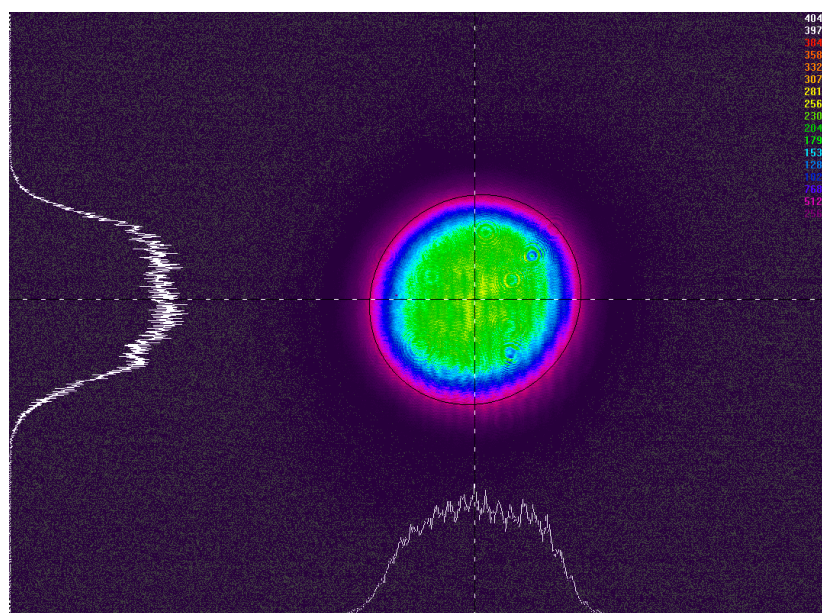


Abb. 19: Rundes Strahlprofil des VCSEL-Lasermoduls

5.3.1.2 Keilprisma

Die Aufteilung der Laserstrahlen erfolgt mit einem Keilprisma. Die Berechnung des Strahlenverlaufs erfolgt durch mehrfache Anwendung des Snelliusschen Brechungsgesetzes (Gleichung 5-13).

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad 5-13$$

Dabei sind n_1 und α_1 Brechungs- und Einfallswinkel des jeweiligen Eingangsstrahls, sowie n_2 und α_2 Brechungs- und Ausfallswinkel des entsprechenden Ausgangsstrahls. Die relative Intensität der Laserstrahlen lassen sich mit mehrfacher Anwendung der Fresnel-Gleichungen bestimmen (Gleichung 5-14 bis 5-17).

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \right)^2 \quad 5-14$$

$$R_p = \left(\frac{n_2 \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_2}{n_2 \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_2} \right)^2 \quad 5-15$$

$$T_s = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} \left(\frac{2n_1 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \right)^2 \quad 5-16$$

$$T_p = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} \left(\frac{2n_1 \cos \alpha_1}{n_2 \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_2} \right)^2 \quad 5-17$$

Die Intensitätsverteilung ist für große Winkel stark polarisationsabhängig. Bei VCSEL-Lasern kann es aufgrund des symmetrischen Resonatoraufbaus zu Polarisationsprüngen kommen. Um den Einfluss der Polarisation möglichst gering zu halten, müssen die Einfallswinkel klein gehalten werden.

In Tab. 4 wird die relative Intensität des Mess- und Referenzstrahls aufgezeigt. Die rückseitige Spiegel-Beschichtung ist in der Berechnung mit einer Reflektivität von 97 % berücksichtigt. Der Keilwinkel β des Prismas beträgt $1,0^\circ$. Die Absorption des BK7-Materials wird vernachlässigt. Es gelten die Brechungsindizes n_L und n_{BK7} . Als Einfallswinkel des Lasers in das Prisma wird $\alpha_{in} = 14^\circ$ gewählt. Die restliche relative Intensität findet sich in einem dritten Teilstrahl und in Vielfachreflexionen im Strahlteiler wieder (In Abb. 14 nicht dargestellt).

Referenzstrahl	Messstrahl
$R_{\text{PRef}} = 89,7 \%$	$T_{\text{PMess}} = 3,8 \%$
$R_{\text{SRef}} = 88,7 \%$	$T_{\text{SMess}} = 4,5 \%$

Tab. 4: Verteilung der Strahlintensitäten auf senkrecht und parallel polarisiertes Licht

Bei Polarisierungssprüngen verändert sich unter den genannten Bedingungen die relative Intensität zwischen T_{PMess} und T_{SMess} um 15 %. Praktische Versuche haben jedoch gezeigt dass diese Intensitätsänderung keinen wesentlichen Einfluss auf die Messfunktion bzw. Messgenauigkeit des Sensors hat.

Aus Tab. 4 ist ersichtlich, dass die für das Referenzstrahlverfahren notwendige Aufteilung der Intensitäten der beiden Teilstrahlen im Verhältnis von ca. 90 : 4 stehen. Dies wird durch die Kombination aus rückseitiger Beschichtung und Anwendung der Fresnel-Gleichungen mit entsprechender Wahl des Keilprisma- und Einfallswinkels erreicht. Die Anpassung der Strahlintensitäten erfolgt dadurch ohne die sonst für das Referenzstrahlverfahren notwendigen optischen Komponenten wie z.B. Abschwächer.

Weitere Vorteile des Strahlteilers in Ausführungsform als Keilprisma sind:

- Leicht und kostengünstig zu fertigende Planoptik aus optischem BK7-Standardglas.
- Die Keilwinkel lassen sich mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand und sehr hoher Präzision im Winkelsekundenbereich fertigen.
- Die rückseitige Spiegelbeschichtung lässt sich mit einer sowohl kostengünstigen als auch hochwertigen Silberschicht realisieren.

5.3.1.3 Empfangsoptik

Die Anforderungen für die Empfangsoptik lassen sich im Wesentlichen durch die zu erwartende optische Lichtleistung, die Modulationstiefe und den Frequenzbereich des Dopplersignals herleiten.

Der Frequenzbereich lässt sich sehr einfach durch Anwendung von Gleichung 5-7 bestimmen. Für einen Geschwindigkeitsbereich von 100 m/min bis maximal 2.800 m/min ergibt sich ein Frequenzbereich von ca. 0,1 MHz bis 2,8 MHz.

Der Photoempfänger wird permanent durch den Referenzstrahl beleuchtet. Die Intensität liegt demnach im Bereich von 0,04 mW (Laserleistung 1 mW. Relative Intensität des Referenzstrahls 4 %).

Aufgrund unterschiedlicher optischer Eigenschaften des Garns (Farbe, Haarigkeit, Durchmesser) lassen sich die Modulationstiefe und optische Lichtleistung des Streulichts am besten messtechnisch erfassen. Dazu wird das elektrische Signal mit den bekannten Parametern der Empfangsoptik und Verstärkertechnik zurückgerechnet. Die Lichtleistung des Streulichts beträgt im Mittel ca. 0,02 mW. Die Modulationstiefe schwankt vor allem aufgrund der makroskopischen Garnstruktur und der Haarigkeit sehr stark. Sie beträgt im Mittel zwischen 10 nW und einigen 100 nW.

Bei der LDA-Technik kommen in der Regel Photomultiplier oder Avalanche-Photodioden zum Einsatz. Photomultiplier haben den Nachteil, dass sie vergleichsweise teuer sind. Hinzu kommt, dass diese bei der gewählten Anordnung durch die permanente Beleuchtung mit dem Referenzstrahl nicht betrieben werden können. Abgesehen von den Kosten, würden Avalanche-Photodioden prinzipiell für diese Anwendung in Frage kommen, allerdings benötigen diese zum Betrieb eine Hochspannung von ca. 100 V, die einen schaltungstechnischen Mehraufwand und damit weitere Zusatzkosten verursachen würden.

Für den beschriebenen Arbeitsbereich sind schnelle PIN-Photodioden auf Siliziumbasis vorzuziehen. Diese haben durch eine geringe Sperrschichtkapazität (wenige pF) sehr schnelle Schaltzeiten. Hinzu kommt eine hohe spektrale Empfindlichkeit bei 850 nm und relativ geringes Rauschen. Vorteilhaft ist eine Gehäuseform mit integrierter Linse, wodurch eine große optische aktive Fläche bei kleinem Chipdurchmesser erzielt wird.

5.3.2 Elektronik

Die gesamte Elektronik (Abb. 20) ist auf einer Platine platziert, die zusammen mit der Optik in einem kompakten Gehäuse untergebracht ist. Die Sensorelektronik besteht im Wesentlichen aus 4 wesentlichen Modulen (Abb. 15), die im Folgenden erläutert werden:

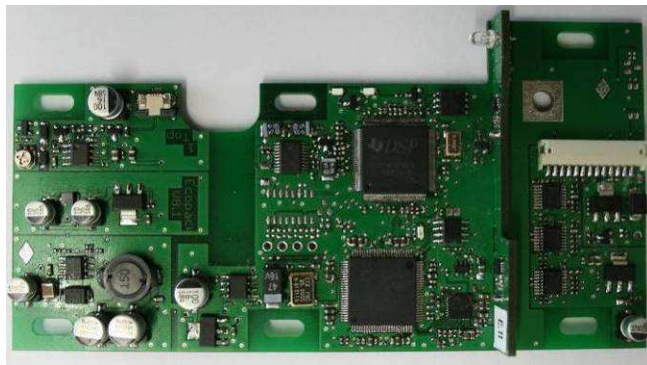


Abb. 20: Sensorelektronik mit FPGA und DSP

1. Bandpass + Verstärker

Das von der Photodiode kommende Dopplersignal besteht zum einen aus der zu messenden, geschwindigkeitsproportionalen Dopplerfrequenz f_D . Zum anderen beinhaltet das Signal aber auch zwei Störgrößen: einen nicht zu vernachlässigenden Rauschanteil, sowie den so genannten niederfrequenten Offset, der im Wesentlichen durch unregelmäßige Helligkeitsschwankungen des Streulichts verursacht wird. Beide Störgrößen müssen soweit unterdrückt werden, bis eine sichere Messung der Dopplerfrequenz gegeben ist bzw. bis das Signal-Rauschverhältnis groß genug ist. Die Grenzfrequenzen des Bandpasses werden so gewählt, dass nur Frequenzen zwischen 100 kHz und 2,8 MHz. durchgelassen werden. Diese entsprechen einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 100 m/min und 2.800 m/min. Die Filterung von Frequenzen oberhalb von 2,8 MHz ist notwendig, um hochfrequentes Rauschen zu unterdrücken. Die Beschränkung der niedrigen Frequenzen dient der Unterdrückung des Offsets. Der aktive Bandpass ist gleichzeitig als Verstärker ausgelegt. Dies ist notwendig, um die kleine Amplitude der Dopplerfrequenz auf den Eingangsbereich des 2. Moduls - dem Analog/Digital- Wandler - zu skalieren.

2. Analog/Digital-Wandler

Der 10 bit Analog/Digital-Wandler tastet das Analogsignal mit 10 MHz ab und übergibt die entsprechenden Digitalwerte zur Spektralanalyse an das 3. Modul.

3. **FPGA**

Der FPGA (Field Programmable Gate Array) ist ein frei programmierbarer Logikbaustein. In dieser Applikation wird die interne Logik zu einem FFT-Algorithmus konfiguriert. D.h. das A/D-Wandler-Signal wird abschnittsweise vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Ein Abschnitt beträgt 1.024 Wandlerwerte. Die Taktung des FPGA's beträgt 10 MHz. D.h. es findet alle 0,1024 ms eine Fourier-Transformation statt. Aus jedem Fourier-Spektrum wird eine Maximalwertbestimmung gestartet. Liegt ein gültiger Signalebene im Zeitbereich vor, so findet der Algorithmus ein entsprechendes Maximum im Fourier-Spektrum. Das Resultat ist die gesuchte Dopplerfrequenz. Die maximale Abtastrate des LDA-Sensors beträgt demnach $1/0,1024 \text{ ms} = 9,766 \text{ kHz}$. Die Dopplerfrequenz wird über eine bidirektionale Schnittstelle dem 4. Modul - einem Digitalen Signalprozessor - zugeführt.

4. **DSP**

Der Digitale-Signal-Prozessor hat mehrere Aufgaben. U. a. steuert dieser die Signalanalyse und übernimmt die Kommunikation mit dem Spulstellenrechner und einem optionalen Visualisierungssystem. Nachfolgend werden die wichtigsten Aufgaben erläutert:

- Umrechnung der vom FPGA übermittelten Frequenz in ein Geschwindigkeitssignal.
- Zeitliche Integration des Geschwindigkeitssignals in die aufgespulte Garmlänge.
- Analyse des Geschwindigkeitssignals zur Prozesskontrolle. Abweichungen vom Geschwindigkeits-Sollverlauf deuten meist auf prozessbedingte Anomalien hin. Auf diesen Punkt wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.
- Kommunikation mit der Spulstelle über einen bidirektionalen Bus. Der Sensor übermittelt der Spulstelle die absolute Länge und diverse Parameter. Die Spulstelle übermittelt dem Sensor ein Freigabesignal zur Steuerung der Längenberechnung.
- Der DSP empfängt die momentane Spulgeschwindigkeit über den Drehgeber des Trommelantriebs (TDG-Signal). Mit Hilfe des TDG-Signals ist eine Plausibilitätskontrolle der mittleren Garngeschwindigkeit möglich. Das TDG-Signal wird gleichzeitig vom Reiniger genutzt, um die Fehlerlängenbewertung durchzuführen.

- Der DSP berechnet ein hochdynamisches Längensignals (HDL) zur exakten Längenbewertung von Garnfehlern. Bei dem HDL-Signal handelt es sich um ein Digitalsignal, bei dem alle 5 mm Garmlänge ein Flankenwechsel stattfindet. Das HDL-Signal kann zur Reinigeransteuerung verwendet werden und dort die Fehlerlängenbewertung verbessern (Kapitel 7.2).
- Der DSP kommuniziert mit einer PC-basierten Visualisierungssoftware mithilfe eines zweiten bidirektionalen Busses. Die Kommunikation erfolgt zunächst über den sogenannten CAN-Bus. Über ein CAN/Ethernet Interface und einem nachgeschalteten Hub erfolgt die PC-Anbindung. Diese Konfiguration ermöglicht die gleichzeitige Anbindung mehrerer Sensoren in einem Netzwerk. Die momentane Garngeschwindigkeit wird mit einer Abtastrate von 1 kHz online auf der Oberfläche dargestellt. Die tatsächliche Abtastrate des Sensorsystems ist üblicherweise größer als 1 kHz. Aufgrund der verwendeten Schnittstelle ist jedoch nur eine Datenübertragung von 1 kHz möglich. Der Geschwindigkeitsverlauf wird auf dem Visualisierungssystem demnach nur gemittelt wiedergegeben. Zusätzlich werden zahlreiche wichtige Parameter und Messwerte (z.B. die momentan aufgespulte Garmlänge) angezeigt. Die Oberfläche ermöglicht es außerdem zahlreiche Einstellungen im DSP und FPGA online zu verändern. Alle Parameter, Einstellungen, Messwerte sowie der Geschwindigkeitsverlauf können über einen beliebig langen Zeitraum aufgezeichnet und Offline analysiert werden.

6 Verfahrensabsicherung

Nachfolgend wird beschrieben, dass die Funktionalität des LDA-Sensors anhand von Vergleichsmessungen mit einem Referenzsystem nachgewiesen wird. Als Referenz wird ein Labor-LDA der Firma Dantec gewählt. Die Vergleichsmessungen werden im Spulprozess unter Produktionsbedingungen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Die Messungen finden zur bestmöglichen Vergleichbarkeit gleichzeitig mit dem LDA-Sensor und dem Labor-LDA statt.

Aus den Ergebnissen (siehe Kapitel 6.3) resultiert, dass die mit dem LDA-Sensor gemessenen Geschwindigkeiten mit denen des Labor-LDA's übereinstimmen. Das bedeutet, dass mit dem LDA-Sensor die gleichen Resultate erzeugt werden, wie mit einem professionellen und wesentlich aufwändigeren Labor-LDA.

Die Durchführung der Vergleichsmessungen wurde veröffentlicht /117/.

6.1 Aufgabenstellung

Um sicherzustellen, dass der LDA-Sensor den korrekten Geschwindigkeitsverlauf erfasst, ist folgende Vorgehensweise sinnvoll:

1. Überprüfung des in Kapitel 4 beschriebenen Garnförderprofils mit einem professionellen Labor-LDA
2. Gleichzeitige Messung und Analyse des Geschwindigkeitsverlauf mit einem Labor-LDA und dem LDA-Sensor
3. Variation verschiedener Parameter wie Garn aus verschiedenen Rohstoffen, Garnnummer, Geschwindigkeit, Fadenzugkraft und Bildstörung, bei gleichzeitiger Messung mit Labor-LDA und LDA-Sensor.

Zuerst muss sichergestellt werden, dass der zu erwartende Geschwindigkeitsverlauf tatsächlich mit der LDA-Technologie erfasst werden kann. Zu diesem Zweck werden Messungen mit einem Labor-LDA der Firma Dantec durchgeführt.

Wenn das Garnförderprofil erfolgreich mit dem Labor-LDA gemessen werden kann, so ist das Labor-LDA als Referenzsystem für den LDA-Sensor anzusehen. Daraufhin werden zeitlich parallel laufende Vergleichsmessungen durchgeführt, um herauszufinden, ob der LDA-Sensor vergleichbare Ergebnisse wie das Labor-LDA liefert. Dabei sind folgende Schwerpunkte zur Verfahrensabsicherung vorgesehen:

Bildstörung: Die Bildstörung ist ein Verfahren zur Unterdrückung von so genannten „Bildern“ auf der Spulenoberfläche. Wenn das Garn bei der Ablage auf der Spulenoberfläche immer auf der gleichen Stelle aufgespult wird, kommt es durch vermehrte Ansammlung von Garn an einer Stelle zu „Bildern“, die sich beim späteren Weiterverarbeitungsprozessen der Spule negativ auf das Abzugsverhalten auswirken. Bilder treten immer dann auf, wenn der Spulendurchmesser in einem vielfachen oder einem gebrochen vielfachen Verhältnis zum Trommeldurchmesser stehen. Um Bilder zu vermeiden, wird beispielsweise durch zyklische Beschleunigung des Spulenantriebs ein kontrollierter Schlupf zwischen Spule und Trommel erzeugt, wodurch die Garnablage auf der Spulenoberfläche versetzt wird. Es ist zu prüfen, ob der LDA-Sensor die Bildstörung im Geschwindigkeitsverlauf erfassen kann.

Spulgeschwindigkeit: Arbeitet der LDA-Sensor bei allen gängigen Spulgeschwindigkeiten zuverlässig und werden die Geschwindigkeitsverläufe richtig dargestellt?

Garn aus unterschiedlichen Rohstoffen: Der Einsatz eines LDA-Sensors in der Produktion macht nur Sinn, wenn eine breite Palette an Materialien erfasst wird. Kann der LDA-Sensor die Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Garnrohstoffen und Farben richtig bestimmen?

Garnnummer: Generieren sehr feine Garne für eine Geschwindigkeitsmessung mit dem LDA-Sensor genügend Streulicht? Ist der Referenzstrahl des LDA-Sensors breit genug, um nicht durch zu grobe Garne vollständig abgedeckt zu werden?

Zugkraft: Es soll untersucht werden, welchen Einfluss die Zugkraft auf den Geschwindigkeitsverlauf hat. Wie verändert sich der Geschwindigkeitsverlauf mit zunehmender Fadenzugkraft? Welche Beschleunigungen wirken auf das Garn? Ist die Abtastrate des LDA-Sensors ausreichend, um die auftretenden Beschleunigungen richtig zu erfassen?

6.2 Durchführung

Es muss geprüft werden, ob der LDA-Sensor tatsächlich die richtige Garngeschwindigkeit misst. Professionelle Labor-LDA-Geräte sind in der Messtechnik als hochgenaue Referenz-Messsysteme etabliert. Ob sich das Labor-LDA auch als hochgenaues Referenzsystem zur Messung der der Garngeschwindigkeit in einer Spulstelle eignet, wird durch einen Vergleich der Messergebnisse mit dem in Kapitel 4 erwähnten Garnförderprofil geprüft. Wenn im darauf folgenden Schritt der

LDA-Sensor in allen Fällen (unterschiedliche Zugkräfte, Rohstoffe usw.) die gleichen Messergebnisse liefert, wie das Labor-LDA, wird davon ausgegangen, dass der LDA-Sensor exakte Messwerte liefert.

Als Labor-LDA wird ein Zweistrahl-LDA der Firma Dantec mit einem 10 mW-Helium-Neon-Laser gewählt. Die Funktionsweise des Labor-LDA's wird in Kapitel 5.1 beschrieben. Die erzielte Abtastrate beim Labor-LDA ist abhängig von der Justierung, und der Eigenschaft des zu messenden Materials und liegt bei Messungen am laufenden Garn typischerweise im Bereich zwischen 10 und 50 kHz.

Trotz der unterschiedlichen physikalischen Ausführungsform (Referenzstrahlverfahren in Gegensatz zum Zwei-Strahl-Verfahren) messen beide Methoden die Dopplerfrequenz f_D nach Gleichung 5-7. Aufgrund der kürzeren Wellenlänge und des größeren Winkels zwischen den beiden Teilstrahlen sind beim Zwei-Strahl-Verfahren wesentlich höhere Dopplerfrequenzen als beim LDA-Sensor zu erwarten.

Versuchsaufbau:

Sämtliche Versuche werden an einer Spulstelle Autoconer 338 der Firma Schlafhorst durchgeführt. Der LDA-Sensor befindet sich zwischen Fadenzugkraftsensor und Reinigermesskopf, da der Garnlauf dort am ruhigsten ist. So ist sichergestellt, dass das Garn das Messvolumen des LDA-Sensors nicht verlässt.

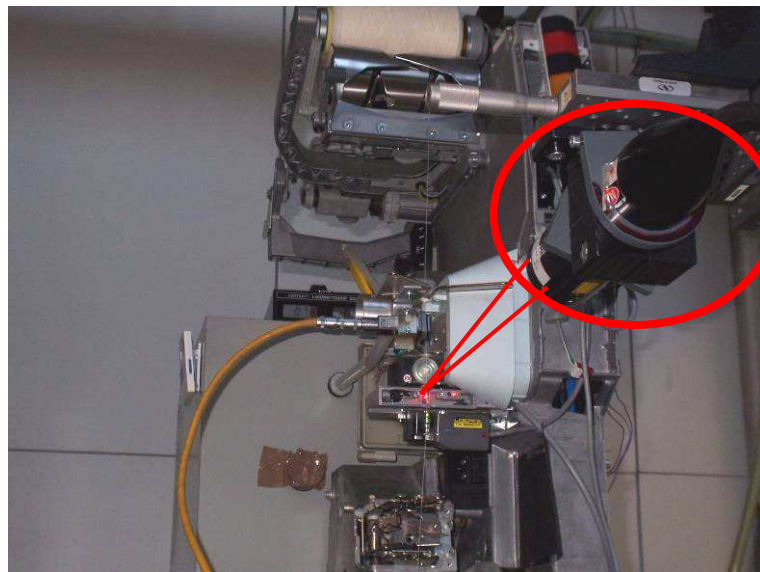
Zwischen Garnführelementen und Klemmpunkten in der Spulmaschine können sich längs des Garns aufgrund von Garndehnung und Zugkraftmechanismen Longitudinalschwingungen ausbreiten, die sich in den Geschwindigkeitssignalen der LDA-Systeme bemerkbar machen. Um auszuschließen dass das Labor-LDA und der LDA-Sensor unterschiedliche Bedingungen sehen, wurden die Messpunkte beider Systeme in unmittelbare Nähe zueinander gebracht. Daher befindet sich das Messvolumen des Labor-LDA's innerhalb des LDA-Sensor-Gehäuses ca. 5 mm oberhalb des Messvolumens des LDA-Sensors. (siehe Abb. 21 und Abb. 22)

Signalanpassung:

Die Abtastrate beider LDA-Systeme hängt grundsätzlich von der Signalqualität ab. Die Signalqualität wiederum ist u. a. abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Garns und beim Labor LDA zusätzlich von der Justierung des Messvolumens. Sehr glattes Garn führt zu verringertem Streulicht, es werden weniger Bursts generiert und die Abtastrate sinkt. Der LDA-Sensor kann maximal 9,766 Messwert pro

6 Verfahrensabsicherung

Millisekunde erfassen. (10 MHz-Taktung des A/D-Wandlers geteilt durch 1.024 Wandlerwerte pro FFT-Zyklus). Die Abtastrate sinkt, wenn im Messsignal kein gültiger Burst vorhanden ist. Auf dem Visualisierungssystem können aufgrund der verwendeten Schnittstelle maximal 1 Messwert pro Millisekunde dargestellt und gespeichert werden. Liegen pro ms mehrere Messwerte vor, so werden diese gemittelt. Die Visualisierungsoberfläche zeigt demnach den gemittelten Geschwindigkeitsverlauf mit einer Abtastrate von 1 kHz an.



**Messsonde
Labor-LDA**

Abb. 21: Labor-LDA misst die Garngeschwindigkeit in einer Spulstelle

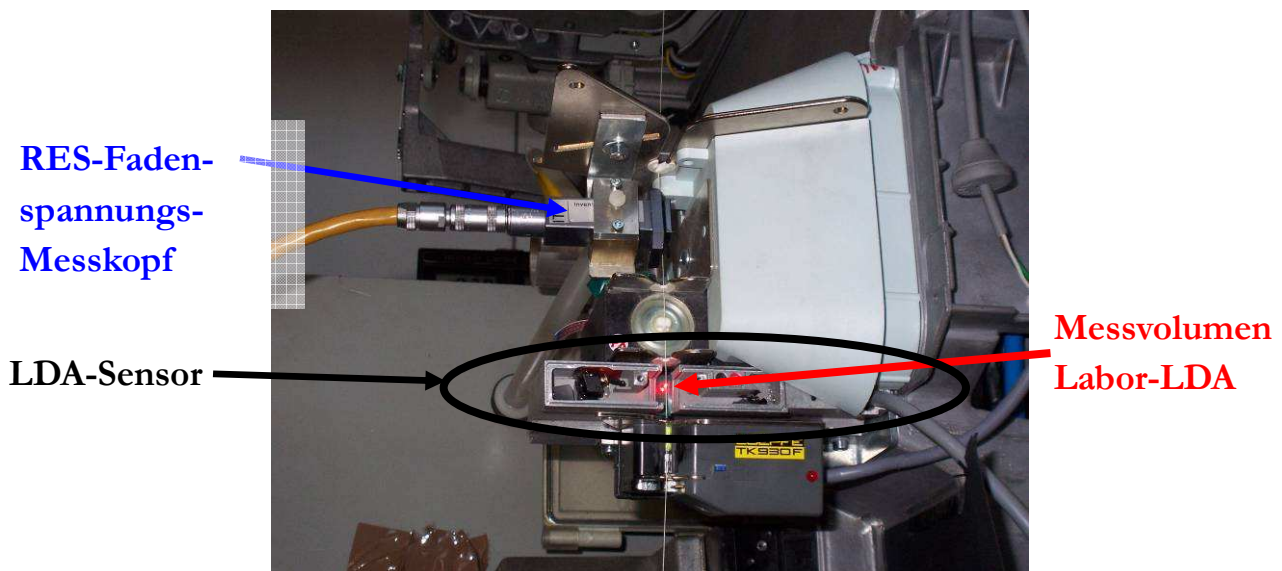


Abb. 22: LDA-Sensor und das Messvolumen des Labor-LDA's

Die Signalerfassung beim Labor-LDA unterscheidet sich von der des LDA-Sensors grundlegend. Beim Labor-LDA wird eine A/D-Wandlung erst dann gestartet, wenn

ein gültiger Burst erkannt worden ist. Das zeitliche Auftreten eines Burst-Signals ist zufällig und kann daher nicht vorhergesagt werden. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wird der Burst-Zeitpunkt für die spätere Auswertung gespeichert. Anschließend erfolgt eine Fourier-Transformation des Burst-Signals, aus dessen Ergebnis wiederum die Frequenz mit dem höchsten Anteil bestimmt wird. Aus dieser Frequenz wird der entsprechende Geschwindigkeitswert berechnet. Der Geschwindigkeitswert wird mit dem zugehörigen Burst-Zeitpunkt verknüpft. Man erhält also ein Wertepaar aus Geschwindigkeit und Zeitpunkt. Die Messwerte beim Labor-LDA sind also zeitlich zufällig verteilt. Die auf der Visualisierungsoberfläche angezeigten Messergebnisse des LDA-Sensors sind jedoch zeitäquidistant (ein Messwert für jede Millisekunde).

Um die Vergleichbarkeit der beiden Systeme sicherzustellen, ist für die weitere Analyse eine Umrechnung erforderlich, bei der die zeitlich zufällig verteilten Messwerte des Labor-LDA's in eine zeitlich äquidistante Messreihe umgewandelt werden. Die Umrechnung des Labor-LDA-Signals besteht aus folgenden Schritten:

1. Interpolation des Original-Signalverlaufs
2. Downsampling des interpolierten Signals auf die gewünschter Abtastrate

Beide Umwandlungsschritte werden in der MATLAB®-Funktion „pchip“ (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) zusammengefasst. Die Auswirkung auf den Original-Signalverlauf sind in Abb. 23 bis Abb. 25 für unterschiedliche Abtastraten dargestellt. Die Abbildungen zeigen jeweils einen Ausschnitt aus einem Signalverlauf von 20 s mit einer mittleren Geschwindigkeit von 850 m/min und einer Fadenzugkraft von 12 cN. Mit abnehmender Abtastrate nimmt die Signaldynamik ab. Eine Verringerung der Abtastrate hat also eine Tiefpasscharakteristik, bei der hohe Frequenzen stärker gedämpft werden. Für die weitere Analyse der Labor-LDA-Geschwindigkeitssignale wurde eine Abtastrate von 10 kHz gewählt.

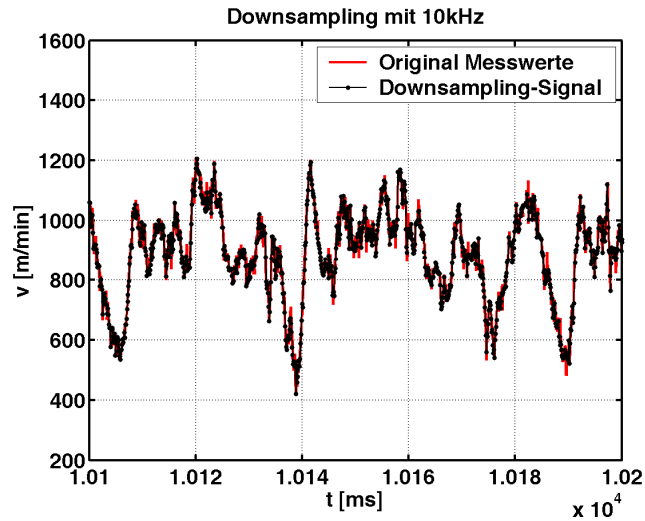


Abb. 23: 10 kHz-Abtastung des Geschwindigkeitsverlaufs mit dem Labor-LDA

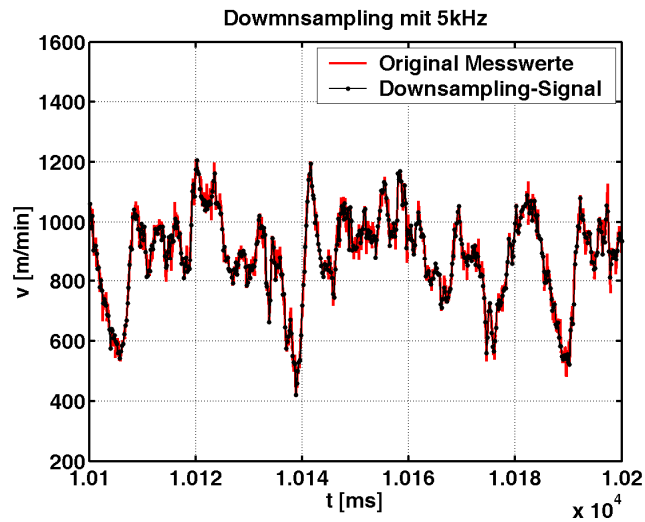


Abb. 24: 5 kHz-Abtastung des Geschwindigkeitsverlaufs mit dem Labor-LDA

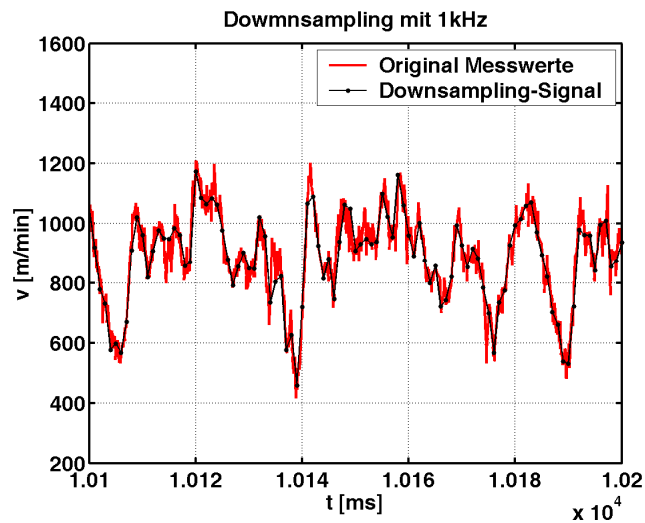


Abb. 25: 1 kHz-Abtastung des Geschwindigkeitsverlaufs mit dem Labor-LDA

Synchronisation der Geschwindigkeitssignale

Eine Messung dauert bei beiden LDA-Systemen 20 s. Da die Messsysteme unabhängig voneinander arbeiten, besteht keine Möglichkeit die Messwerterfassung elektronisch zu synchronisieren. Daher wird im Geschwindigkeitssignal ein signifikantes Trigger-Ereignis erzeugt: Kurz vor Ende der Messung wird das Garn geschnitten, wodurch der Spulprozess abrupt beendet ist. Dieses Trigger-Ereignis ist im Geschwindigkeitsverlauf deutlich sichtbar. Werden die Signale beider LDA-Systeme mittels der Korrelationsfunktion zeitlich übereinander geschoben, so gibt es für einen Verschiebungs-Zeitpunkt ein Maximum in der Ähnlichkeit beider Signale. Dieses Korrelations-Maximum wird durch das Trigger-Ereignis deutlich hervorgehoben.

Abb. 26 stellt das Ergebnis der Korrelationsberechnung dar. Ein deutliches Maximum liegt bei einer Verschiebung von 1.344 ms vor. In Abb. 27 ist das Labor-LDA-Signal um diese zeitliche Verschiebung nach links versetzt worden, so dass beide Signale zur Deckung kommen. Der Vergleich zwischen Labor-LDA und LDA-Sensor zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung. Man kann erkennen, dass beide Systeme unabhängig voneinander den gleichen Geschwindigkeitsverlauf messen. Zu beachten ist, dass das Signal des Labor-LDA's eine höhere Dynamik aufweist, da dieses auf 10 kHz abgetastet wurde. Das LDA-Sensor-Signal zeigt eine geringere Dynamik, da die Abtastrate des Visualisierungssystems 1 kHz beträgt.

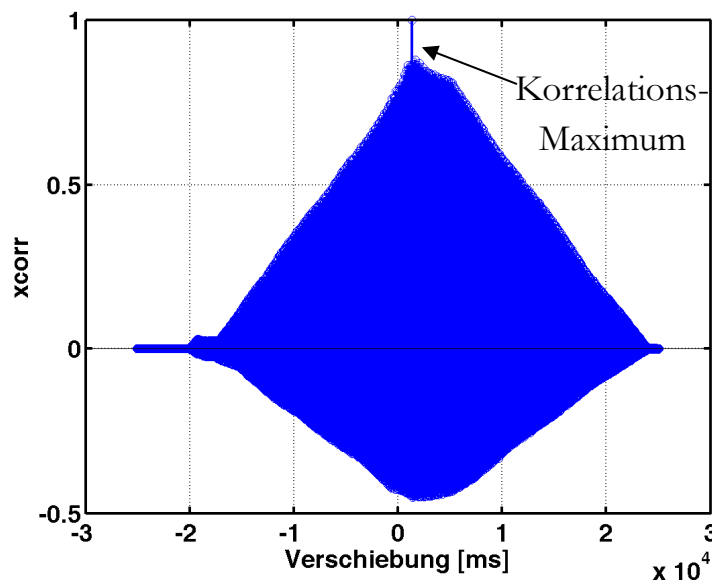


Abb. 26: Korrelationsfunktion zwischen LDA-Sensor-Signal und Labor-LDA-Signal mit deutlichem Maximum

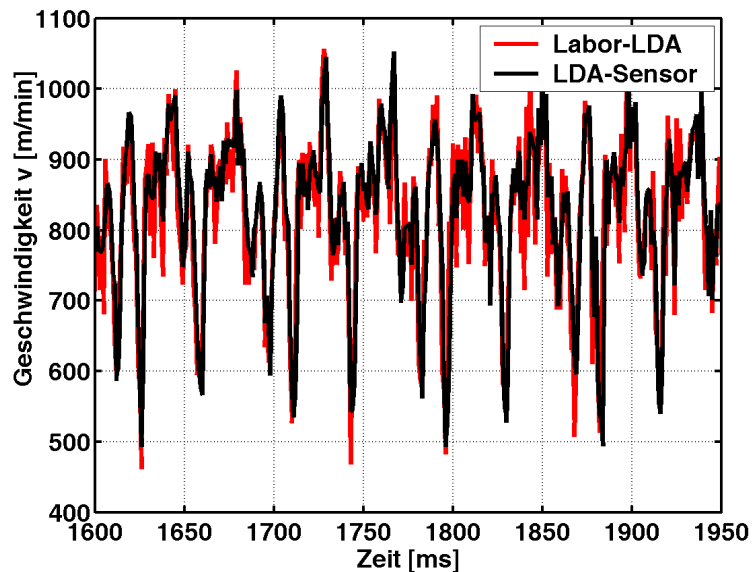


Abb. 27: Mittels Korrelationsberechnung übereinander gelegte LDA-Signale

Zur weiteren Auswertung wird das letzte Viertel der Messung, welche das Trigger-Ereignis beinhaltet ausgeblendet. Zur Auswertung stehen dann synchronisierte Geschwindigkeitssignale für die Dauer von 15 s zur Verfügung.

Geschwindigkeits-Histogramme und Betrachtung des Signalverlaufs im Frequenzbereich

Aus dem synchronisierten und vom Trigger-Ereignis befreiten Signalverlauf werden ein Histogramm und das Fourierspektrum berechnet. Als Beispiel für die Darstellung des Histogramms dient Abb. 28. Die Messung wurde mit einer Spulgeschwindigkeit von 2.000 m/min, einer Bildstörung von 6 % und einer Fadenzugkraft von 12 cN durchgeführt. Es wurde absichtlich die maximale Spulgeschwindigkeit für diese Darstellung gewählt, um die in Kapitel 4 hergeleiteten Anforderungen bezüglich Geschwindigkeitsvariation und Dynamik zu überprüfen. In der oberen Hälfte sind jeweils die ersten 300 ms des Signalverlaufs beider Messsysteme dargestellt. In der unteren Hälfte ist das Histogramm über 15 s Signalverlauf beider Messsysteme abgebildet. Der vom Labor-LDA erfasste Geschwindigkeitsbereich liegt zwischen ca. 1.400 m/min bis 2.500 m/min. In Kapitel 4 wurden 1.293 m/min bis 2.530 m/min theoretisch vorhergesagt. Der LDA-Sensor hat aufgrund der geringen Dynamik einen geringeren Geschwindigkeitsbereich von ca. 1.500 m/min bis 2.400 m/min gemessen.

Das zu Abb. 28 entsprechende Fourier-Spektrum ist in Abb. 29 dargestellt. Der Signalverlauf des LDA-Sensors weist eine Abtastrate von 1 kHz auf. Die Abtastrate

des Labor-LDA's beträgt 10 kHz. Um die Fourier-Spektren der beiden Signale miteinander vergleichen zu können und um eine mögliche Verbreiterung der Frequenzspitzen im schneller abgetasteten System zu vermeiden, werden für die Berechnung des Labor-LDA-Spektrums zehn mal mehr „Stützstellen“ vorgesehen als für die Berechnung der LDA-Sensor-Spektren. Die beiden Spektren werden übereinander gelegt und miteinander verglichen.

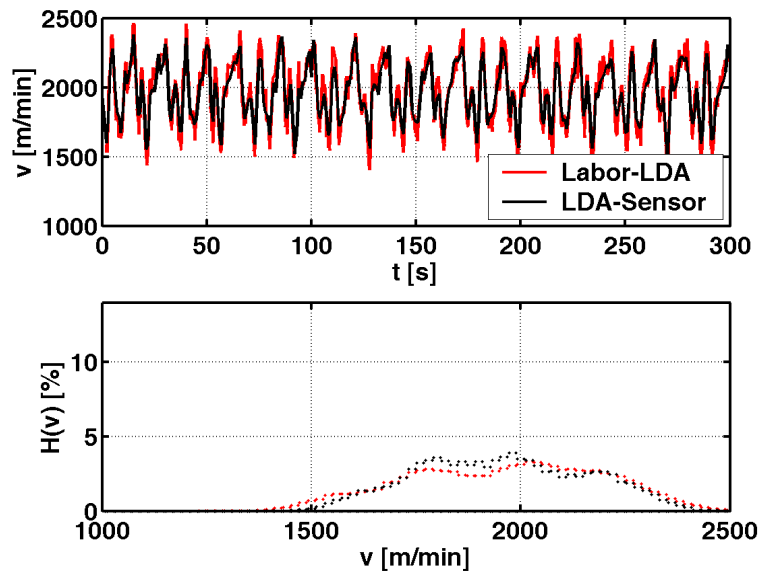


Abb. 28: Ausschnitt aus synchronisierten Geschwindigkeitssignalen und entsprechende Histogramme über 15 s bei einer Spulgeschwindigkeit von 2.000 m/min

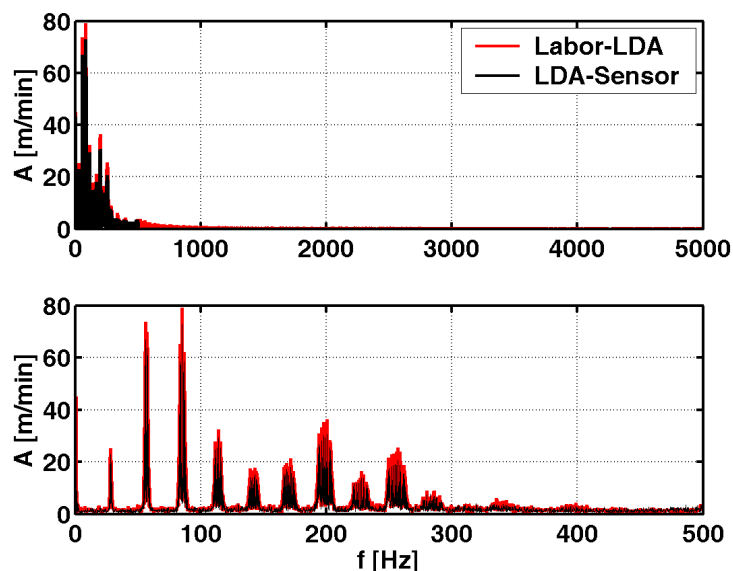


Abb. 29: Fourier-Spektrum über 15 s synchronisierter Geschwindigkeitssignale. oben: gesamtes Spektrum bis 5.000 Hz, unten: Ausschnitt bis 500 Hz.

Die charakteristische Grundfrequenz beträgt hier 28,5 Hz. Vergleicht man diese mit der theoretisch vorhergesagten Frequenz von 27,5 Hz aus Abb. 9 (ein Doppelhub bei Trommeltype ug2s und Spulgeschwindigkeit 2.000 m/min), so ist der Fehler sehr klein (-3,2 %) und wird mit Schlupfmechanismen zwischen Spulenoberfläche und Trommelantrieb begründet. Auffällig ist die stetige Verbreiterung der vielfachen Frequenzen. Die Ursache hierfür ist die Bildstörung von 6 %, bei der die Spulgeschwindigkeit kontinuierlich moduliert wird. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 6.3 näher beschrieben. Auffällig ist auch, dass kaum Frequenzanteile über 300 Hz im Spektrum vorhanden sind. Erwartet werden nach Abb. 9 charakteristische Frequenzanteile von bis zu 1,2 kHz. Eine Ursache hierfür liegt zum einen wieder in der Bildstörung. Diese verursacht eine stärkere Dämpfung der charakteristischen Frequenzanteile. Je höher die Frequenz ist, desto höher wird auch die Dämpfung. Eine zweite Ursache liegt in der Materialeigenschaft des Garns. Höhere Frequenzen werden durch die Elastizität des Garns gedämpft.

In Abb. 30 ist abschließend ein direkter Vergleich zwischen dem Garnförderprofil, dem Labor-LDA-Signal und dem LDA-Sensor-Signal dargestellt. Die Spulgeschwindigkeit beträgt hier 850 m/min und die Fadenzugkraft ist mit 5 cN auf einen sehr geringen Wert eingestellt. Hier wird deutlich dass die von den LDA's gemessenen Geschwindigkeiten dem theoretisch vorhergesagten Verlauf in hohem Maße folgen. Somit wird gezeigt, dass das Labor-LDA als Referenzmesssystem angesehen werden kann. Mit der LDA-Technologie kann also die momentane Garngeschwindigkeit auf einer Spulstelle berührungslos und hochgenau gemessen werden. Abweichungen vom Garnförderprofil erklären sich durch Dehnungs- und Fadenzugkraftprozesse. Als Beispiel dafür ist ein Geschwindigkeitsverlauf, mit höherer Fadenzugkraft (30 cN) in Abb. 31 dargestellt. Hier sieht man deutlich, dass die Dynamik im Verlauf zumindest beim Labor-LDA deutlich zugenommen hat. Dass die Dynamik beim LDA-Sensor nicht so stark ansteigt, wie beim Labor-LDA, ist mit der geringeren Abtastrate des LDA-Sensors begründet.

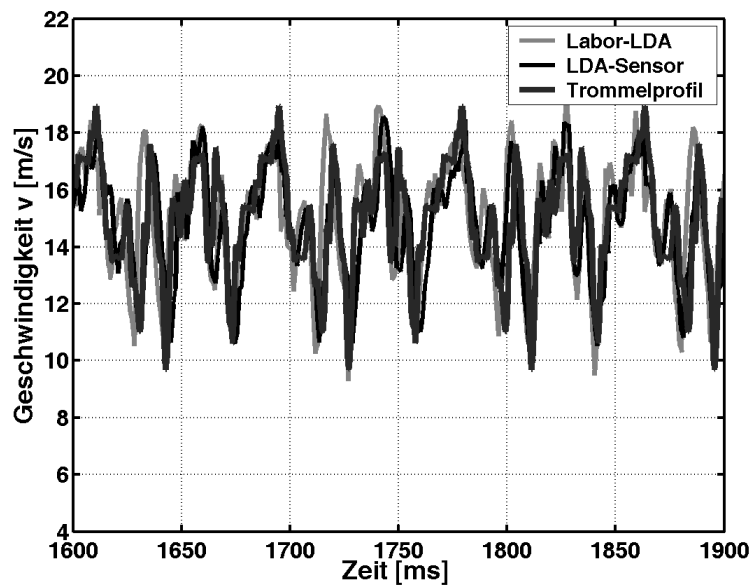


Abb. 30: Vergleich der Signalverläufe Garnförderprofil, Labor-LDA und LDA-Sensor (Fadenzugkraft 5 cN, Spulgeschwindigkeit 850 m/min)

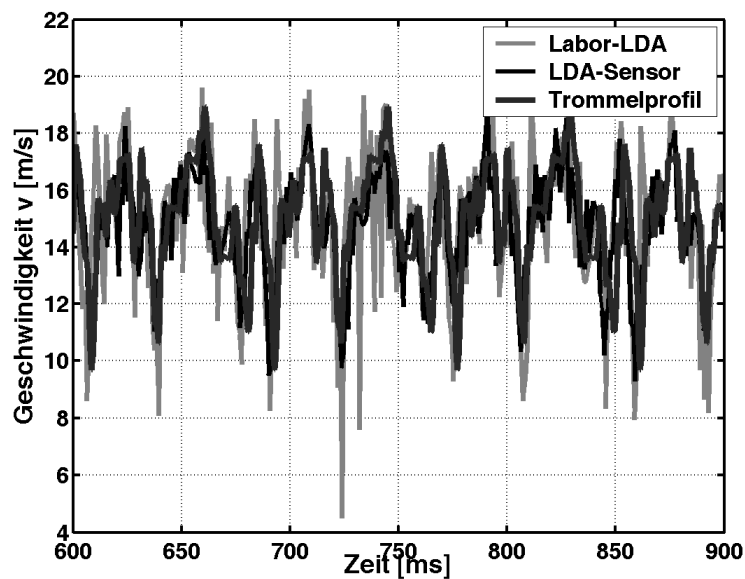


Abb. 31: Wie Abb. 30, aber mit Fadenzugkraft 30 cN

Weiterführende technologische Untersuchungen mit der Kombination LDA-Sensor und Labor-LDA bezüglich Bildstörung, Spulgeschwindigkeiten, Rohstoff, Garnnummer und Fadenzugkraft sind in Kapitel 6.3 beschrieben.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Bildstörung

Die Bildstörung ist ein Verfahren, bei dem der Trommelantrieb zyklisch beschleunigt wird. Den Grad der Bildstörung ist in 3-Prozent-Schritten von 0 % (Bildstörung aus) bis 15 % (max. Bildstörung) einstellbar. Je nach Bildstör-Grad liegt die Zykluszeit zwischen 0,5 s und 2,5 s. Hier wird untersucht, ob die Bildstörung in allen Fällen mit dem Labor-LDA und dem LDA-Sensor erkannt wird. Zur Signalanalyse wird für jede Messung das Fourier-Spektrum berechnet.

Die Ergebnisse sind in Abb. 32 dargestellt. Die Diagramme sind jeweils zweigeteilt. Oben findet sich das Spektrum bis 250 Hz. Unten ist ein Ausschnitt bis 5 Hz, dargestellt, in dem der Bildstörzyklus erwartet wird. Das (Doppel-) Diagramm oben links zeigt das Frequenzspektrum für ein Signal ohne Bildstörung ($v_s = 850$ m/min, FZK = 12 cN). Die charakteristischen Frequenzen stimmen mit dem in Kapitel 4 hergeleiteten Garnförderprofil in hohem Maße überein. Im Bereich des Bildstörzyklus (Diagramm unten) ist kein signifikanter Frequenzanteil zu erkennen. Die folgenden Diagramme weisen von links nach rechts und von oben nach unten einen steigenden Bildstör-Grad auf. Hierbei wird beobachtet, dass sich die charakteristischen Frequenzspitzen bei steigender Bildstörung verbreitern und weitere Frequenzen hinzukommen. Höhere Frequenzen werden mit zunehmender Bildstörung deutlich gedämpft.

Der Bildstörzyklus ist für alle Bildstörungen erkennbar. Je größer die Bildstörung ist, desto größer wird die Amplitude und desto kleiner wird die Bildstörfrequenz. Der Frequenzverlauf zwischen Labor-LDA und LDA-Sensor korrelieren sehr gut. Das Labor-LDA ist allerdings etwas dynamischer, d.h. die höheren Frequenzanteile sind ausgeprägter und werden besser aufgelöst.

Um die Bildstörung im Zeitbereich darstellen zu können, müssen alle Frequenzanteile, die nicht durch die Bildstörung hervorgerufen werden eliminiert werden. Da bei ausgeschalteter Bildstörung keine Frequenzen im Bereich kleiner 5 Hz auftreten, und die maximale Frequenz bei der größten Bildstörung bei 1,5 Hz liegt, wird das Signal im Zeitbereich mit einem Butterworth-Tiefpass (Grenzfrequenz 2 Hz) gefiltert. Die Resultate sind in Abb. 33 dargestellt. Die Korrelation zwischen Labor-LDA und LDA-Sensor ist sehr gut. Man kann die Beschleunigungsphasen (linearer Hochlauf) der Trommel und das exponentielle Auslaufen (gebremst durch Reibung zwischen Spule und Trommel) besonders gut bei großen Bildstörungen erkennen

6 Verfahrensabsicherung

(12 % und 15 %). Durch die Tiefpassfilterung ist sogar ein Nachweis der 3 % Bildstörung mit beiden LDA-Systemen problemlos möglich.

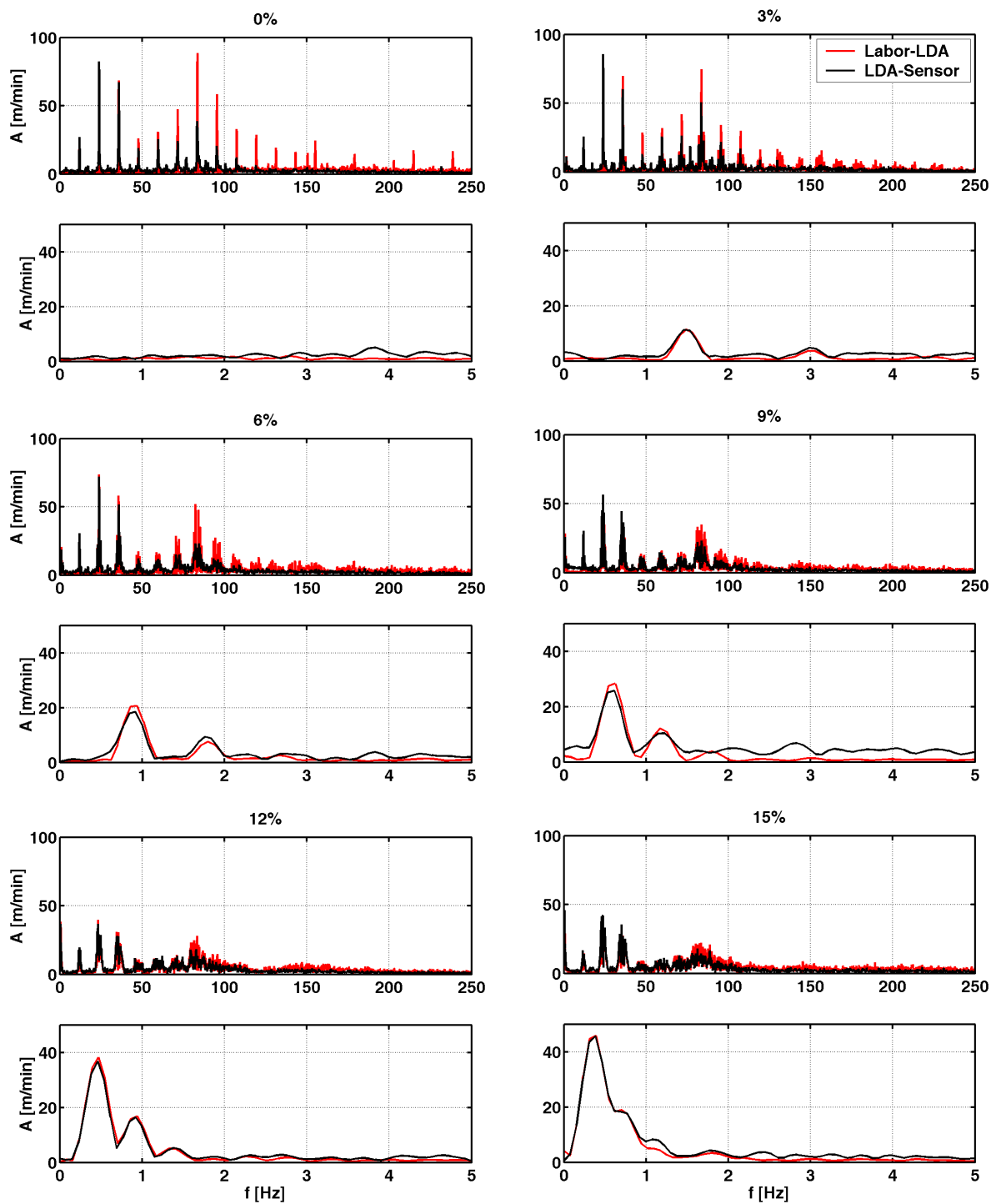


Abb. 32: Frequenzspektren für Messreihen mit 0 %, 3 %, 6 %, 9 %, 12 % und 15 % Bildstörung.

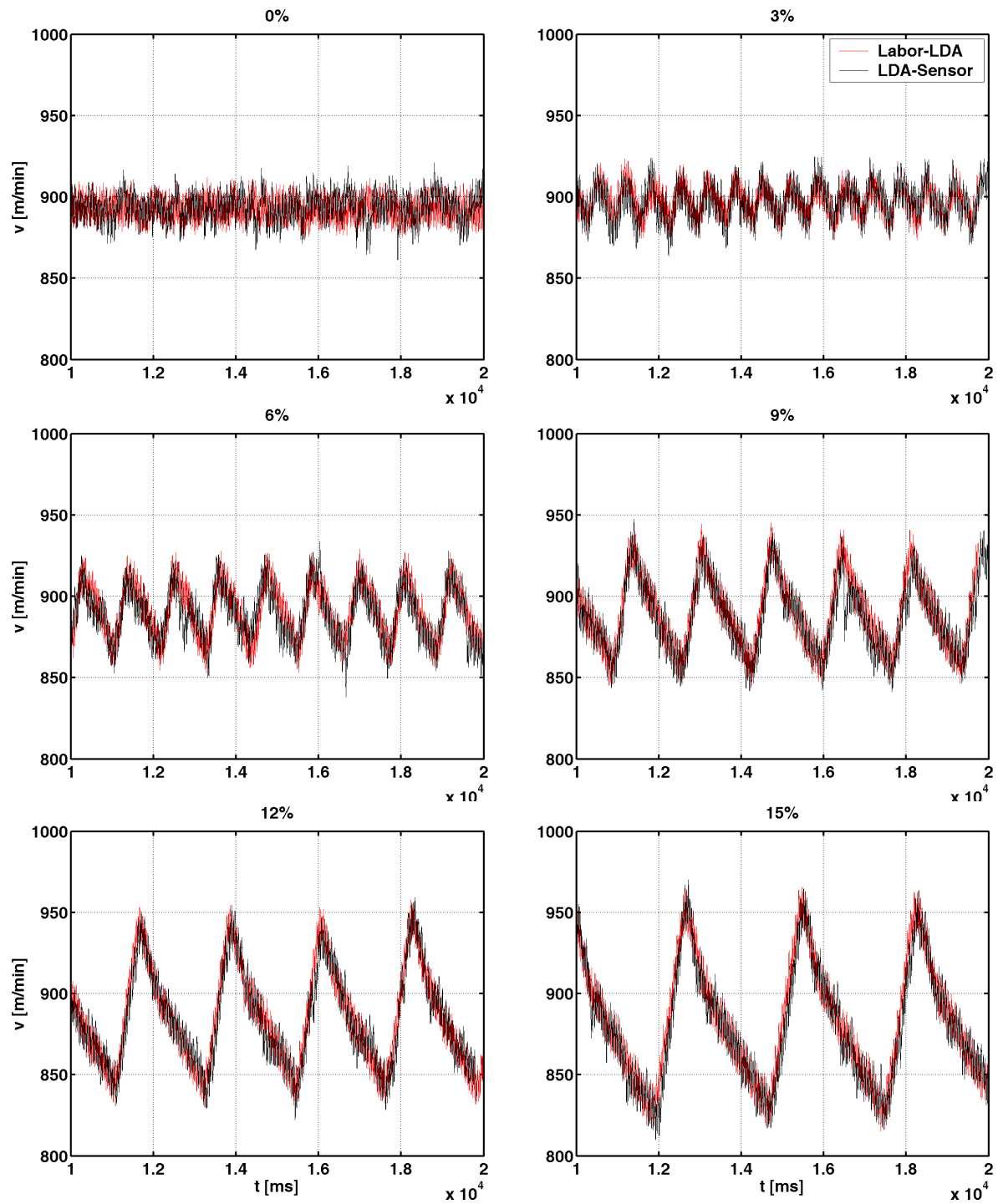


Abb. 33: Tiefpassgefiltertes Signal (Butterworth-Filter, Grenzfrequenz 2 Hz) bei unterschiedlichen Bildstörungen (0 % bis 15 %)

6.3.2 Spulgeschwindigkeit

Es wird untersucht, ob der LDA-Sensor bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten die gleichen Messergebnisse liefert, wie das Labor-LDA. Dazu wird die Spulgeschwindigkeit von 500 m/min bis 2.000 m/min variiert. Die Inkremente betragen 250 m/min. Folgende Parameter wurden gewählt:

- Fadenzugkraft: 12 cN
- Bildstörung 6 %
- Baumwolle Nm 68
- Trommel u_g 2 s
- Aufspulen auf zylindrische Spule
- Abzug von Spule

Vergleicht man die Signalverläufe zwischen Labor-LDA und LDA-Sensor auf den Diagrammen in Abb. 34, so wird deutlich, dass der LDA-Sensor den gleichen Signalverlauf wie das Labor-LDA aufweist. Das Labor-LDA hat bei einigen Messungen eine höhere Dynamik, das Signal des LDA-Sensors erscheint aufgrund der geringeren Abtastrate etwas „ruhiger“. Die Formen der entsprechenden Histogramme weisen eine hohe Ähnlichkeit auf. Auffallend ist, dass das charakteristische Trommelprofil bei Spulgeschwindigkeiten von 500 m/min bis 1.750 m/min sehr deutlich zu sehen ist und bei den Messungen bei 2.000 m/min verschwindet. Dies deutet auf eine vermehrte Fehlführung des Garns während der Verlegung bei hohen Spulgeschwindigkeiten hin. Die Histogramme verbreitern sich mit zunehmender Geschwindigkeit und flachen sehr stark ab.

Die entsprechenden Fourier-Spektren sind in Abb. 35 dargestellt. Hier wird deutlich, warum einige Labor-LDA-Signale eine höhere Dynamik aufweisen. Die höhere Abtastrate des Labor-LDA-Signals beinhaltet im Gegensatz zur LDA-Sensor-Visualisierungsoberfläche Frequenzen jenseits von 500 Hz. Bei sehr genauer Betrachtung der Spektren mit der Geschwindigkeit 500 und 2.000 m/min sieht man noch kleine Frequenzanteile im weiten Bereich um 500 Hz, die von der LDA-Sensor-Visualisierungsoberfläche nicht mehr dargestellt werden können. Die Ursache der charakteristischen Frequenzen ist abhängig vom Trommeltyp und der Spulgeschwindigkeit. Zum Beispiel liegt die Grundfrequenz bei $v_s = 500 \text{ m/min}$ bei $f_1 = 7,2 \text{ Hz}$. Die verwendete Trommel hat eine Umfang-Fördermenge von ca. $U = 0,303 \text{ m}$ und eine Gangzahl von $g = 2$. Die Grundfrequenz errechnet sich daraus nach Gleichung 6-1:

$$f_1 = \frac{v_s [m/s]}{U[m] \cdot 2 \cdot g} \quad 6-1$$

Alle weiteren charakteristischen Frequenzspitzen im Spektrum sind Vielfache der Grundfrequenz f_1 . Die Verbreiterung der Spektren wird durch die Bildstörung (6 %) verursacht. Tab. 5 stellt einen Überblick über die theoretisch berechnete Grundfrequenz und die aus den Diagrammen abgelesene Grundfrequenz dar. Die gemessene Grundfrequenz liegt immer oberhalb der theoretisch berechneten Grundfrequenz, da sich die effektive Umfang-Fördermenge aufgrund von Schlupf zwischen Spule und Trommel verringert. Die relative Abweichung liegt innerhalb des Bereichs des üblichen Schlupfes (<5 %) zwischen Spule und Trommel.

Geschwindigkeit v_s [m/min]	theoretische Grundfrequenz f_1 [Hz]	gemessene Grundfrequenz f_1 [Hz]	Abweichung berechnet/ gemessen
500	6,9	7,1	-3,2%
750	10,3	10,5	-1,7%
1000	13,8	14,1	-2,5%
1250	17,2	17,6	-2,3%
1500	20,6	21,3	-3,2%
1750	24,1	24,6	-2,1%
2000	27,5	28,4	-3,2%

Tab. 5: Vergleich zwischen berechneter und gemessener Grundfrequenz

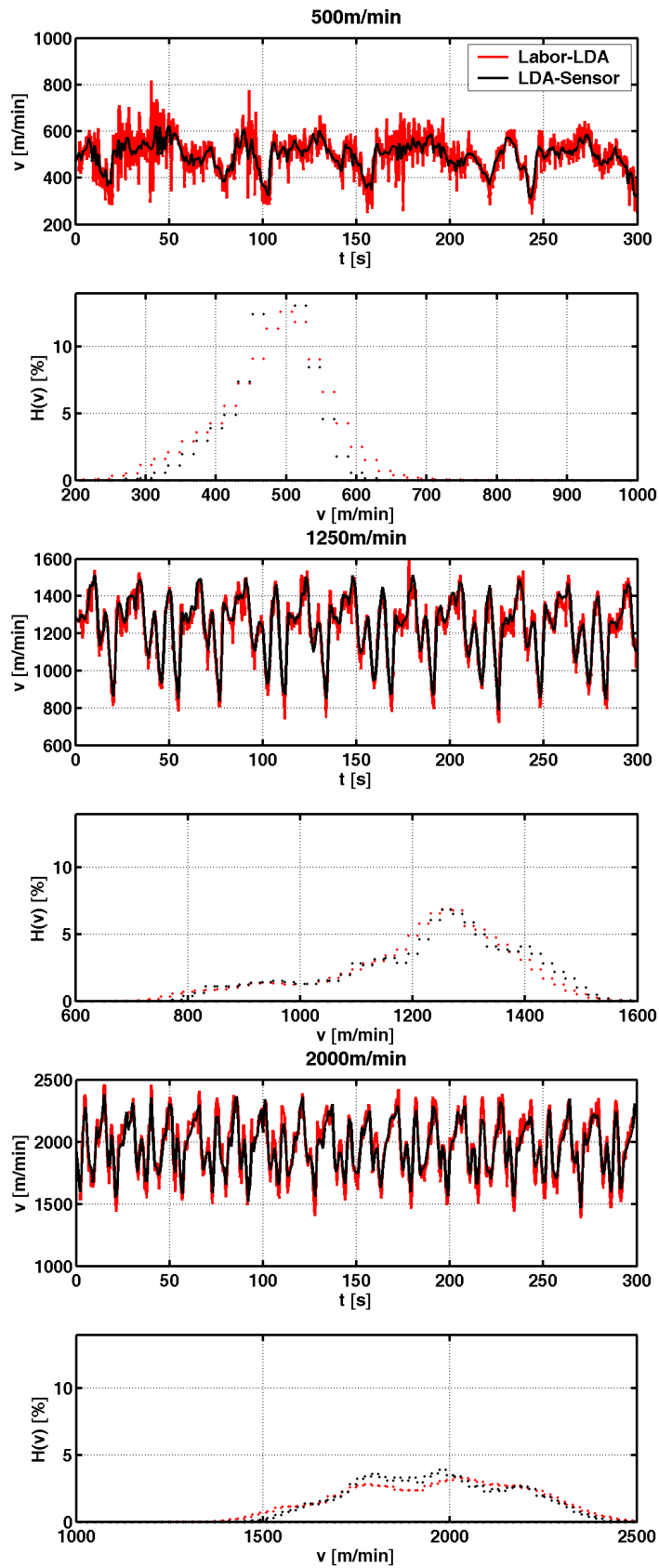


Abb. 34: Labor-LDA- und LDA-Sensor-Signale, bzw. Histogramme bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

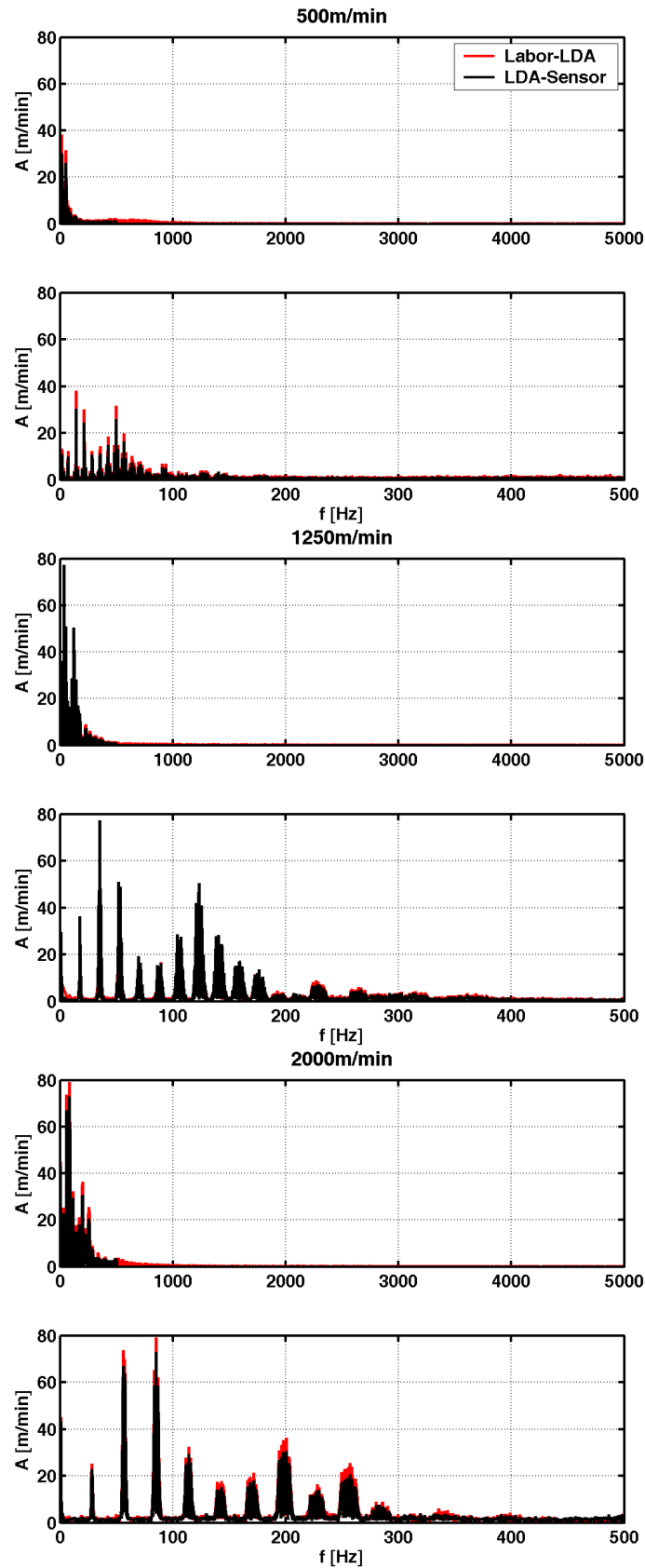


Abb. 35: Frequenzspektren der Labor-LDA- und LDA-Sensor-Signale, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

6.3.3 Garnnummer und Garn aus unterschiedlichen Rohstoffen

Der Aufwand, alle möglichen Garnvariationen (Garnnummer und Garne aus unterschiedlichen Rohstoffen) gleichzeitig mit dem LDA-Sensor und dem Labor-LDA zu prüfen, wäre unverhältnismäßig hoch. Daher wird für diesen Versuchsteil eine sinnvolle Auswahl von gängigen Rohstoffen und Garnnummern getroffen. Zum Einsatz kommen Wolle, Baumwolle und Polyester. Der Nummernbereich liegt zwischen Nm 10 und Nm 135. Bis auf die Wolle sind alle Materialien ungefärbt. Die Wolle ist schwarz eingefärbt und weist somit die höchste Absorption der Laserstrahlung auf. Dadurch ist sichergestellt, dass auch Garne mit anderen Farben mit dem LDA-Sensor erfasst werden können. Mono- und Multifilamente sind aufgrund der glatten, unstrukturierten Oberfläche für den LDA-Sensor nicht geeignet und sind daher auch nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

Tab. 6 gibt eine Übersicht, mit welchen Materialien und welchen Garnnummern die Untersuchungen mit dem Labor-LDA und dem LDA-Sensor durchgeführt wurden. Die Kürzel geben die Bezeichnung in den nachfolgenden Abbildungen wieder. Folgende Einstellungen wurden für die Messreihe gewählt:

- Fadenzugkraft 12 cN
- Bildstörung 6 %
- Geschwindigkeit 850 m/min
- Trommel u_g 2 s
- Aufspulen auf zylindrische Spule

Pos	Kürzel	Material	Garnnummer
1	Nm10	Baumwolle	Nm 10
2	Nm68	Baumwolle	Nm 68
3	Nm135	Baumwolle	Nm 135
4	ZNm20	Zwirn Baumwolle	Nm 20
5	WNm40	schwarze Wolle	Nm 40
6	PESNm70	Polyester	Nm 70

Tab. 6: Getestete Materialsorten

Die Geschwindigkeitsprofile, sowie die Histogramme sind in Abb. 36, die Frequenzspektren in Abb. 37 dargestellt. Bei allen Materialien ist ein ausgeprägtes Trommelfprofil erkennbar. Die Übereinstimmung zwischen Labor-LDA und LDA-Sensor ist ideal. Aus diesen Messungen kann geschlossen werden, dass die oben genannten Materialien unter den hier gewählten Versuchsbedingungen problemlos mit dem LDA-Sensor erfasst werden können.

Auffallend ist, dass je feiner das Material ist, desto größer ist die Dynamik im Labor-LDA-Signal. Am deutlichsten ist die hohe Dynamik bei Nm135. Im entsprechenden Spektrum können Frequenzanteile bis zu ca. 2,0 kHz nachgewiesen werden, gefolgt von PES Nm 70 und Nm 68 (beide ca. 1,5 kHz). Nm 10, ZNm 20 und WNm 40 weisen im höheren Frequenzbereich nur geringste Anteile auf. Aufgrund dieser Beobachtung wird geschlossen, dass bei feinerem Garn höhere Frequenzanteile im Spektrum des Geschwindigkeitssignals vorhanden sind.

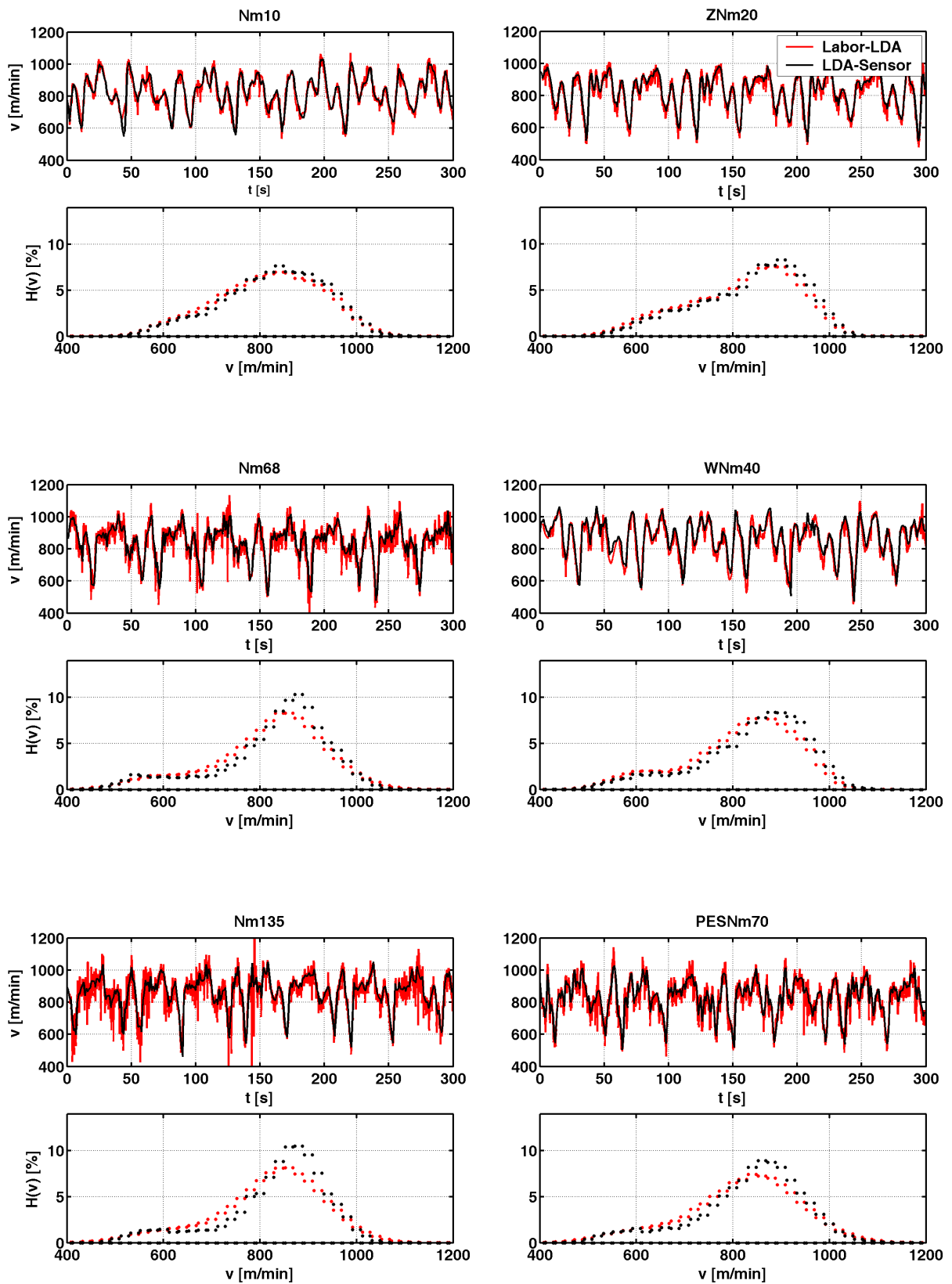


Abb. 36: Geschwindigkeitsprofil und Histogramm in Abhängigkeit von der Garnsorte

6 Verfahrensabsicherung

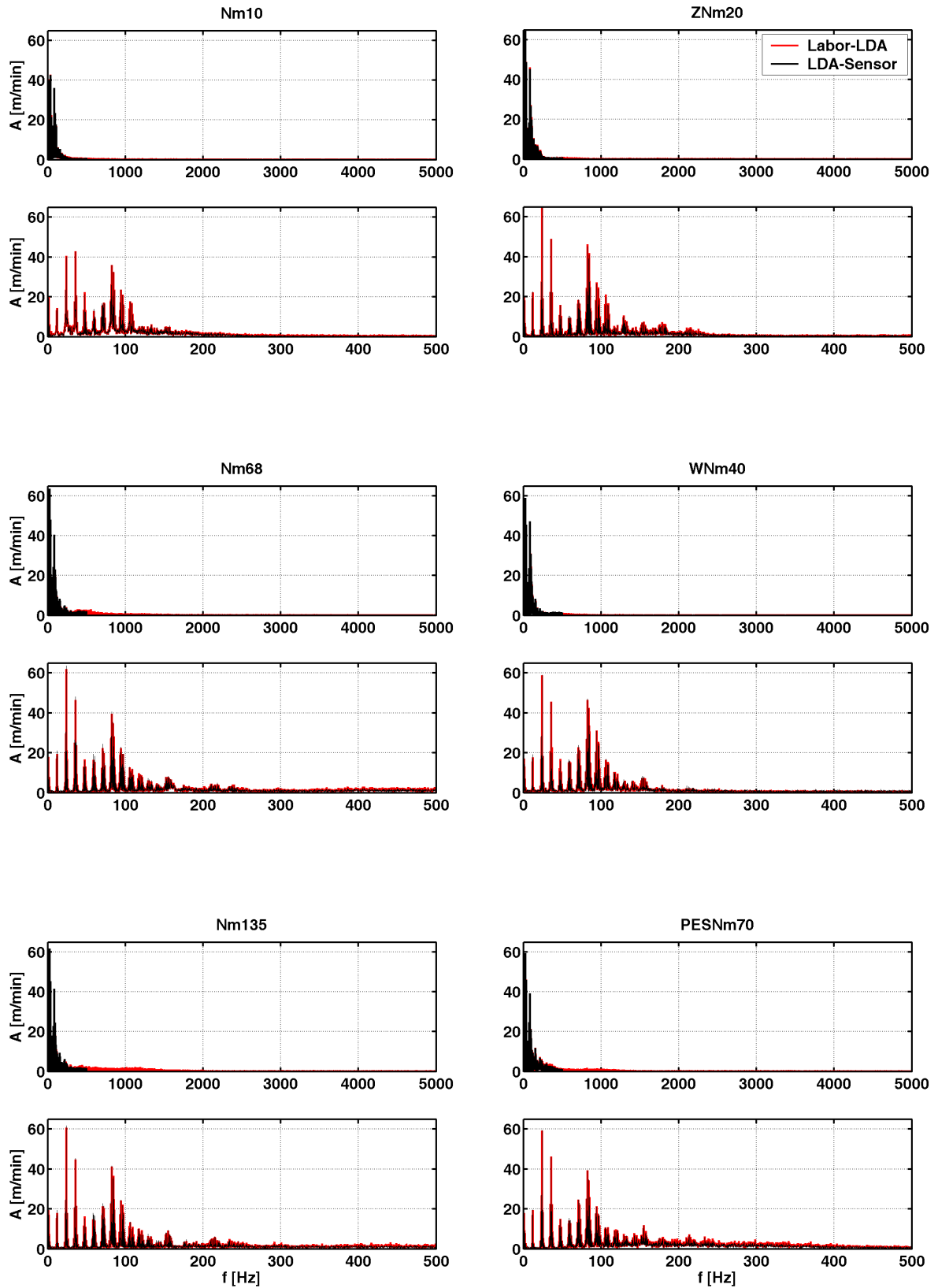


Abb. 37: Fourier-Spektren in Abhängigkeit von der Garnsorte

6.3.4 Fadenzugkraft

Es wird untersucht, inwieweit die Fadenzugkraft das Geschwindigkeitssignal beeinflusst und welche Beschleunigungen auf das Garn wirken. Es wird gezeigt, ob der LDA-Sensor dem Geschwindigkeitsverlauf bei unterschiedlichen Zugkräften folgen kann.

Abb. 38 stellt den Geschwindigkeitsverlauf und die Histogramme der Messungen mit dem Labor-LDA und dem LDA-Sensor dar. Die Zugkraft wurde in den einzelnen Diagrammen von rechts nach links und von oben nach unten von 5 cN auf 65 cN erhöht. Folgende Versuchsbedingungen wurden gewählt:

- Spulgeschwindigkeit 1.000 m/min
- Bildstörung aus
- Baumwolle Nm 68
- Trommel u_g 2 s
- Aufspulen auf zylindrische Spule

Die Dynamik steigt beim Labor-LDA bei wachsender Zugkraft an. Man kann aus den Signalverläufen erkennen, dass der LDA-Sensor dem Geschwindigkeitssignal des Labor-LDA im Mittel folgt. Das mit dem Visualisierungssystem dargestellte LDA-Sensor-Signal weist eine geringere Abtastrate (1 kHz) als die des Labor-LDA's (10 kHz) auf. Dadurch erscheint das LDA-Sensor-Signal mit einer geringeren Dynamik. Die interne Abtastrate des LDA-Sensors ist jedoch wesentlich höher als die der Visualisierungsoberfläche und liegt garnabhängig zwischen 5 kHz und 10 kHz (siehe Kapitel 5.3.2). Da das LDA-Sensor-Signal dem gemittelten Labor-LDA-Signal entspricht, wird davon ausgegangen, dass die interne Abtastrate des LDA-Sensors genügend hoch ist, um den Geschwindigkeitsverlauf des Garns korrekt zu erfassen. Die insbesondere bei hohen Fadenzugkräften auftretenden hochfrequenten Schwingungen werden demnach vom LDA-Sensor korrekt erfasst, allerdings nur gemittelt, bzw. gedämpft über das Visualisierungssystem wiedergegeben.

Eine Analyse der Signale im Frequenzbereich bestätigt, dass eine interne Abtastrate von >5 kHz ausreicht, um den Geschwindigkeitsverlauf korrekt wiederzugeben. Auf Abb. 39 sind die zu Abb. 38 äquivalenten Frequenzspektren wiedergegeben. Hier bestätigt sich, dass mit steigender Fadenzugkraft die hochfrequenten Anteile zunehmen. Es besteht jedoch kein linearer Zusammenhang zwischen Fadenzugkraft und Frequenz. Vielmehr steigen die Anteile im Frequenzbereich um 500 Hz bis hin zu 1,5 kHz mit wachsender Zugkraft kontinuierlich an. Weitere hier nicht

dargestellte Messungen haben ergeben dass die mit dem Labor-LDA maximal nachweisbaren Frequenzanteile auch in den ungünstigsten Bedingungen (hohe Spulgeschwindigkeit, hohe Garnfeinheit und hohe Fadenzugkraft) immer unterhalb von 2 kHz liegen. Nach dem Abtasttheorem von Shannon ist mindestens eine doppelte Abtastfrequenz erforderlich, um die entsprechende Frequenz im Signalverlauf sicher wiedergeben zu können. Da die interne Abtastrate des LDA-Sensors im ungünstigsten Fall bei 5 kHz liegt, ist dieses Kriterium erfüllt.

Der Zusammenhang zwischen zunehmender Dynamik im Geschwindigkeitsverkauf bei steigender Fadenzugkraft lässt die Frage aufkommen, ob die Fadenzugkraft mit einem LDA-System quantitativ bestimmt werden kann. Zu diesem Zweck wurden weitergehende Untersuchungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau wird durch einen hochdynamischen RES-Fadenzugkraftsensor F30-500 der Fa. R. und E. Schweizer-Blättler (Uerikon, Schweiz) eingesetzt (Abb. 22) ergänzt. Der Messkopf mit einer Eigenfrequenz von 16kHz ermöglicht eine hochdynamische Fadenzugkraftmessung mit einer Abtastrate von 10 kHz /115/. Der RES-Messkopf ist oberhalb des Spulstellen-Zugkraftsensors im Bereich des Paraffineurs angebracht. Dadurch ist weitestgehend sichergestellt, dass für den RES-Messkopf und die LDA-Systeme gleiche Zugkraftbedingungen vorliegen.

Abb. 40 stellt einen direkten Vergleich zwischen dem Geschwindigkeitssignal des Labor-LDA's und dem FZK-Signal des RES-Messkopfes dar. Beide Abtastraten betragen 10 kHz. Es ist zu erkennen, dass ein Zusammenhang zwischen Fadenzugkraftsignal und Geschwindigkeitssignal besteht: Ein Anstieg der Fadenzugkraft ist immer mit einem Anstieg der Garngeschwindigkeit verbunden und umgekehrt. Allerdings besteht kein quantitativer Zusammenhang zwischen der Höhe des Anstiegs bzw. des Abfalls. Der Zusammenhang beschränkt sich lediglich auf das Vorzeichen der Steigung. Der empirische Korrelationskoeffizient der in Abb. 40 dargestellten Signale beträgt 0,83.

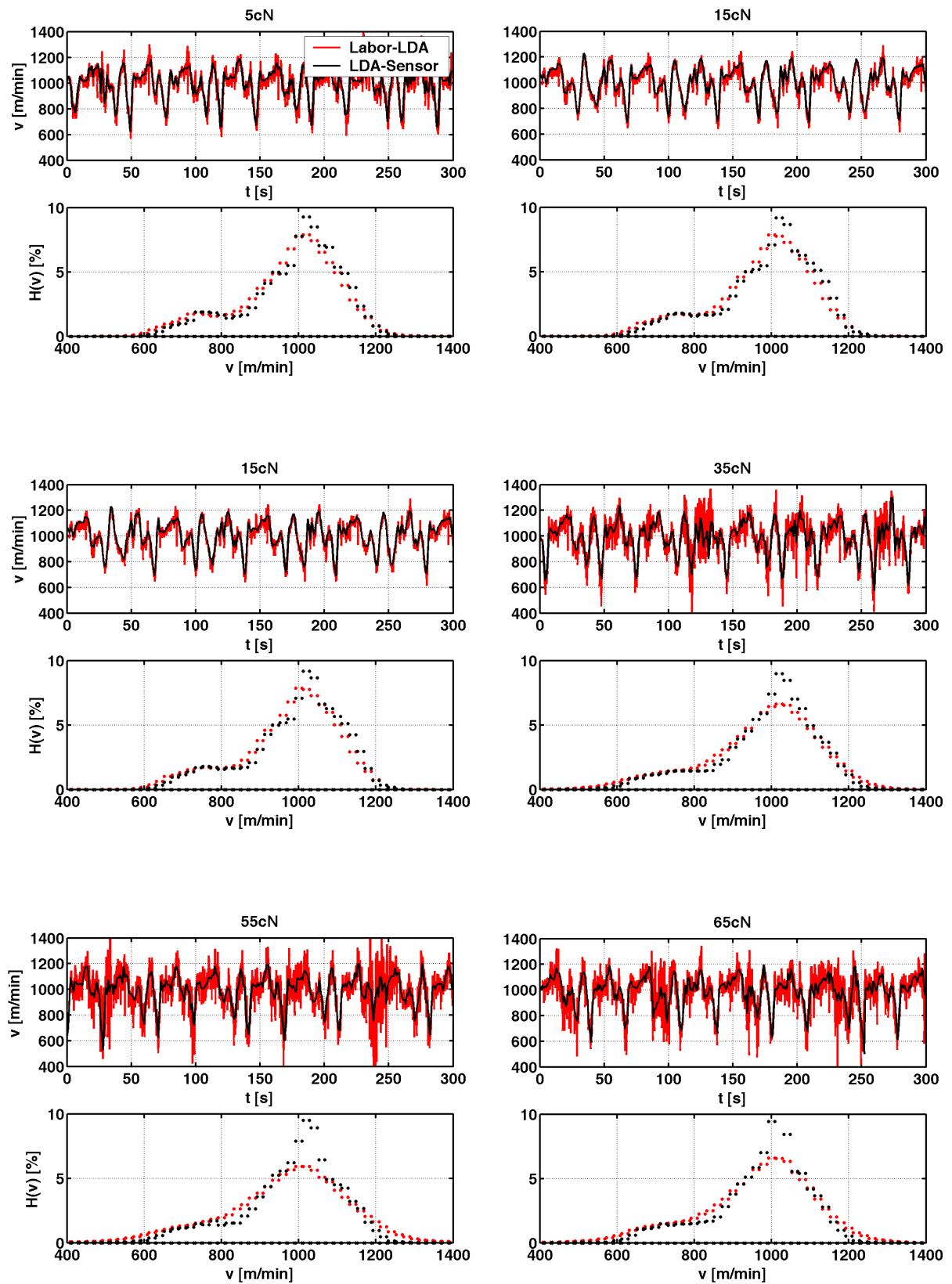


Abb. 38: Geschwindigkeitsverläufe und Histogramme mit variierender FZK

6 Verfahrensabsicherung

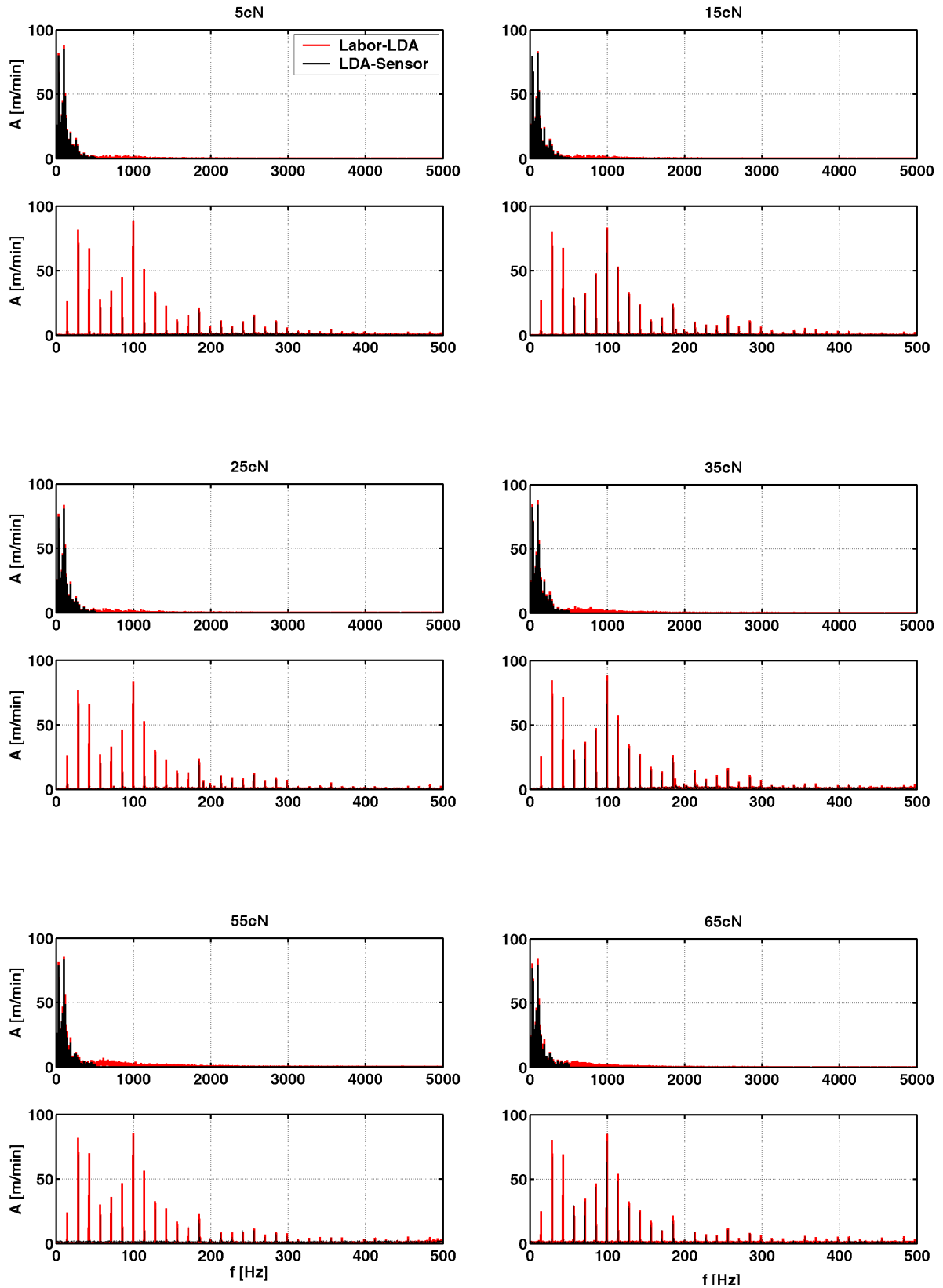


Abb. 39: Fourier-Spektren beider LDA-Systeme mit unterschiedlichen Fadenzugkräften

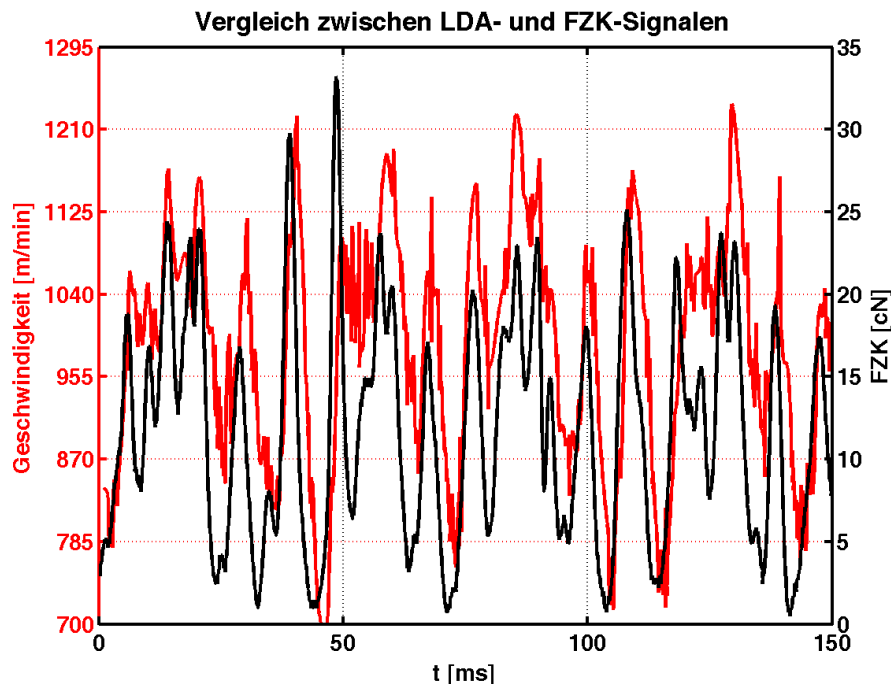


Abb. 40: Vergleich des Labor-LDA-Signals und dem Signal eines hochdynamischen RES-Fadenzugkraftsensors

Es ist bekannt, dass beim Abzug vom Kops die Fadenzugkraft während einer Kopsreise aufgrund der zunehmenden Schaftreibung steigt. Um den Effekt der zunehmenden Fadenzugkraft im Geschwindigkeitssignal zu beobachten, wird folgender Versuche durchgeführt. Mit dem LDA-Sensor und dem RES-Messkopf wird eine gesamte Kopsreise über ca. 2 Minuten aufgezeichnet und daraufhin analysiert. Die Aufzeichnung mit dem vorhandenen Labor-LDA ist über einen so großen Zeitbereich nicht möglich.

Abb. 41 stellt den mit dem LDA-Sensor gemessenen Geschwindigkeitsverlauf über eine gesamte Kopsreise dar. In den ersten 5 Sekunden ist der Spulenhochlauf deutlich zu erkennen. Da der Arbeitsbereich des LDA-Sensor erst bei einer Mindestgeschwindigkeit von ca. 100 m/min beginnt, ist der untere Spulenhochlauf nicht messbar und geht daher auch nicht in die Auswertung ein. Nachdem der Spulenhochlauf abgeschlossen ist, ist eine permanente Verbreiterung des Geschwindigkeitsspektrums zu erkennen. Zu Beginn reichen die Minimal- und Maximal-Geschwindigkeiten von ca. 750 m/min bis 1.250 m/min. Am Ende der Kopsreise liegen die Spitzenwerte von ca. 600 m/min bis ca. 1.350 m/min. Daraus wird geschlossen, dass diese Verbreiterung mit einer steigenden Fadenzugkraft einhergeht.

In Abb. 42 oben sind die zu Abb. 41 äquivalenten hochdynamischen Fadenzugkraftverläufe des RES-Messkopfes dargestellt. Auch hier ist die Phase des Spulen-

hochlaufs zu sehen. Während des Hochlaufs treten vermehrt Zugkraftspitzen bis maximal 40 cN auf. Es sei darauf hingewiesen, dass die an der Spulmaschine eingestellte Fadenzugkraft 3 cN beträgt. Nach dem Spulenhochlauf betragen die maximalen Zugkraftspitzen zunächst ca. 20 cN. Am Ende der Kopsreise steigen die Maximalwerte auf bis ca. 100 cN an. Die Unterschiede zwischen der an der Spulmaschine eingestellten Fadenzugkraft und der mit dem RES-Messkopf gemessenen Fadenzugkraft werden durch die Kops-Schaftreibung und der fehlenden Balloneingrenzung verursacht. Die durch den Kopsabzug hervorgerufenen Zugkräfte können von der Fadenzugkraftregelung der Spulstelle nicht kompensiert werden.

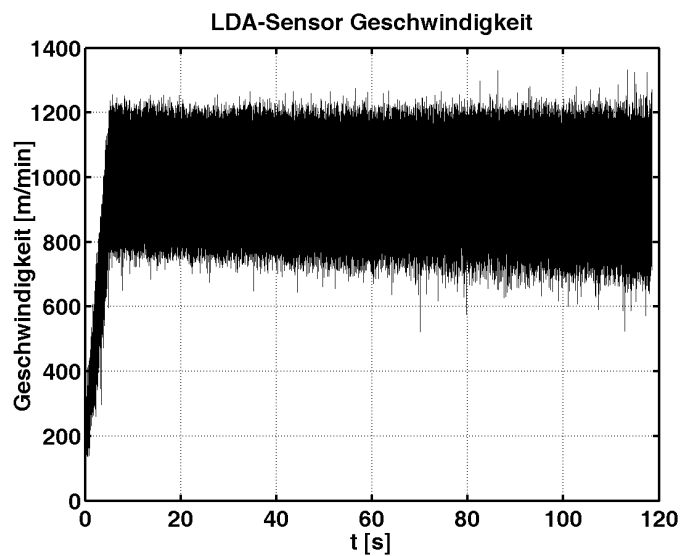


Abb. 41: Geschwindigkeitssignal des LDA-Sensors während einer gesamten Kopsreise

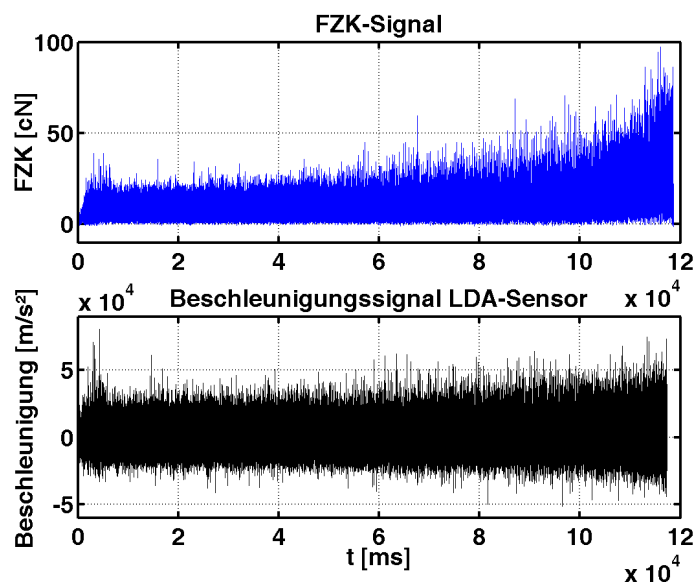


Abb. 42: Fadenzugkraftsignal des RES-Messkopfes und Beschleunigungssignal des LDA-Sensors während einer gesamten Kopsreise

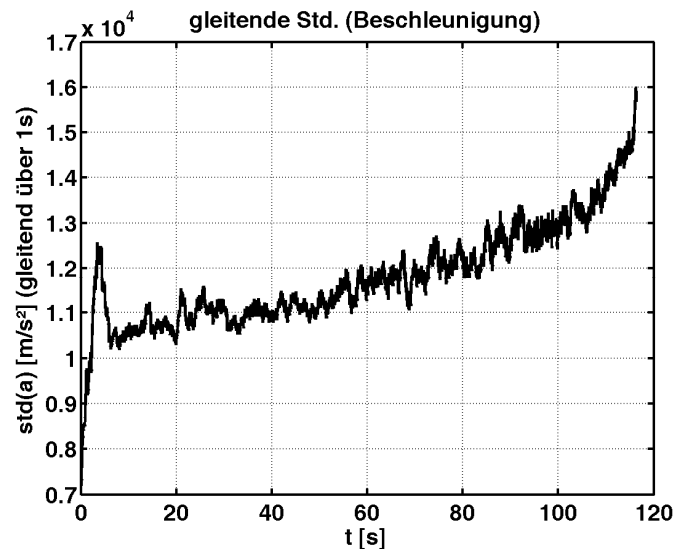


Abb. 43: Gleitende Standardabweichung des Beschleunigungssignals während einer Kopsreise

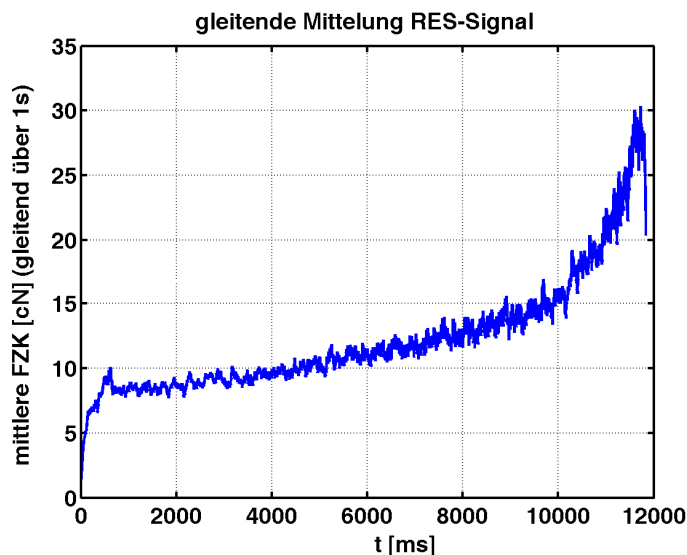


Abb. 44: Gemittelttes Fadenzugkraftsignal während einer Kopsreise

Aus vorhergehenden Messungen wurde ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Standardabweichung der Beschleunigung ($\text{std}(a)$) und der mittleren Fadenzugkraft, bzw. und der Fadenzugkraftspitzen vermutet. Um diese These mit dem hochdynamischen RES-Messkopf zu evaluieren, wurde das Beschleunigungssignal durch zeitliche Differentiation des Geschwindigkeitssignals gebildet. Das Ergebnis ist in Abb. 42 unten dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Beschleunigungsspitzen während des Spulenhochlaufs (die ersten 5 Sekunden) und bei der anschließenden Kopsreise stetig ansteigen. Die Beschleunigungen, die auf das Garn wirken, liegen im Bereich $\pm 10^4 \text{ m/s}^2$. Aus den Diagrammen ist zu erkennen,

dass die Zunahme der Beschleunigung in keinem proportionalen Verhältnis zu den Fadenzugkraftspitzen steht. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die LDA-Sensor-Signale aufgrund der Visualisierungsoberfläche auf 1 kHz gemittelt sind und die hochdynamischen Vorgänge somit nicht vollständig wiedergegeben werden können.

Um den Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Fadenzugkraft genauer zu untersuchen wurde die gleitende Standardabweichung über das Beschleunigungssignal ($\text{std}(a)$, Abb. 43) ermittelt und dem gleitenden Mittelwert der Fadenzugkraft (Abb. 44), gegenübergestellt. Die Mittelung erfolgte jeweils über 1 s des entsprechenden Signalverlaufs.

Die mittlere Fadenzugkraft steigt nach dem Spulenhochlauf zunächst annähernd linear an. Gegen Ende der Kopsreise (nach ca. 90 s) kommt es zu einem fast exponentiellen Anstieg der mittleren Zugkraft auf bis zu 30 cN. Der lineare Anstieg kann auch von dem Verlauf der $\text{std}(a)$ bestätigt werden. Ebenso kann näherungsweise ein anschließender exponentieller Anstieg im $\text{std}(a)$ -Verlauf nachvollzogen werden. Bemerkenswert ist, dass der Spulenhochlauf im $\text{std}(a)$ -Verlauf sehr viel deutlicher ausgeprägt ist, als bei der mittleren Fadenzugkraft.

Es bleibt also festzuhalten, dass die Standardabweichung des Beschleunigungssignals beim Kopsabzug einen gewissen Zusammenhang mit der mittleren Fadenzugkraft aufweist. Um den Zusammenhang zwischen mittleren Fadenzugkraft und der hochdynamischen Garngeschwindigkeit weiter zu untersuchen, wurden weitere Analysen durchgeführt, die hier nur kurz aufgelistet, aber nicht näher erläutert werden:

- Mittelwerte und Standardabweichungen der Geschwindigkeitssignale
- Mittelwerte der Fadenzugkraftsignale
- Histogramme der Geschwindigkeits- und Fadenzugkraftsignale
- Fourier-Spektren der Geschwindigkeits- und Fadenzugkraftsignale
- Berechnung der Beschleunigungssignale durch zeitliche Differentiation der Geschwindigkeitssignale
- Standardabweichungen der Beschleunigungssignale
- Berechnung der gleitenden Standardabweichung der Fadenzugkraft, Geschwindigkeits- und Beschleunigungssignale

Diese Analysen haben ergeben, dass hochdynamische Zugkraftprozesse auch im hochdynamischen Geschwindigkeitsverlauf zu sehen sind. Hohe Garnzugkräfte verursachen offenbar longitudinale Schwingungen, die über die LDA-Systeme erfasst werden können. Es gibt einen Zusammenhang zwischen Fadenzugkraft und Ausprägung der hochdynamischen Zugkraftprozesse. Aus der Analyse geht auch hervor, dass die Auswertung über die Standardabweichung über das Beschleunigungssignal ($\text{std}(a)$) am ehesten für eine Aussage über die mittlere Fadenzugkraft geeignet ist. Die Messreihen haben jedoch ergeben, dass die Ergebnisse aus der $\text{std}(a)$ -Berechnung Abhängig von der Garnnummer, der Abtastrate, der Spulgeschwindigkeit und evtl. von weiteren noch unbekanntem Größen sind. Insbesondere bei großen Garnnummern, scheint der $\text{std}(a)$ -Wert schnell bei höheren Zugkräften in eine Sättigung über zu gehen. Eine einfache Zuordnung zwischen $\text{std}(a)$ und Zugkraft erscheint daher schwierig.

Die Fourier-Spektren der LDA- und der FZK-Signale ergeben, dass die charakteristischen Frequenzanteile der Garnchangierung im Geschwindigkeits- und im FZK-Signal nahezu deckungsgleich sind. Zusätzlich zu den charakteristischen Frequenzanteilen sind im FZK-Signal auch niederfrequente Anteile und ein „Grundrauschen“ enthalten. Daraus wird geschlossen, dass sich die hochdynamische Zugkraft zumindest aus der Garnchangierung und dem Abzugmechanismus (Abzug von Spule, bzw. Kops) zusammensetzt.

6.3.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Sämtliche durchgeführten Messungen haben ergeben, dass der LDA-Sensor den gleichen Geschwindigkeitsverlauf wie das Labor-LDA misst. Beide LDA-Systeme geben das typische Garnförderprofil wieder. Der Vergleich zwischen Labor-LDA-Signal und LDA-Sensor-Signal lässt folgende Schlüsse zu:

- Der Bildstörmechanismus wird problemlos erkannt und korrekt wiedergegeben.
- Der LDA-Sensor deckt den gesamten Spulgeschwindigkeitsbereich ab.
- Die Untersuchungen haben ergeben, dass eine breite Palette an Garnen aus unterschiedlichen Rohstoffen gemessen werden kann. Lediglich sehr glatte Garne wie Mono- und Multifilamente lassen mit dem LDA-Sensor keine Messungen zu.
- Die Dynamik des LDA-Sensors reicht aus, um den Geschwindigkeitsverlauf bei allen Fadenzugkräften richtig wiederzugeben.

Trotz der enormen Vereinfachung des LDA-Aufbaus in Bezug auf Baugröße, Kosten sowie der verwendeten optischen und elektronische Komponenten, lässt sich die gleiche Messgenauigkeit, wie mit einem wesentlich aufwändigeren Labor-LDA erreichen. Mit Hilfe des LDA-Sensors kann die Garngeschwindigkeit in Serie hochgenau und hochdynamisch gemessen werden. Durch den kostengünstigen Aufbau und die hohe Messgenauigkeit ist es erstmals möglich, die LDA-Technologie wirtschaftlich in der Spulerei einzusetzen.

7 Textiltechnologische Evaluierung

Mit dem neuartigen LDA-Sensor steht für die Spulerei ein hochgenaues, hochdynamisches und berührungslos arbeitendes Messgerät zur Verfügung, das sich serienmäßig in jeder einzelnen Spulstelle einsetzen lässt. Durch die Messung der momentanen Garngeschwindigkeit und -länge ergeben sich neue Erkenntnisse und mögliche Verbesserungen bezüglich der Produktivität, der Garnqualität und der Spulenqualität. Nachfolgend werden exemplarisch zwei Themenschwerpunkte behandelt in denen die Auswirkungen der neuartigen Geschwindigkeits- und Längenmessung auf die Qualität und Produktivität analysiert werden. Die beiden Schwerpunkte sind die Messung der aufgespulten Garnlänge und die Erfassung der Garnfehlerlänge mit dem LDA-Sensor.

7.1 Aufgespulte Garnlänge

7.1.1 Aufgabenstellung

Die Anforderungen an die Längengenauigkeit sind in Kapitel 4 anhand eines Rechenbeispiels für das Einsparpotential in der Webereivorbereitung hergeleitet worden. Je besser die Längengenauigkeit ist, desto weniger Ausschuss wird produziert und desto schneller amortisieren sich die Investitionskosten für einen LDA-Sensor. Aus dem Rechenbeispiel geht hervor, dass eine Längengenauigkeit des LDA-Sensors von 0,5 % ($\pm\sigma \leq 0,5\%$) ausreicht, um die Forderung nach einer kurzen Amortisationszeit zu erfüllen.

Um festzustellen, welche Längengenauigkeiten mit dem LDA-Sensor in der Praxis erreicht werden können, ist es erforderlich, Messungen unter Produktionsbedingungen in einer geeigneten Spulerei durchzuführen. Ideal ist eine Spulerei mit angeschlossener Webereivorbereitung. In einer solchen Spulerei werden Kreuzspulen mit definierter Länge hergestellt und anschließend in der Webereivorbereitung von einem Gatter zur Kettbaumherstellung abgezogen. Nach dem Gatterabzug können die Restespulen vom Gatter entnommen und die verbleibenden Garnmengen ausgewogen werden. Die Auswertung der so gewonnenen Daten erlaubt eine sehr genaue Bestimmung der absoluten Garnlänge jeder einzelnen Spule. Durch Auswertung vieler Spulen, die auf unterschiedlichen Spulstellen produziert wurden, ist eine Bestimmung der Längengenauigkeit (Streuung der absoluten Länge der Spulen untereinander) möglich. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel 7.1.2 erläutert.

Die herkömmliche Vorgehensweise zur Bestimmung der aufgespulten Garmlänge erfolgt mit der Conometer-Methode. Je nach Wartungszustand der Spulmaschine, den Spulparametern und den Umwelteinflüssen werden unterschiedliche Längengenauigkeiten erzielt. Um eine Aussage über die Verbesserung der Längengenauigkeit, die durch Einsatz von LDA-Sensoren erreicht wird, treffen zu können, ist es notwendig, die über die beiden Messverfahren ermittelte Garmlänge zu erfassen und auszuwerten. Die Spulstellenabschaltung erfolgt bei Erreichen der mit den LDA-Sensoren ermittelten Soll-Garmlänge. Die mit der Conometer-Methode erfasste Garmlänge wird mithilfe eines Service-Gerätes aus dem Spulstellenrechner ausgelesen. Durch Extrapolation kann dann auf die Längengenauigkeit der Conometer-Methode geschlossen werden.

Die Ecopack-Methode gilt als die genaueste Methode zur Erfassung der Garmlänge, die zurzeit serienmäßig in Spulmaschinen verwendet wird. Um einen direkten Vergleich bezüglich der Längengenauigkeit zwischen LDA-Sensor und Ecopack zu erhalten, ist es sinnvoll, einige Spulstellen der gleichen Partie mit Ecopack-Sensoren auszustatten. In Kapitel 2.3.7 wurde darauf hingewiesen, dass die Korrelationsmethode lediglich die relative Längengenauigkeit sehr genau misst, allerdings nicht die absolute Längengenauigkeit. Daher muss bei den Messungen zwischen absoluter und relativer Genauigkeit unterschieden werden. Die relative Genauigkeit entspricht der Streuung der Spulen untereinander. Die absolute Längengenauigkeit gibt die Abweichung von der Soll-Garmlänge wieder. Wie in Kapitel 4 beschrieben wurde, sollte die (relative) Längengenauigkeit des LDA-Sensors mindestens genauso gut sein wie die des Korrelationssensors. Für die Webereivorbereitung ist die Längengenauigkeit ein wichtiges Spulenqualitätsmerkmal. Aus Sicht der Webereivorbereitung liegt eine Verbesserung der Spulenqualität vor, wenn die Längengenauigkeit des LDA-Sensors signifikant besser ist, als die Längengenauigkeit der weit verbreiteten Conometer-Methode.

Je nach Messgenauigkeit des verwendeten Verfahrens ist für die Vorgabe der Spulen-Soll-Länge ein Sicherheitszuschlag erforderlich, um ein frühzeitiges Leerlaufen der Spulen im Gatter zu verhindern. Dieser Sicherheitszuschlag kann umso kleiner ausfallen, je besser die Längengenauigkeit ist. Aufgrund des physikalischen Messprinzips ist bei der LDA-Methode von einer hohen relativen und absoluten Längengenauigkeit auszugehen. Demnach kann der Sicherheitszuschlag in Bezug auf die Conometer-Methode verkleinert werden, wodurch die Soll-Garmlänge früher erreicht wird und ein Produktivitätszuwachs vorliegt. Aus den Versuchen soll her-

vorgehen, wie hoch die Messgenauigkeit des LDA-Sensors unter Produktionsbedingungen ist, und welche Produktivitätssteigerungen dadurch erzielt werden können.

7.1.2 Versuchsablauf

Die zur Bestimmung der in der Praxis erreichbaren Längengenauigkeit des LDA-Sensors erforderlichen Untersuchungen wurden an einer Spulerei mit angeschlossener Webereivorbereitung realisiert. Im Folgenden wird der genaue Versuchsablauf aufgezeigt.

Die Produktion der Spulen erfolgte auf einer Spulmaschine vom Typ Autoconer AC5 der Firma Schlafhorst (K-Type mit 60 Spulstellen). Auf die Wahl der Partieparameter wie Garnmaterial, Spulgeschwindigkeit, Fadenzugkraft usw. konnte kein Einfluss genommen werden, da die Messungen unter Produktionsbedingungen stattfanden. Insgesamt wurden 6 unterschiedliche Partien A bis F produziert. Bei allen Partien waren folgende Parameter konstant:

- Fadenzugkraft 25 cN
- Garnmaterial 100 % Baumwolle Nm 119/1 (Kompaktgarn)
- 9 % Bildstörung
- Keine Paraffinierung
- Hülsenkonizität 4°20
- Trommeltype ug2 mit Anlaufring

Die partieabhängigen Parameter sind in Tab. 7 dargestellt. Es wurden Kreuzspulen mit unterschiedlichen Spulgeschwindigkeiten, Färbungen und Soll-Längen (L_{Soll}) produziert.

Die Versuche zur Bestimmung der Längengenauigkeit fanden an 10 benachbarten Spulstellen statt. Die Länge wurde über LDA-Sensoren, Ecopack-Systeme und die Conometer-Methode gemessen. Dazu wurden 6 Spulstellen mit LDA-Sensoren und 4 Spulstellen mit Ecopack-Systemen bestückt. Gleichzeitig wurde die über die Conometer-Methode erfasste Länge auf allen 10 Spulstellen registriert. Die Spulstellenabschaltung erfolgte bei Erreichen der entsprechenden Soll-Länge, wobei die LDA-Sensoren bzw. die Ecopack-Systeme als Längenreferenz dienten.

Partie	v_s [m/min]	Garnfarbe	Anzahl Spulen LDA-Sensor/ Ecopack	L_{Soll} [m]
A	1.300	Weinrot	48/32	41.700
B	1.000	Silbergrau	63/45	136.950
C	1.000	Blau	78/62	41.700
D	1.000	Gelbgrün	82/52	41.700
E	1.200	Dunkelgrün	85/55	41.700
F	800	Ockergelb	83/56	41.700

Tab. 7: Partieabhängige Spulparameter

Die Conometer-Methode hatte keinen Einfluss auf die Spulstellenabschaltung. Bei Erreichen der Soll-Länge wurde die mit der Conometer-Methode erfasste Garnlänge mit einem Service-Gerät aus der Spulstelle ausgelesen. Anschließend wurde die Conometer-Längengenauigkeit über einen Extrapolations-Algorithmus berechnet.

Um beim späteren Gatterabzug leergelaufene Spulen zu vermeiden, wurde die Soll-Länge L_{Soll} mit einem Sicherheitszuschlag multipliziert, dem so genannten Längenkorrekturfaktor LKF . Dieser beträgt für die Ecopackspulstellen $LKF_{Eco} = 1,030$ und für die Spulstellen mit den LDA-Sensoren $LKF_{LDA} = 1,010$. Bei diesen Einstellwerten handelt es sich um Erfahrungswerte, die vorab in Laborversuchen ermittelt wurden. Die korrigierte Soll-Länge liegt demnach bei Ecopack-Spulstellen 3 % und bei den LDA-Sensor-Spulstellen 1 % über der eigentlichen Soll-Länge.

$$L_{SollLDA} = L_{Soll} \times LKF_{LDA} \quad (7-1)$$

$$L_{SollEco} = L_{Soll} \times LKF_{Eco} \quad (7-2)$$

Zur Bestimmung der erreichten Längengenauigkeit ist die Ermittlung der tatsächlich aufgespulten Garnlänge L_{Ist} erforderlich. Die manuelle Ermittlung der aufgespulten Garnlänge erfolgt nach dem in Abb. 45 dargestellten Schema. Der erste Punkt umfasst die Einrichtung der Partie, bei der die entsprechenden Partiedaten wie Garnnummer, Fadenzugkraft, Bildstörung, Soll-Länge, LKF-Werte usw. eingegeben werden. Bevor die Partie jedoch gestartet werden kann, müssen für die späte-

re Auswertung die Leerhülsen mit der entsprechenden Spulstellenummer und einer laufenden Spulenummer markiert werden. Nach Beendigung des Spulprozesses wird das Schärgatter mit den markierten Kreuzspulen einer Partie bestückt und gleichzeitig abgezogen.

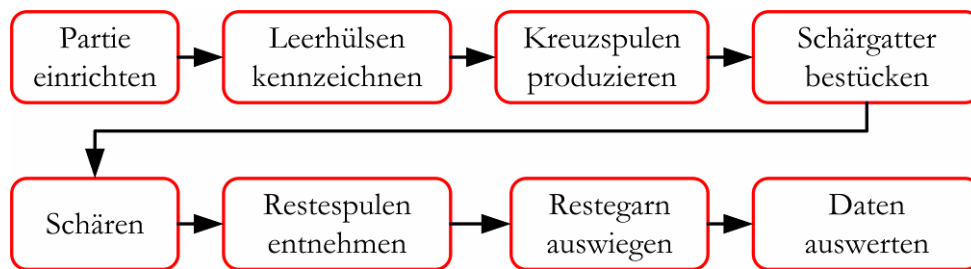


Abb. 45: Vorgang zur manuellen Bestimmung der aufgespulten Garmlänge

Der Spulenabzug erfolgte bei den Versuchen auf einem Schärautomat der Firma Benninger mit einer Abzugsgeschwindigkeit von jeweils 500 m/min. Der Schärautomat stellt eine Zettellängengenauigkeit innerhalb eines Promilles sicher. Die Restespulen werden eingesammelt und das Nettogewicht (Restegarngewicht ohne Leerhülsengewicht) wird mit einer Feinwaage bestimmt. Die tatsächlich aufgespulte Garmlänge L_{Ist} errechnet sich dann für jede einzelne Spule nach Gleichung 7-3 aus der Zettellänge L_{Zettel} addiert mit dem Produkt aus Restespulen-Nettogewicht und Garnnummer.

$$L_{Ist} = L_{Zettel} + \text{Nettogewicht} \times \text{Garnnummer} \quad 7-3$$

Durch die Markierung der Spulenhülse ist eine eindeutige Zuordnung der jeweiligen Ist-Garmlänge zu der entsprechenden Spulstelle möglich.

Die korrigierte Soll-Garmlänge ($L_{SollLDA}$ und $L_{SollEco}$) wird mit der nach diesem Schema ermittelten Ist-Garmlänge L_{Ist} verglichen. Die Auswertung der Daten erlaubt eine Aussage über die absolute Genauigkeit (absolute Abweichung von der korrigierten Soll-Garmlänge) und der relativen Genauigkeit (Streuung der Garmlängen untereinander, bzw. Gleichmäßigkeit der Spulenlänge).

7.1.3 Ergebnisse

Zur Beurteilung der erreichten LDA-Sensor-Längengenauigkeit dient der Vergleich mit den Ergebnissen des Ecopack-Systems (Korrelationsprinzip) und denen der Conometer-Methode.

Die Längengenauigkeit wird anhand von drei Kenngrößen beurteilt. Diese sind:

1. Die spulstellen- und partiebezogene Streuung: **$2\sigma_{SS}$**
2. Die gruppen- und partiebezogene Streuung: **$2\sigma_{Gr}$**
3. Die absolute Abweichung zur Garn-Soll-Länge: **$\Delta Soll$**

$2\sigma_{SS}$:

Bei der spulstellen- und partiebezogenen Streuung wird die Längensreuung einer Partie auf die mittlere Länge der jeweiligen Spulstelle bezogen. Man erhält somit die Streuung pro Spulstelle und Partie. Zunächst wird die mittlere Länge pro Spulstelle und Partie ausgerechnet. Anschließend wird die Standardabweichung über alle Spulenlängen pro Spulstelle und Partie bestimmt. Die spulstellen- und partiebezogene Streuung entspricht der zweifachen Standardabweichung. $2\sigma_{SS}$ gibt die Streuung der jeweils auf den Spulstellen montierten Messsysteme wieder.

$2\sigma_{Gr}$:

Die mit den LDA-Sensoren und den Ecopack-Systemen ausgestatteten Spulstellen bilden jeweils eine Spulstellengruppe. Die mittlere, partiebezogene Länge wird hier nicht pro Spulstelle, sondern pro Spulstellengruppe berechnet. Die gruppen- und partiebezogene Streuung bezieht sich demzufolge auf das jeweilige Messsystem.

$\Delta Soll$

$\Delta Soll$ gibt die absolute Abweichung der Ist-Länge (L_{Ist}) pro Spulstelle und Partie in Bezug zur jeweiligen Soll-Länge ($L_{SollLDA}$ bzw. $L_{SollEco}$) wieder. Diese Kenngröße steht für die absolute Längengenauigkeit des jeweiligen Messsystems in Abhängigkeit von den Partieparametern. Die absolute Abweichung wird in der täglichen Produktion üblicherweise durch den Längenkorrekturfaktor LKF kompensiert, der für jede Partie in einem Partiebuch hinterlegt ist. Das Partiebuch enthält die Partiedaten und die beim jeweiligen Gatterabzug ermittelte Restelängen. Der LKF ist ein Erfahrungswert, der über viele Partien ermittelt wurde.

Abb. 46 stellt die Längengenauigkeits-Kenngrößen $2\sigma_{SS}$, $2\sigma_{Gr}$ und $\Delta Soll$ der Partie A als dreidimensionales Histogramm dar. Die Ergebnisse der Partien A bis F

befinden sich im Anhang. Die oberen drei Histogramme entsprechen den Ergebnissen des LDA-Sensors. Die unteren drei Histogramme geben die Resultate der Ecopack-Systeme wieder. Die x-Achse entspricht der Streuung, die y-Achse der jeweiligen Spulstellenummer und die z-Achse stellt die Häufigkeit dar. Die Auflösung der x-Achse (ein Balken) entspricht einem Promille Streuung.

Wie Abb. 46 zu entnehmen ist, beträgt die spulstellen- und partiebezogene Streuung des LDA-Sensors $2\sigma_{SS(A-LDA)} = 0,49\%$ und die des Ecopack-Systems $2\sigma_{SS(A-Eco)} = 0,64\%$. Die spulstellenbezogene Streuung wird mit dem LDA-Sensor genauer erfasst als mit dem Ecopacksystem. Das gleiche gilt für die gruppenbezogene Streuung für die Partie A. Diese ist mit dem LDA-Sensor ($2\sigma_{Gr(A-LDA)} = 0,56\%$) im Vergleich zum Ecopack-System ($2\sigma_{Gr(A-Eco)} = 0,71\%$) ca. 20 % genauer gemessen worden. Eine deutliche Verbesserung ist mit dem LDA-Sensor bei der Messung der absoluten Abweichung erzielt worden. Δ_{Soll} beträgt für den LDA-Sensor $\Delta_{Soll_{A-LDA}} = 0,09\%$ und für das Ecopack-System $\Delta_{Soll_{A-Eco}} = -1,01\%$. Die absolute Länge wird mit dem LDA-Sensor also hochgenau erfasst.

In Partie B wurden Spulen mit einer deutlich höheren Soll-Länge produziert. Dies hat zur Folge, dass bei beiden Messsystemen die spulstellenbezogene Streuung abnimmt und nur noch 0,1 % bis 0,2 % beträgt. Die gruppenbezogene Streuung nimmt ebenfalls bei beiden Systemen ab, jedoch bleibt die absolute Abweichung von -1 % bei dem Ecopack-System bestehen.

Die Partien C und D zeigen prinzipiell das gleiche Verhalten wie Partie A. Bei Partie E wurde die Spulgeschwindigkeit auf 1.200 m/min gesteigert, woraufhin sich $2\sigma_{SS}$ bei beiden Systemen verbessert. $2\sigma_{Gr}$ ist beim LDA-Sensor ca. um den Faktor 2 besser als beim Ecopack-System. Die absolute Abweichung beträgt beim LDA-Sensor nur 0,1 %.

Die Spulgeschwindigkeit wurde in Partie F auf 800 m/min verringert. Hierbei vergrößerte sich $2\sigma_{SS}$ und $2\sigma_{Gr}$ bei beiden Systemen. Der LDA-Sensor weist jetzt bei $2\sigma_{Gr}$ ähnliche Ergebnisse wie das Ecopack-System auf. Die Ergebnisse stellen dar, dass die Streuungen $2\sigma_{Gr}$ und $2\sigma_{SS}$ mit zunehmender Garmlänge abnehmen. Die unterschiedliche Färbung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit. Das gleiche gilt für die Spulgeschwindigkeit. Die absolute Abweichung wird vom LDA-Sensor sehr genau bestimmt.

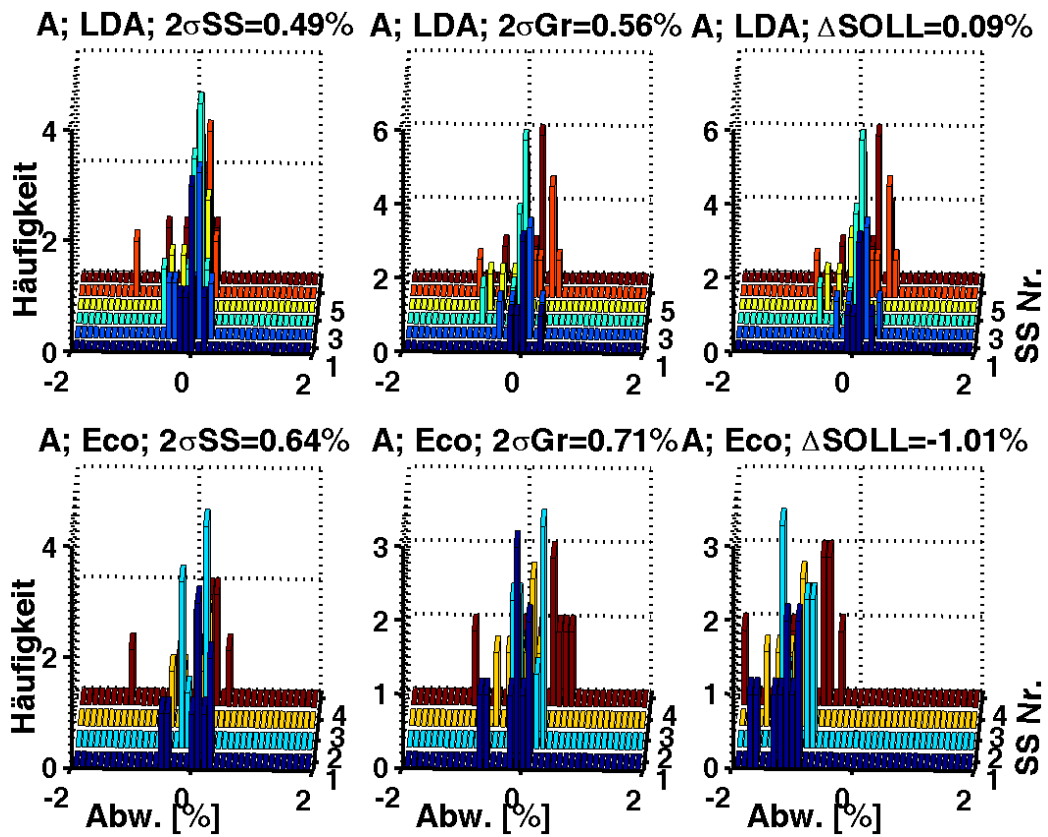


Abb. 46: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie A

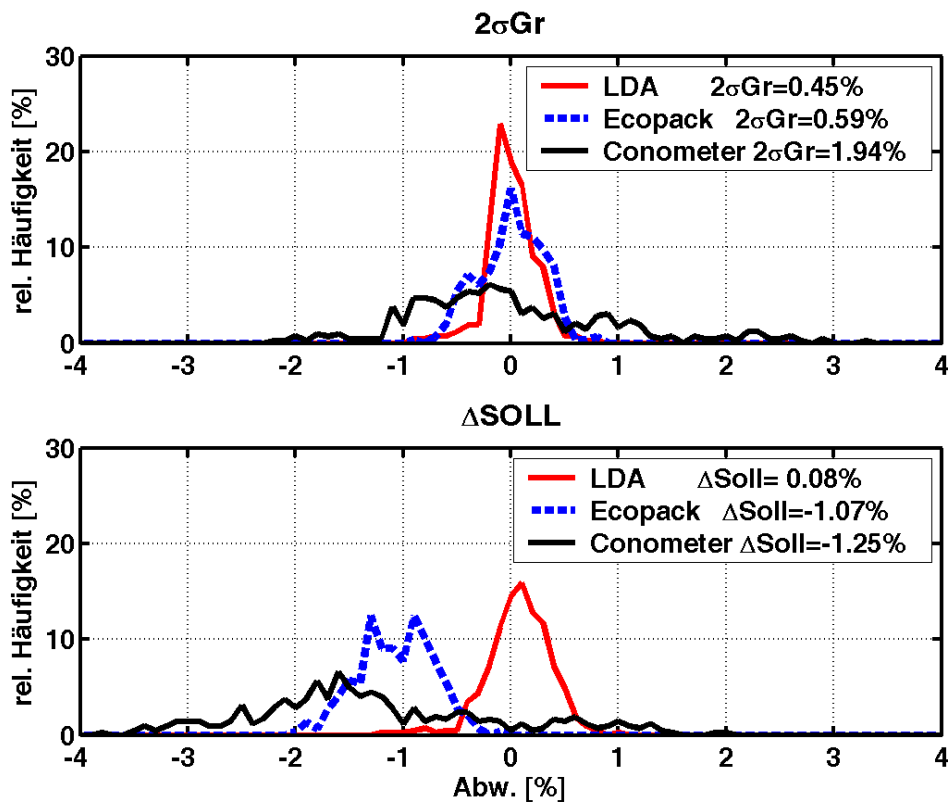


Abb. 47: Relative und absolute Längengenauigkeit

In Abb. 47 sind die Ergebnisse der gruppenbezogenen Streuung $2\sigma_{Gr}$ und die absolute Abweichung Δ_{Soll} über alle Partien zusammengefasst. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Conometer-Methode abgebildet. Bei der gruppenbezogenen Streuung ist zu beachten dass den unterschiedlichen Partien unterschiedliche Mittelwerte zu Grunde gelegt wurden.

Die Ergebnisse stellen dar, dass mit dem LDA-Sensor die gruppen- und partiebezogene Längstreuung $2\sigma_{Gr}$ wesentlich besser ist, als die der Conometer-Methode und dass die Längengenauigkeit der Ecompact-Methode übertroffen wurde. Hervorzuheben ist, dass die absolute Abweichung der Ist-Länge mit dem LDA-Sensor, im Gegensatz zu den anderen beiden Verfahren, hochgenau gemessen wurde.

Die gruppenbezogene Streuung mit dem LDA-Sensor ($2\sigma_{Gr}(LDA) = 0,45\%$) wurde im Mittel ca. 24 % besser als mit dem Ecompact-System ($2\sigma_{Gr}(Eco) = 0,59\%$) gemessen. Bezogen auf die weit verbreitete Conometer-Methode ($2\sigma_{Gr}(Con) = 1,94\%$) wurde die Streuung um den Faktor 4 verbessert.

Die absolute Abweichung Δ_{Soll} ist beim LDA-Sensor am geringsten ($\Delta_{Soll}(LDA) = 0,08\%$). Bei der Conometer-Methode liegt diese im Mittel bei $\Delta_{Soll}(Con) = -1,25\%$ und beim Ecompact-System bei $\Delta_{Soll}(LDA) = 1,07\%$ unter der Soll-Länge. Die spulstellenspezifischen Korrekturwerte wurden bei dieser Berechnung berücksichtigt.

Während des Gatterabzugs sind auslaufende Spulen zu vermeiden. Betrachtet man jeweils die kürzeste Spule, so ist diese mit dem LDA-Verfahren und bei der Ecompact-Variante bei $-1,0\%$ und mit der Conometer-Methode bei $-2,4\%$ geringer als die Soll-Länge. Die Resultate ergeben, dass bei einer Umstellung von der Conometer-Methode auf die LDA-Methode der Sicherheitszuschlag um $1,4\%$ verringert werden kann, ohne dass es zu auslaufenden Spulen kommt. Die Verringerung des Sicherheitszuschlags ist gleichbedeutend mit einer Produktivitätssteigerung der Spulmaschine. Wird die Längenabschaltung anstelle der Conometer-Methode mit dem LDA-Sensor durchgeführt, so beträgt die Produktionssteigerung der Spulmaschine $1,4\%$.

In Kapitel 4 wurde die Anforderung der Längengenauigkeit an den LDA-Sensor auf $0,5\%$ definiert, um eine Amortisation durch Ausschussreduzierung zu erreichen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass der LDA-Sensor diese Genauigkeit

unter Produktionsbedingungen erreicht. Daher ist ein wirtschaftlicher Einsatz mit dem LDA-Sensor in der Spulerei in Verbindung mit der Webereivorbereitung möglich.

7.2 Erfassung der Garnfehlerlänge mit dem LDA-Sensor

7.2.1 Aufgabenstellung

Garnreiniger erfassen Garnfehler in ihrem Durchmesser und ihrer Länge. Die genaue Funktionsweise der Durchmesser-Längenbewertung, der Klassierung und Ausreinigung wurde ausführlich in Kapitel 2.4.3 behandelt. An dieser Stelle wird die Problematik der Garnfehlerlängenbewertung nochmals anhand von Abb. 48 erläutert. Die Definition, ab wann ein Garnfehler vorliegt und wann dieser beendet ist, erfolgt anhand eines speziellen Algorithmus:

„Überschreitet der Wert des Durchmessers einen oberen Schwellwert oder unterschreitet er einen unteren Schwellwert mit einer vorbestimmten Anzahl aufeinander folgender Signale bzw. über einen vorbestimmten Zeitraum oder eine vorbestimmte Länge, wird auf den Beginn einer Fehlstelle im Faden beschlossen. Bewegt sich der Wert des Durchmessers anschließend wieder entsprechend lange, z.B. mit einer vorbestimmten Anzahl aufeinander folgender Signale, innerhalb der durch den oberen Schwellwert und den unteren Schwellwert gebildeten Zone, wird auf das Ende der Fehlerstelle geschlossen. Als Beginn oder als Ende einer Fehlerstelle wird bspw. jeweils ein Punkt definiert, an dem die Überschreitung zuerst stattgefunden hat oder, wie dargestellt, an dem die Kurve den Durchmesserwert zuletzt vor und zuerst hinter der Fehlerstelle schneidet. Die Länge der Fehlerstellen kann von Fall zu Fall variieren. Wird eine Fehlerstelle mittels eines Trigger-Algorithmus erkannt, liefert der Trigger-Prozess den Anfang und das Ende der Fehlerstelle sowie einen Mittelwert (D)“ /116/.

Die Bestimmung des mittleren Garnfehlerdurchmessers ist genau geregelt. Schwieriger ist die Bestimmung der Garnfehlerlänge. Nach Abb. 48 kann lediglich die Verweildauer des Garnfehlers in der Messkammer des Reinigers exakt bestimmt werden. Um auf die Garnfehlerlänge zu schließen, wird die Zeit mit der Spulgeschwindigkeit multipliziert. Die praktische Umsetzung erfolgt bei allen Reinigersystemen über die Conometer-Methode. Die Triggerpulse des Conometers steuern die Abtastzeit des Garnreinigers. Die Conometer-Methode gibt jedoch, wie in Abb. 49

dargestellt, nur die Spulgeschwindigkeit und nicht die momentane Garngeschwindigkeit wieder. Die Spulgeschwindigkeit ist nur ein sehr ungenaues Maß für die momentane Garngeschwindigkeit, je nach Spulparameter und Trommelgeometrie entstehen Messfehler bis zu $\pm 40\%$.

Durch Kenntnis der momentanen Garngeschwindigkeit mittels LDA-Sensor kann die Garnfehlerlängenbewertung und somit die Ausreinigung wesentlich optimiert werden (weniger Reinigerschnitte). Ziel dieser technologischen Evaluierung ist, herauszufinden, wie groß das Optimierungspotenzial hinsichtlich Garnqualität und Produktivität ist.

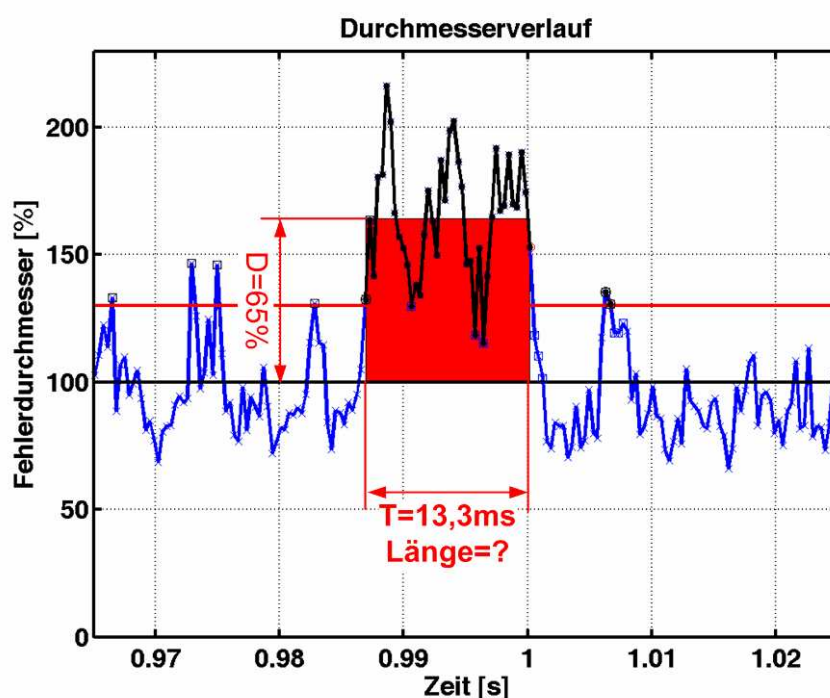


Abb. 48: Durchmesser-Längenbewertung eines Garnfehlers ($v_s = 800$ m/min)

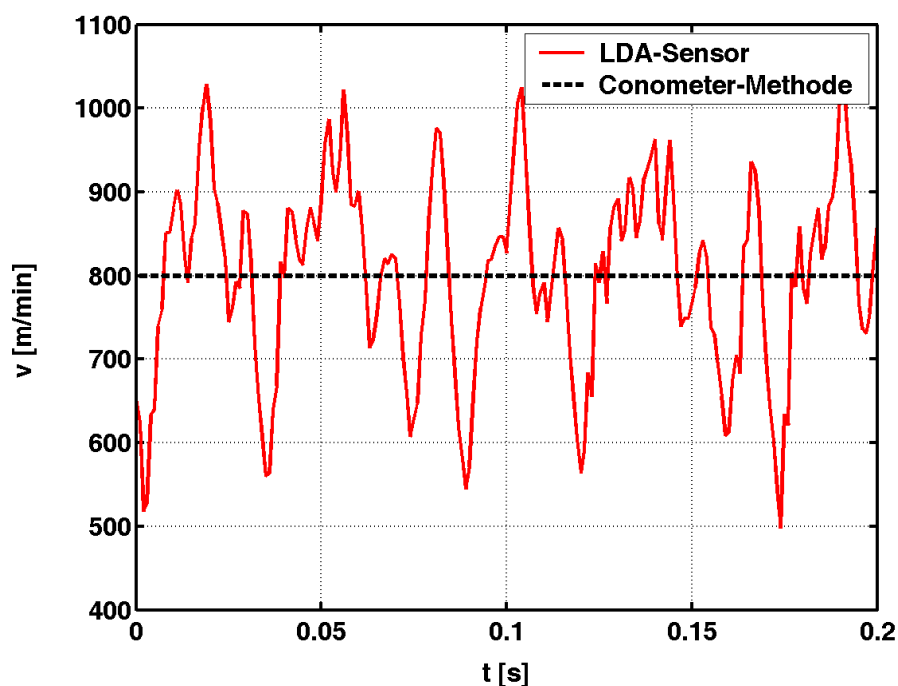


Abb. 49: Spulgeschwindigkeit mit Conometer-Methode und momentane Garngeschwindigkeit mit LDA-Sensor

7.2.2 Versuchsablauf

Zur genauen Analyse der Auswirkung der unterschiedlichen Messverfahren (LDA-Sensor und Conometer-Methode) auf die Bestimmung der Garnfehlerlänge, ist die in Abb. 50 dargestellte Versuchsanordnung erforderlich. Der Garndurchmesser wird mit Hilfe eines optischen Durchmesserensors abgetastet. Dieser Sensor wird in einen ruhigen Garnlauf der Spulstelle im Bereich des Paraffineurs angebracht. Das Durchmesserensignal wird gleichzeitig auf zwei voneinander unabhängige Analog-Digital-Wandler (ADC 1 und ADC 2) geführt.

ADC 1 wird konventionell über die Conometer-Methode getriggert. D.h. eine AD-Wandlung wird von einem Flankenwechsel des Trommeldrehgeber-Signals (im folgenden TDG genannt) ausgelöst. Das TDG-Signal ist so eingestellt, dass alle 1/64 Trommelantriebs-Umdrehungen ein Flankenwechsel generiert wird. Dies entspricht im Mittel 5 mm Garn.

ADC 2 wird vom hochdynamischen LDA-Signal getriggert. Da die momentane Garngeschwindigkeit durch den LDA-Sensor gemessen wird, findet eine AD-Wandlung exakt nach 5 mm gespultem Garn statt.

Die beiden Durchmessersignale werden mit Hilfe eines dSpace®-Messwerverfassungssystems vorausgewertet und abgespeichert. Die Offline-Daten werden mit Matlab® analysiert. Die Analyse beinhaltet die Durchmesser-Längenbewertung, Klassierung und Ausreinigung.

Diese Versuchsanordnung erlaubt eine gleichzeitige Aufnahme von Garnfehlern mit TDG- und LDA-Signalen. Des Weiteren wird der Einfluss der Garndynamik auf die Garnfehler-Längenbewertung analysiert. Die so ermittelten Garnfehler werden zum Vergleich „Offline“ in Fehlermatrizen eingeordnet und über eine Reinerkerkurve ausgereinigt⁴. Dadurch wird eine Aussage über das Optimierungspotential der Fehlerklassierung, der Schnittrate und der Maschinenproduktivität möglich.

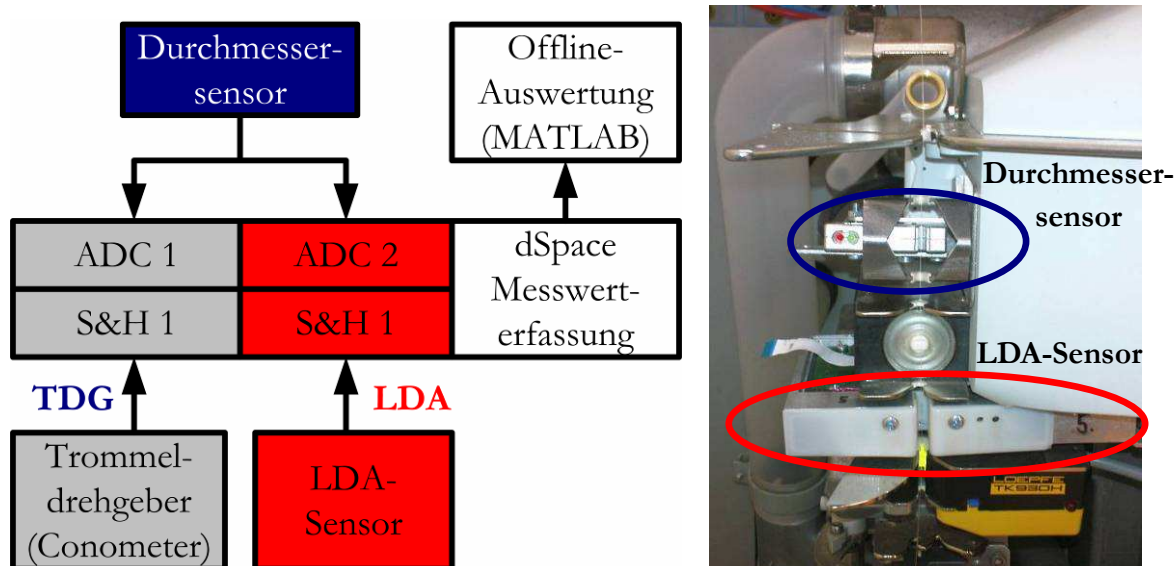


Abb. 50: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Garnfehlerlänge mit LDA-Sensor und Conometer-Methode

7.2.3 Ergebnisse

Abb. 51 stellt den Vergleich zwischen einer Garnfehler-Längenbewertung mit der herkömmlichen TDG-Abtastung (Conometer) und der hochdynamischen LDA-Abtastung dar. Im oberen Diagramm ist der Durchmesser Verlauf des Garns abgebildet. Der mit dem Rechteck hinterlegte Bereich stellt einen Garnfehler dar (Dickstelle). Die x-Achse entspricht der Zeit. Das mittlere Diagramm zeigt die mit den beiden Abtastmethoden gemessene Geschwindigkeit und dient als Berechnungsgrundlage für die Garnfehlerlänge. Im Bereich des Garnfehlers ist die mit dem

⁴ Die Ausreinigung wird nur simuliert.

LDA-Sensor gemessene Garngeschwindigkeit aufgrund der Changierung stellenweise sehr viel geringer als die mit der TDG-Methode erfasste Spulgeschwindigkeit. Folglich ist auch die mit der LDA-Abtastung gemessene Garnfehlerlänge geringer, als die mit der TDG-Abtastung. Da die Garngeschwindigkeit für die Garnfehlerlänge relevant ist, wird die exakte Längenbewertung vom LDA-Sensor durchgeführt. Das untere Diagramm stellt den Längenzuwachs der beiden Abtastmethoden dar. Der Längenzuwachs ist bei der TDG-Abtastung aufgrund der konstanten Spulgeschwindigkeit konstant steigend. Der Längenzuwachs bei der LDA-Abtastung passt sich der momentanen Garngeschwindigkeit an. Bei geringerer Garngeschwindigkeit ist die Steigung des Längenzuwachses ebenfalls geringer und umgekehrt. In diesem Beispiel ist die mit der TDG-Abtastung ermittelte Garnfehlerlänge im Vergleich zur LDA-Abtastung ca. 40 % zu lang bewertet.

Abb. 52 stellt den gleichen Sachverhalt dar, bei dem die momentane Garngeschwindigkeit größer als die Spulgeschwindigkeit ist. Hier wird die Garnfehlerlänge durch die TDG-Abtastung um ca. 20 % zu kurz bewertet.

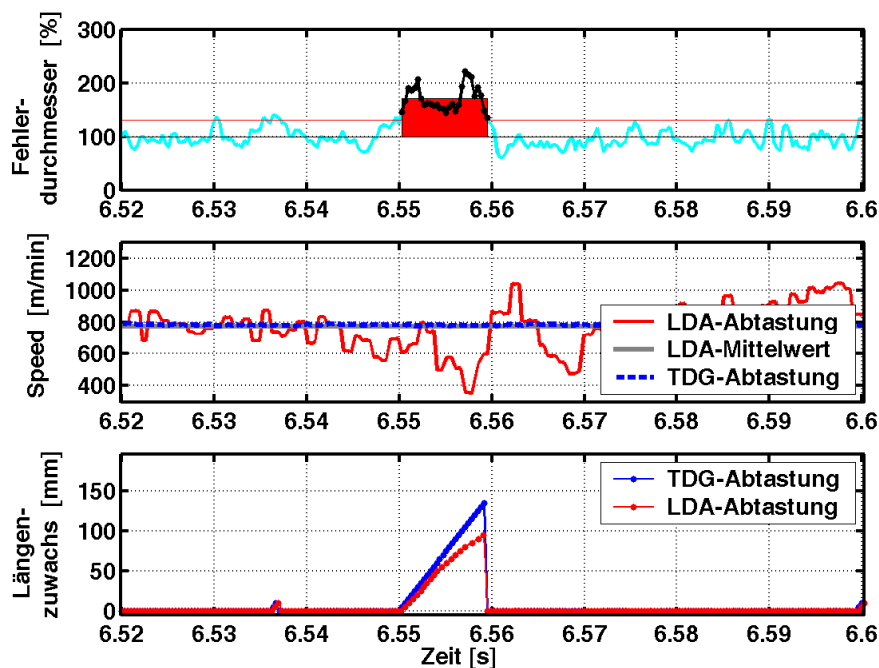


Abb. 51: Beispiel eines durch die TDG-Abtastung zu lang bewerteten Fehlers

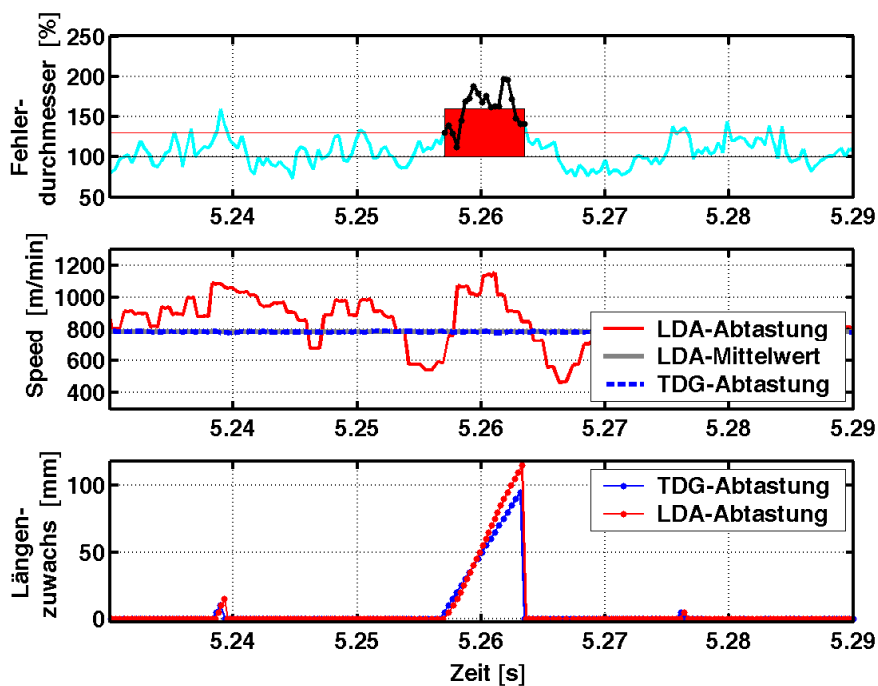


Abb. 52: Beispiel eines durch die TDG-Abtastung zu kurz bewerteten Fehlers

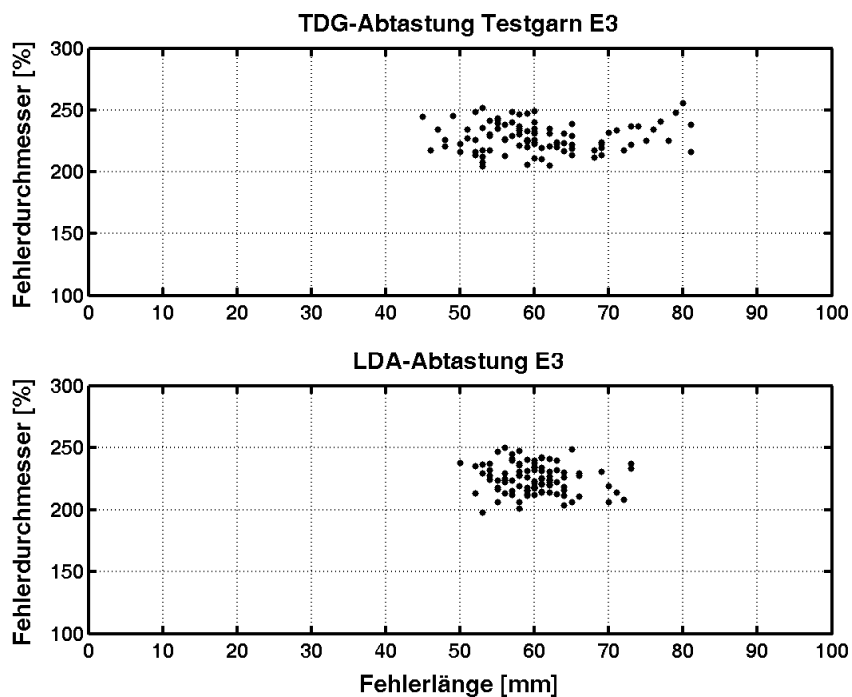


Abb. 53: Auswirkung der unterschiedlichen Abtastmethoden auf die Klassiermatrix am Beispiel von Effektgarn

Die unterschiedlich bewertete Garnfehlerlänge hat Einfluss auf die Klassierung des Garnfehlers, wie Abb. 53 verdeutlicht. Die Diagramme stellen die Klassiermatrix für ein Testgarn⁵ dar.

Das obere Diagramm zeigt die Klassierwolke für das Testgarn nach der TDG-Abtastung. Die untere Matrix gibt die Klassierung für das gleiche Garn nach der LDA-Abtastung wieder. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Punktwolke bei der LDA-Abtastung in Richtung der Fehlerlängenchse wesentlich kompakter dargestellt wird. Dies zeigt, dass die Garnfehlerlängenbewertung durch die TDG-Abtastung ungenau ist. Die Garnfehlerlängenbewertung wird durch die Ansteuerung mit der hochdynamischen LDA-Abtastung wesentlich verbessert.

Abb. 54 gibt den gleichen Sachverhalt in einer anderen Darstellung wieder. Die Klassiermatrix stellt das Ergebnis für ein Testgarn⁶ mit zwei unterschiedlichen Arten von Dickstellen dar. Der Bereich zwischen 50 mm und 120 mm zeigt den Dickstellen-Typ A und der Bereich oberhalb von 120 mm gibt den Dickstellen-Typ B wieder. Der Bereich unterhalb von 50 mm entspricht den „häufigen Garn-Unregelmäßigkeiten“, dem so genannten Garnkörper. Die Punkte geben die Garnfehler über die LDA-Abtastung wieder. Die Kreise wurden über die TDG-Abtastung ermittelt. Die Verbindungslinien stellen ein- und denselben Garnfehler dar, die jedoch mit den beiden unterschiedlichen Abtastmethoden unterschiedlich lang bewertet wurden. Die einzelstehenden Punkte wurden von beiden Abtastmethoden gleich lang bewertet. Je länger die Verbindungslinie ist, desto größer ist der Fehler bei der Garnfehlerlängenbewertung. Theoretische Vorüberlegungen haben ergeben, dass der relative Fehler bei der Garnfehlerlängenbewertung umso größer werden kann, je kürzer der Garnfehler ist. Z.B. sind bei sehr kurzen Dickstellen, bzw. Nissen Fehler von 100 % möglich. Je länger die Garnfehler werden, desto geringer ist auch der Fehler bei der Längenbewertung.

⁵ 100 % BW, Nm 56; Dickstellen mit Massenzunahme +300 %, Länge 50 mm

⁶ 100 % BW, Nm 34, Dickstelle A: Massenzunahme +210 %, Länge: 70 mm,
Dickstelle B: Massenzunahme +170 %, Länge: 200 mm

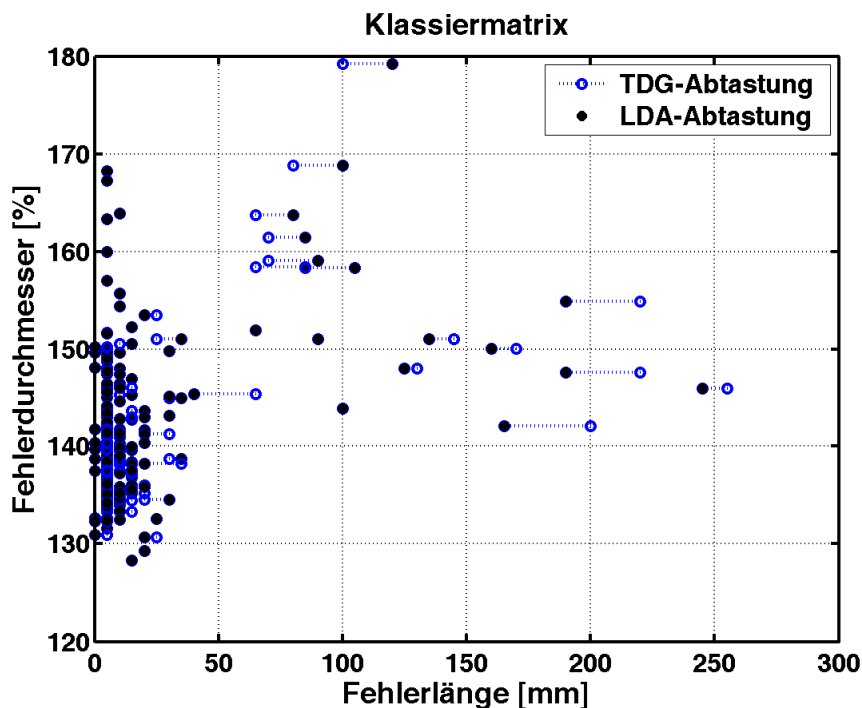


Abb. 54: Auswirkung der unterschiedlichen Abtastmethoden auf die Klassiermatrix

Nachfolgend wird untersucht, wie sich der Fehler bei der Längenbewertung auf die Ausreinigung auswirkt. Die Untersuchung findet an speziellem Testgarn⁷ statt, bei dem sich die Garnfehler nahe am Garnkörper befinden. Die Klassiermatrix des Testgarns ist in Abb. 55 dargestellt. Unten findet sich die Klassierung über die LDA-Abtastung wieder. Bei dieser Darstellung fallen zwei Anhäufungen auf, die in zwei Gruppen unterteilt werden. Der erste Bereich stammt vom Garnkörper und stellt die „nicht störenden“ Garnfehler dar (Fehler-Länge < 150 mm). Der zweite Bereich sind die störenden Garnfehler (Fehler-Länge > 150 mm).

Dieselben Garnfehler, die gleichzeitig von der TDG-Abtastung bewertet wurden sind im oberen Diagramm dargestellt. In diesem Diagramm ist eine Unterscheidung der beiden Gruppen mit dem Auge nicht möglich. Die Garnfehler verschwimmen durch den Fehler der TDG-Abtastung bei der Längenbewertung. Dies hat Auswirkungen auf die Ausreinigung, wie in Abb. 56 dargestellt wird.

⁷ 100 % BW, Nm 48, Dickstellen mit Massezunahme +70 %, Länge: 150 mm

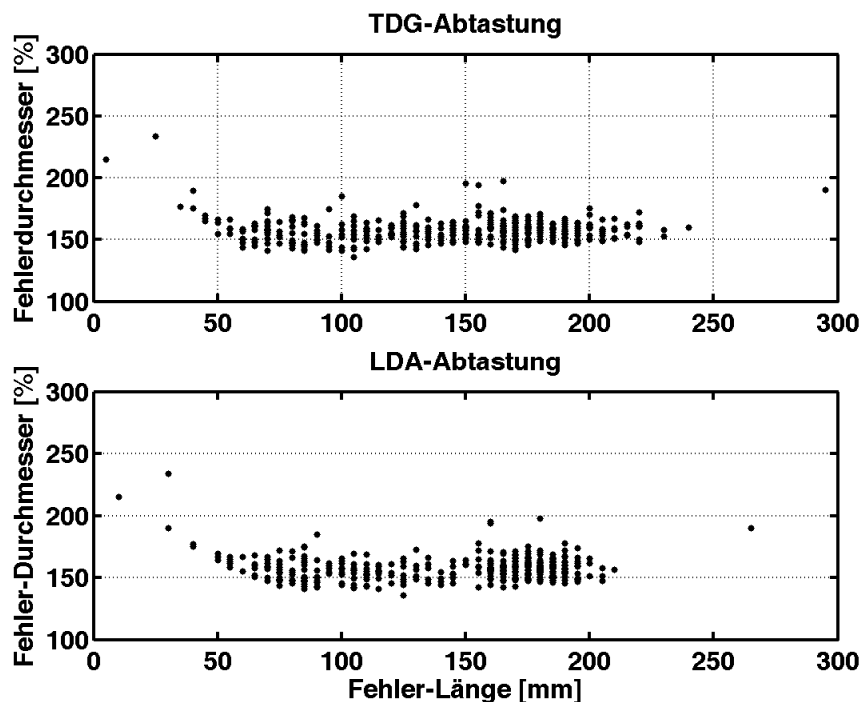


Abb. 55: Auswirkung der unterschiedlichen Abtastmethoden auf die Klassiermatrix am Beispiel eines Testgarns

Im unteren Diagramm in Abb. 56 trennt die Reinigerkurve die störenden von den nicht störenden Garnfehlern. Die Garnfehler die bei der LDA-Abtastung als störend markiert wurden, können im Diagramm der TDG-Abtastung jedoch aufgrund der fehlerhaften Längenbewertung entlang der Fehler-Längen-Achse „wandern“ und so unter die Reinigerkurve gelangen. Diese Garnfehler werden bei der TDG-Abtastung nicht ausgereinigt. Bei der TDG-Abtastung werden also störende Garnfehler übersehen.

Die umgekehrte Situation tritt ebenfalls auf. Nicht störende Garnfehler „wandern“ entlang der Fehler-Längen-Achse und treten oberhalb der Reinigerkurve auf. Bei der TDG-Abtastung werden Garnfehler unnötig ausgereinigt.

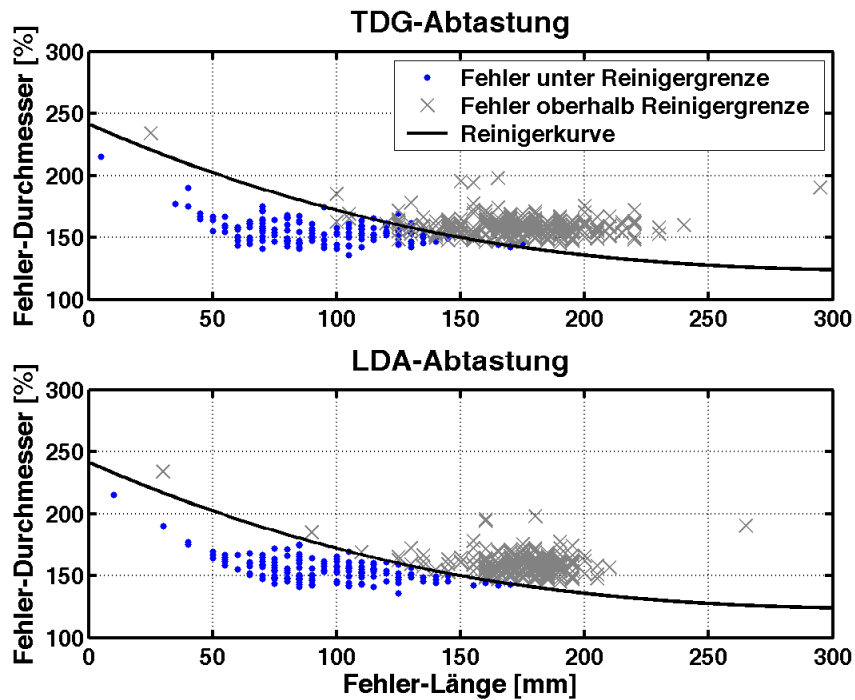


Abb. 56: Trennung zwischen „störenden“ und „nicht-störenden“ Garnfehlern durch Einbringen einer Reinigerkurve

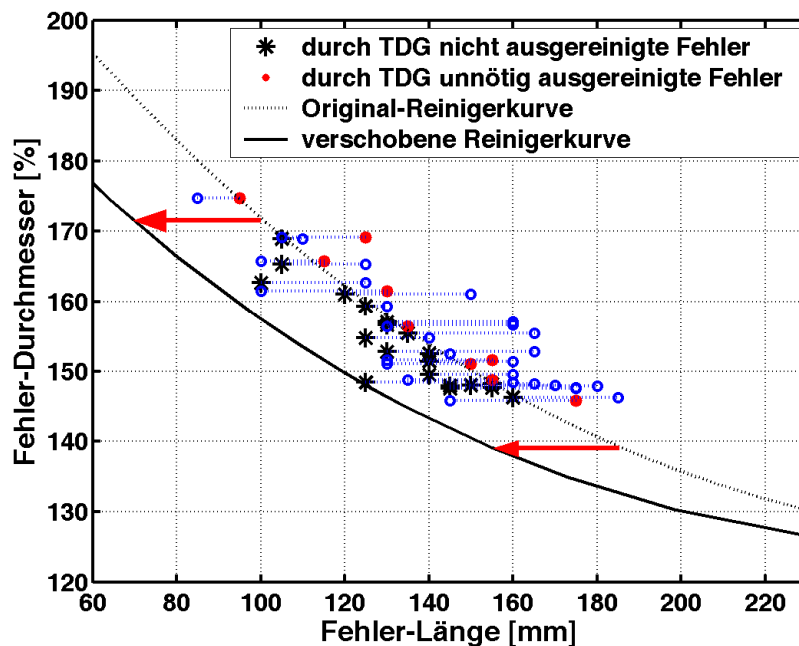


Abb. 57: Entfernen aller störenden Garnfehler bei der TDG-Abtastung durch Verschieben der Reinigerkurve

Abb. 57 gibt einen Ausschnitt aus dem TDG-Diagramm aus Abb. 56 wieder. Die Kreise stellen die Garnfehler aus Sicht der LDA-Abtastung dar. Die Verbindungslinie verknüpft den jeweils selben Fehler aus Sicht der TDG-Abtastung. Ein Punkt

am rechten Ende dieser Linie steht für einen Garnfehler, der durch die TDG-Abtastung unnötig ausgereinigt wurde, da der eigentliche Garnfehler unterhalb der Reinigerkurve liegt. Ein Stern am linken Ende der Verbindungslinie wurde durch die TDG-Abtastung übersehen, da der eigentliche Garnfehler oberhalb der Reinigerkurve liegt.

Um dennoch mit der TDG-Methode alle störenden Garnfehler auszureinigen zu können, muss, wie in Abb. 57 dargestellt, die Reinigerkurve so lange nach links verschoben werden, bis auch der letzte übersehene Garnfehler oberhalb der Reinigerkurve liegt.

Durch die Verschiebung werden jedoch sehr viele Garnfehler aus dem Garn ausgereinigt, die im fertigen Endprodukt nicht gestört hätten. Diese Garnfehler entsprechen den Punkten in Abb. 58. Diese Punkte wurden in Abb. 57 aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Die Reinigerschnittzahl nimmt demnach bei Verschiebung der Reinigerkurve unnötig zu.

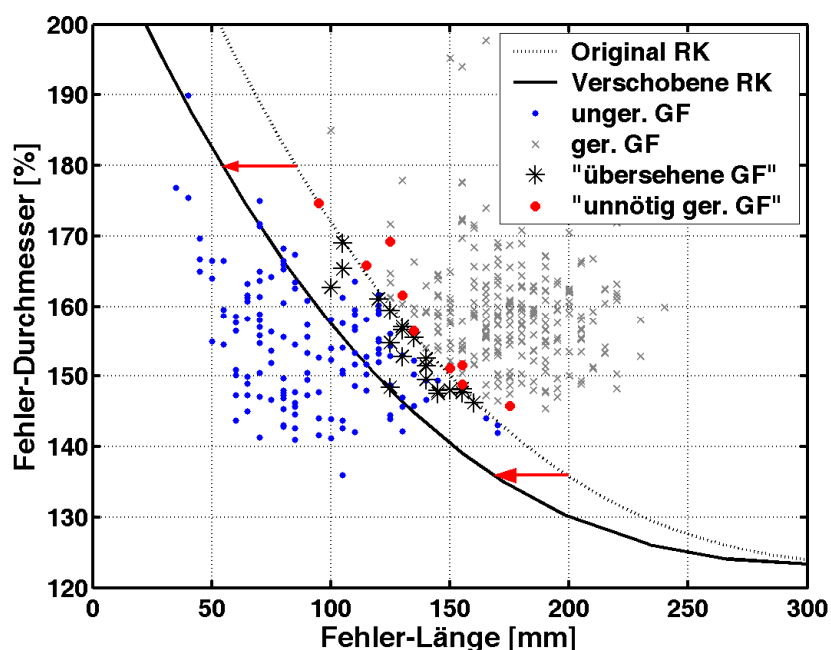


Abb. 58: Das Verschieben der Reinigerkurve bewirkt einen Anstieg in der Reinigerschnitttrate

Durch eine Garnfehler-Längenabtastung mit dem hochdynamischen LDA-Signal werden die störenden von den nicht-störenden Garnfehlern exakt getrennt. Durch die LDA-Abtastung werden in diesem Beispiel 267 Garnfehler ausgereinigt. Möchte man Garn mit der TDG-Abtastung produzieren, bei dem die störenden Garn-

fehler ebenfalls sicher ausgereinigt werden, so muss die Reinigerkurve so lange nach links verschoben werden, bis alle störenden Garnfehler erfasst werden. Bei diesem Beispiel wurden mit TDG-Abtastung 20 Garnfehler übersehen und 9 Garnfehler unnötig ausgereinigt. Durch die Verschiebung wandern jedoch noch weitere Garnfehler über die Reinigerkurve, so dass mit der TDG-Abtastung insgesamt 321 Garnfehler ausgereinigt werden.

In dem hier gezeigten Beispiel steigt die Reinigerschnittzahl durch die TDG-Abtastung um 20 %.

Durch die geringere Schnittzahl im Vergleich zur TDG-Abtastung ergeben sich eine Qualitätsverbesserung des Garns und eine Steigerung der Produktivität.

Jeder Reinigerschnitt erfordert eine Garnverbindung, die in den meisten Fällen durch Spleißer realisiert wird. Die Spleißer haben meist einen ungleichmäßigeren Garndurchmesser und eine geringere Festigkeit. Durch die LDA-Abtastung verringert sich die Anzahl der Garnschnitte und somit die Anzahl der Spleißer. Die Garnqualität steigt.

Bei einer qualitativ hochwertigen Garnvorlage beträgt die Reinigerschnitttrate 20, bei einer schlechten Vorlage 100 Schnitte auf 100 km /99/. Als normale Schnitttrate werden 60 Reinigerschnitte auf 100 km angesehen. Für die Berechnung der Spulzeit wurden folgende Kenngrößen zu Grunde gelegt:

- Spulgeschwindigkeit 1.200 m/min
- Garnnummer Nm 50
- Kopsgewicht 84 g
- Schaltzeit (Spleißverbindung etc.) 7 s
- Hochlaufzeit 13 s
- Kopswechselzeit 4 s
- 20 % weniger Reinigerschnitte durch die hochdynamische LDA-Abtastung im Vergleich zur TDG-Abtastung

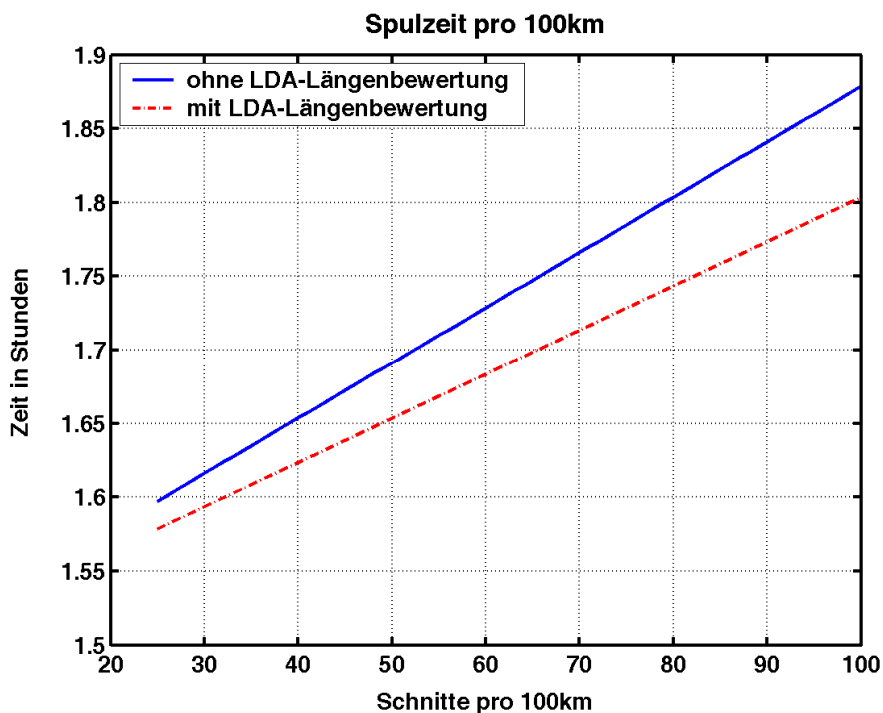


Abb. 59: Spulzeit mit und ohne LDA-Längenbewertung bei 1.200 m/min und 100 km Spulenlänge

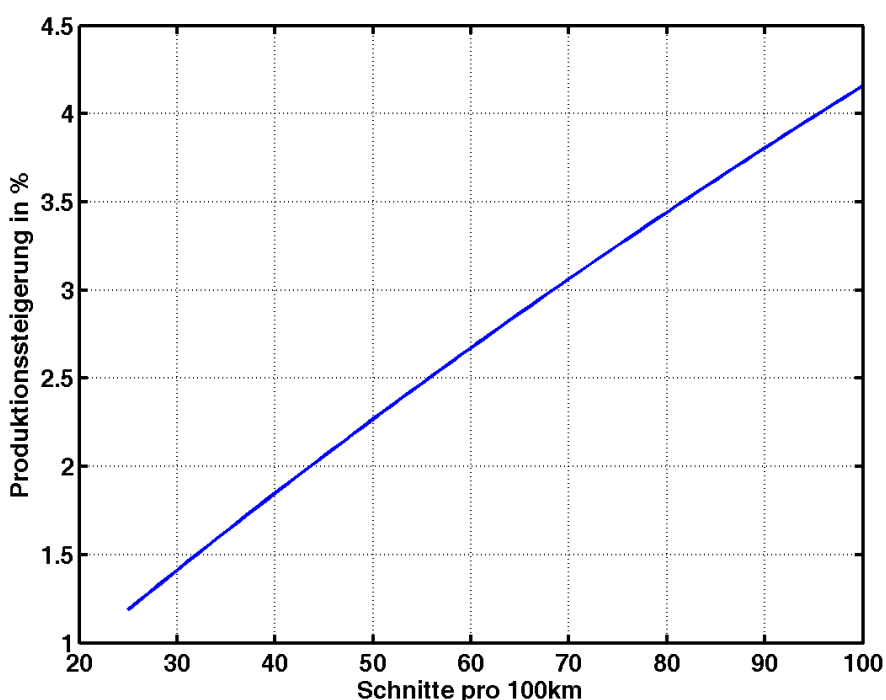


Abb. 60: Produktionssteigerung durch LDA-Abtastung bei 1.200 m/min

Die Hochlaufzeit eines Kopswechsels setzt sich zusammen aus der Schaltzeit, Kopswechselzeit und Hochlaufzeit. Für die Produktion einer 100 km-Spule ist bei oben genannter Garnnummer und Kopsgewicht 23 von kopswechselbedingten

Hochläufe auszugehen. Die Reinigerschnittzeit entspricht der Summe aus Schaltzeit und Hochlaufzeit. Die Spulzeit entspricht der Summe aus Kopswechselzeit, Reinigerschnittzeit und Produktionszeit.

Durch die LDA-Abtastung verringert sich die Anzahl der Reinigerschnitte. Dies hat eine Verkürzung der Reinigerschnittzeit und somit eine kürzere Spulzeit zur Folge, wie Abb. 59 verdeutlicht.

Abb. 60 stellt die Produktivitätssteigerung durch die hochdynamische LDA-Abtastung in Abhängigkeit von der Reinigerschnittzahl dar. Ausgehend von einer mittleren Garnqualität (60 Schnitte auf 100 km bei TDG-Abtastung) beträgt die erzielbare Produktivitätssteigerung durch weniger Reinigerschnitte 2,7 %. Bei einer schlechten Vorlage (100 Schnitte auf 100 km bei TDG-Abtastung) ist eine Steigerung von bis zu 4 % möglich.

7.2.4 Fazit

Die hochdynamische LDA-Längenabtastung ermöglicht erstmals eine hochgenaue Darstellung der Garnfehlerlänge in der Klassiermatrix. Dies verbessert nicht nur die Visualisierung der im Garn vorhandenen Garnfehler, sondern ermöglicht auch eine genau definierte Ausreinigung von Garnfehlern. Dies hat zur Folge dass weniger Reinigerschnitte für die gewünschte Garnqualität erforderlich sind als bisher. Die Garnqualität wird nicht durch unnötige Garnverbindungen vermindert und die Spulstellenproduktivität steigt durch weniger Reinigerschnitte.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Spulerei ist eine wichtige technologische Fertigungsstufe zwischen Ringspinnerei und den Weiterverarbeitungsprozessen, wie beispielsweise der Weberei, Strickerei oder Wirkerei. Neben der eigentlichen Hauptaufgabe, dem Umspulen von Kopsen zu Kreuzspulen, hat die Spulerei eine wichtige Funktion zur 100 %-Qualitätskontrolle übernommen. Die Hochleistungs-Spulmaschinen sind mit zahlreichen Sensoren und Aktoren ausgerüstet, um die Qualität der erzeugten Ware vollständig zu kontrollieren und zu verbessern. Zusätzlich sind die Maschinenhersteller bestrebt, die Maschinenproduktivität immer weiter zu steigern. Je besser der Spulprozess überwacht werden kann, desto besser lässt sich die Spulen- und Garnqualität optimieren und die Maschinenproduktivität steigern.

Bis heute ist es jedoch nicht gelungen, eine der wichtigsten Prozessgrößen in der Spulerei mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand serienmäßig in jeder einzelnen Spulstelle zu erfassen, die „momentane Garngeschwindigkeit“. Diese enthält einen sehr hohen Informationsgehalt über den Spulprozess, da im Garngeschwindigkeitsverlauf signifikante, qualitätsbestimmende Prozessgrößen des Spulprozesses enthalten sind (Garnfehlerlänge, Changierung, Fadenbelastung usw.)

Ziel dieser Arbeit ist es, eine geeignete Messtechnik zu entwickeln, die serienmäßig in jeder einzelnen Spulstelle einer Spulmaschine eingesetzt werden kann und zu einer Erhöhung der Spulen- und Garnqualität, sowie zu einer Steigerung der Spulstellenproduktivität führt.

Eine Analyse des Spulvorgangs verdeutlicht, warum die momentane Garngeschwindigkeit bis heute noch nicht serienmäßig erfasst wird. Nachfolgend sind nur einige Beispiele genannt:

- Auf das Garn wirken enorme Beschleunigungen
- Hohe Geschwindigkeitsschwankungen
- Die geforderte Messgenauigkeit liegt im Promille-Bereich
- Das Messverfahren muss berührungslos arbeiten um Schlupf und Beschädigungen am Garn zu vermeiden
- Die Messtechnik muss über einen langen Zeitraum zuverlässig und wartungsarm arbeiten
- Die Investitionen müssen sich innerhalb kurzer Zeit amortisieren

Die Analyse verschiedener Messverfahren hat ergeben, dass die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) das größte Potential hat, die momentane Garngeschwindigkeit unter den gegebenen Anforderungen zu messen. Die LDA-Methode arbeitet berührungslos, hochgenau und hochdynamisch. Jedoch ist insbesondere der Platzbedarf bisheriger LDA-Systeme relativ groß und die Anschaffungs- und Betriebskosten lassen einen wirtschaftlichen Einsatz in der Spulerei nicht zu.

In dieser Arbeit wurde speziell für den Spulprozess ein neuartiges LDA-Sensor-Konzept entwickelt und zum Patent angemeldet /106-108/. Dieses Konzept vereint erstmals die Vorteile der LDA-Technologie (berührungslos, hochgenau und hochdynamisch) mit einer kostengünstigen und kompakten Sensorbauweise. Dies gelingt durch den Einsatz modernster elektronischer Komponenten (FPGA-Technologie) und der Verwendung von aktuellen VCSEL-Halbleiterlasern, sowie einer für die LDA-Technik neuartigen Strahlaufteilung und Strahlführung. Durch diese Kombination wird für die Messung am laufenden Garn die hohe Funktionalität von Labor-LDA's erreicht, das jedoch mit einem wesentlich geringeren Aufwand. Somit ist eine wirtschaftliche Anwendung der LDA-Technologie im Spulbetrieb erstmals möglich.

Zur Verfahrensabsicherung wurden Vergleichsmessungen mit einem als Referenz dienenden Labor-LDA durchgeführt. Die Untersuchungen haben ergeben, dass trotz der enormen Miniaturisierung und dem kostengünstigen Aufbau, die gleiche Messgenauigkeit erreicht wird, wie bei einem hochwertigen Labor-LDA.

Durch Kenntnis der momentanen Garngeschwindigkeit eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Optimierung des Spulprozesses. In dieser Arbeit wurde untersucht, welche Qualitäts- und Produktivitätssteigerungen durch Einsatz des LDA-Sensors bei der Messung der aufgespulten Garnlänge und der Erfassung der Garnfehlerlänge zu erzielen sind:

1. Messung der aufgespulten Garnlänge: Durch Messung der momentanen Garngeschwindigkeit erhält man durch zeitliche Integration die aufgespulte Garnlänge. Normalerweise wird die Garnlänge mit der relativ ungenauen aber kostengünstigen Conometer-Methode bestimmt, bei der die aufgespulte Länge aus der Trommel-drehzahl abgeleitet wird. Die aufgespulte Garnlänge ist insbesondere für die Webe-reivorbereitung interessant. Dort wird eine möglichst gleichmäßige Spulenlänge angestrebt, um den Ausschuss bei Gatterabzug zu minimieren. Das genaueste auf dem Markt erhältliche Garnlängenmessgerät für die Spulerei ist das so genannte

„Ecopack-System“ der Firma Oerlikon Schlafhorst, das nach der Korrelationsmethode arbeitet. Vergleichsmessungen unter Produktionsbedingungen zwischen der Conometer-Methode, dem Ecopack-System und dem LDA-Sensor haben ergeben, dass die Längengenauigkeit des LDA-Sensors signifikant besser ist, als die der beiden Vergleichssysteme. Die gesteigerte Längengenauigkeit stellt eine Verbesserung der Spulenqualität insbesondere für die Webereivorbereitung dar. Die Investitionskosten des LDA-Sensors amortisieren sich durch die Ausschussverringerung beim Gatterabzug. Zusätzlich kann, durch die hohe Längengenauigkeit des LDA-Sensors der Längenkorrekturfaktor verringert werden, wodurch die Spulstellen-Produktivität verbessert wird.

2. Erfassung der Garnfehlerlänge mit LDA-Sensor: Moderne Garnreiniger bewerten Garnfehler nach ihrem mittleren Durchmesser und ihrer Länge. Die Bewertung der Garnfehlerlänge basiert auf der Spulgeschwindigkeit. Die Spulgeschwindigkeit entspricht jedoch nicht der hochdynamischen, tatsächlichen Garngeschwindigkeit. Dadurch entstehen bei der Garnfehler-Längenbewertung große Fehler. Durch den LDA-Sensor ist die hochdynamische Garngeschwindigkeit erstmals im Spulprozess messbar. Die Untersuchungen haben ergeben, dass durch eine hochdynamische Ansteuerung die Garnfehler-Längenbewertung deutlich verbessert und dadurch die Reinigerschnittzahl verringert werden konnte. Durch die Verringerung der Reinigerschnitte nimmt auch die Zahl der Spleißer ab wodurch die Garnqualität steigt. Weniger Reinigerschnitte bedeuten auch weniger Stillstandszeiten der Spulstelle, wodurch die Produktivität gesteigert wird.

In dieser Arbeit wurden zwei Möglichkeiten zur Optimierung des Spulprozesses beim Einsatz des neuartigen LDA-Sensors untersucht. Es ist sinnvoll, zukünftig weitere Optimierungsmöglichkeiten auszuarbeiten, als Beispiele seien die Überwachung der Garnverlegung auf der Spuloberfläche und die weitere Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Garngeschwindigkeit und Fadenzugkraft genannt.

Der neu entwickelte LDA-Sensor ist ein kostengünstiges, berührungslos und hochgenau arbeitendes Messsystem, welches für den Einsatz in der Spulerei optimiert wurde. Das Sensor-Konzept ist jedoch nicht auf den Einsatz in der Spulerei beschränkt. Es lässt sich auch auf weitere textile Verfahren zur Messung der Garngeschwindigkeit und daraus ableitbare Größen anwenden. Weiterführende Arbeiten können klären, in welchen Bereichen der textilen Verarbeitungskette sich die neu entwickelte LDA-Sensor-Technologie sinnvoll einsetzen lässt.

9 Literaturverzeichnis

- /1/ Schutzrecht DE 2351463 B2 (05.09.1973). Makino, S., Otobe, S, Yamamoto, S.: Längenmeßeinrichtung bei einer Garnwickelvorrichtung.
- /2/ Schutzrecht CH 448 836 (11.04.1068). Loepfe, Dr. E.: Verfahren und Vorrichtung zur Kontrolle eines laufenden Fadens insbesondere in einer Textilfadenspulmaschine.
- /3/ Simon, L., Hübner, M.: Vorbereitungstechnik für die Weberei, Wirkerei und Strickerei, Berlin: Springer-Verlag, 1983, ISBN: 3-540-12765-8
- /4/ Sahm, V.: Handbuch der Spultechnik. Eschwege, 1995
- /5/ Datta, B.: Winding: Yesterday and Today. In: The Indian Textile Journal (04/1997), Heft 7, Vol. 103, S. 90-93.
- /6/ Thomas U.: Steuerung und Überwachung der Produktivität und Flexibilität in der Spulerei. In: VDI Berichte (1988), Nr. 686, S. 49-59.
- /7/ Arbeitgeberkreis Gesamttextil: Webereitechnik, Herstellen von Geweben. Eschborn, 1997
- /8/ Schlichter, S., Lünenschloß, J.: Auswirkungen von Garnbrüchen beim Ring- und OE-Rotorspinnen auf die Garneigenschaften und das Laufverhalten in Webereivorbereitung und Weberei. In: Melliand Textilberichte (1986), Nr. 1, S. 12-18.
- /9/ Artzt, P., Ausheyks, L.: Analyse der Garnablaufverhältnisse von Spinnkopsen beim Hochleistungsspulprozess. In: Melliand Textilberichte (2002), Nr. 7-8, S. 520-522.
- /10/ Hartel, R., Brockmanns, K.-J., Röttgering, J.: Spulen im Spannungsfeld zwischen Qualität und Wirtschaftlichkeit. Referat 4. Chemnitzer Textilmaschinentagung (1993).
- /11/ Kappeler, H.: Spulerei technologisch im Aufwind. In: Chemiefasern/Textilindustrie (12/1987), Nr. 37, Jahrgang 89, S. 1250-1253.
- /12/ Douglas, K., Schaufelberger, M.: Online-System zur Qualitätssicherung in der Spulerei. In: Chemiefasern/Textilindustrie (12/1993), Nr. 43, S. 973-976.
- /13/ Burkhardt, D.: Spulmaschinen und Garnreinigung - Produktivität und Qualität für die Weiterverarbeitung. In: International Textile Bulletin (1999) Nr. 4, S. 34-36.

- /14/ Gebald, G.: Vorteile für Anwender. In: textile network (2006), Nr. 6
- /15/ Frey, M., Douglas, K.: Anforderungsprofil von Ringgarnen für die Wirkerei/Strickerei. Zellweger Uster AG (Hrsg.), 35. Kongress der Internationalen Föderation von Wirkerei- und Strickerei-Fachleuten (19.-22.09.1993), Ebnet-Kappel, Schweiz.
- /16/ Braun, M.: Ursachen unterschiedlicher Lauflängen beim Spulen, Zetteln und Schlichten unter besonderer Berücksichtigung dadurch entstehender Fertigungsverluste. Stuttgart, Universität, Dissertation, 1978.
- /17/ Schutzrecht EP 124475 A2 (07.11.1984). Stutz, H., Coi, B.: Längenmessvorrichtung für einen Faden.
- /18/ Schutzrecht DE 3143451 C2 (27.05.1982). Stutz, H.: Vorrichtung zum Messen der Länge eines auf einem Wickel aufgespulten endlosen Materials.
- /19/ Schutzrecht EP 1775249 A1 (18.04.2007). Badiali, R., Colomberotto, G., Claut, D.: Device and process for the precision measurement of the length of thread wound onto a bobbin.
- /20/ Savio Macchine Tessili S.P.A, Polar - Automatic winder. Pordenone/Italy, 09/2007 S. 13 – Firmenschrift.
- /21/ Schutzrecht CH 588 067 (31.05.1977). Giles, D. B.: Verfahren zur kontinuierlichen Messung der Länge eines Materials sowie Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens.
- /22/ Schutzrecht EP 1 787 935 A1 (23.05.2007). Muta, K.: A yarn length measuring device for a yarn winding device.
- /23/ Schutzrecht CH 473 378 (12.07.1969). Kröger, G., Goppert, E.: Fadenmeßeinrichtung an Textilmaschinen.
- /24/ Mayer, S.: Wirtschaftliche Webereivorbereitung durch automatische Garnlängenmessung beim Spulvorgang. Zürich, ETH, Dissertation, 1980.
- /25/ Schutzrecht CH 635 299 A5 (31.03.1983). Mayer, St.: Verfahren und Vorrichtung zum Messen der Längen eines von einem Spinnkops oder von einer in wilder Wicklung bewickelten Garnspule über Kopf abgezogenen Fadens
- /26/ Schutzrecht GB 1 107 621 (27.03.1968). Stickler G.A., Rickets, R.E.: Measurement of the Velocity of a Running Yarn.

- /27/ Schutzrecht CH 481 381 (31.12.1969). Derek, P., Bicknell, R. W.: Einrichtung zum Messen der Geschwindigkeit oder Verschiebung und Verwendung dieser Messeinrichtung.
- /28/ Schutzrecht DE 1 673 417 (22.07.1971). Derek, P., Bicknell, R. W.: Meßvorrichtung zur Erfassung von Meßdaten bewegter Elemente.
- /29/ Schutzrecht DE 30 36 249 C2 (11.10.1984). Dryczynski, K. Krämer, H., Meßner, D.: Verfahren zur berührungslosen elektrischen Messung der Fortbewegungsgeschwindigkeit von Bahnen oder Streifen aus elektrisch isolierenden Werkstoff sowie Vorrichtung zur Durchführung desselben.
- /30/ Schutzrecht DE 19 12 510 (24.02.1970). Rohner, D.: Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit von laufenden Fäden oder Garnen.
- /31/ Schutzrecht DE 2 410 226 (12.09.1974). Andermo, N.I.: Vorrichtung zum Messen der Geschwindigkeit der Bewegung eines kontinuierlichen Gegenstandes längs einer vorherbestimmten Bewegungsbahn.
- /32/ Pusch, T., Offermann, P.: Möglichkeiten der Garnmeßtechnik für weitere Entwicklungen in der Textiltechnik. In: Melliand Textilberichte (1993), Nr. 6, S. 520-525.
- /33/ Offermann, P., Wünsch I., Pusch, T: Mikrostruktur technologischer Kenngrößen an Rundstrickmaschinen. In: Maschen-Industrie. (5/1997), Nr. 47, S. 296-301.
- /34/ Schäfer W., et. al.: Berührungslose Messung der Garngeschwindigkeit auf der Basis der Garnladung. In: Melliand Textilberichte (1999), Nr. 6, S. 495-498.
- /35/ Duan, J.: Garngeschwindigkeitsmessung mittels Garnladung zur Untersuchung der Garnbewegung an textilen Prozessen. Dresden: w.e.b. Universitätsverlag, 2001, ISBN: 3-935712-60-X.
- /36/ Schäfer, W., Offerman, P.: Dynamischer Sensor für Garneinlauf und Garnbewegung. In: Maschen-Industrie (2002), Nr. 5, S. 18-21.
- /37/ Schäfer, W., Offermann, P.: Berührungslose Garn-Lauflängen- und Geschwindigkeitsmessung (low-cost) mit praxistauglichen Eigenschaften. In: Melliand Textilberichte (2003), Nr. 5, S. 413-415.

- /38/ Kreutzer, P.: Theoretische Betrachtung zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung mit optischen Gittern. In: *Feinwerktechnik & Messtechnik*. (1975), Nr. 6, S. 289-294.
- /39/ Aizo, Y., Asakura, T.: Principles and Development of Spatial Filtering Velocimetry. In: *Applied Physics B* (1987), Nr. 43, S. 209-224.
- /40/ Schutzrecht DE 2 233 509 (15.03.1973) Baxtor, I.R.: Optische Geschwindigkeitsmeßvorrichtung.
- /41/ Fiedler, O., Richter, A., Christofori, K.: Ortsfilter-Geschwindigkeitssensor für industrielle Anwendungen. In: *Sensor 95*. (1995), Nr. 5, S. 129-134.
- /42/ Christofori, K., Kumpart, J.: Analyse und Dimensionierung von Ortsfilter-sensoren mit aktiven Gittern. In: 4. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. Leder. A. et. al. (Hrsg.), Universität Rostock (12.-14.Sep. 1995), S. 24.1-24.3.
- /43/ Christofori, K., Richter, A., Michel, K. Kumpart, J.: Entwicklung von Geschwindigkeitssensoren mit aktiven Gittern. In: *VDI Berichte* (1996), Nr. 1255, S. 125-130.
- /44/ Christofori, W. : Berührungslose Geschwindigkeitsmessung. In: *Melliand Textilberichte* (1998), Nr. 7-8, S. 509. ,
- /45/ Schutzrecht CH 669 777 A5 (14.04.1989). Allemann, Richard, Forch: Verfahren zur berührungslosen Längenmessung eines bewegten Garns sowie Vorrichtung zur Durchführung und Anwendung desselben.
- /46/ Schutzrecht EP 1 553 037 A1 (13.07.2005) Kubato, N., Ito, M.: Winding device of spun yarn.
- /47/ Mesch, F., Daucher, H.-H., Fritsche, R.: Geschwindigkeitsmessung mit Korrelationsverfahren. Teil 1. In: *Messtechnik* (1971), Nr. 7, S. 152-157.
- /48/ Mesch, F., Daucher, H.-H., Fritsche, R.: Geschwindigkeitsmessung mit Korrelationsverfahren. Teil 2. *Messtechnik* (1971), Nr. 8, S. 163-168.
- /49/ Fritsche, R., Mesch, F.: Fehlereinflüsse bei der berührungslosen Geschwindigkeitsmessung mit Korrelationsverfahren. In: *msr* (1972), Nr. 6, S. 225-229.
- /50/ Mesch, F.: Geschwindigkeits- und Durchflußmessung mit Korrelationsverfahren. In: *Regelungstechnische Praxis* (1982), Nr: 3, S. 73-82.

- /51/ Lünenschloß, J., Coll-Tortosa, L.: Verfahren zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit und des Auflösungszustandes von Fasern im Transportkanal einer OE-Rotorspinnmaschine. In Melliand Textilberichte (1973), Nr. 6, S. 570-574.,
- /52/ Wulfhorst, B.: Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung an Garnen und Flächengebilden. In: *textil praxis international* (1990), Nr.6, S. 591-596.
- /53/ Zeitler R.: Digital Correlator for Measuring the Velocity of Solid Surfaces. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (1997), Vol. 46, Nr. 4, S. 803-806.
- /54/ Zeitler, R.: Optischer Sensor zur Lauflängenbestimmung von Fasergarnen. In: *VDI Berichte* (1996), Nr. 1255, S. 77-82.
- /55/ Schutzrecht DE 42 25 842 A1 (10.02.1994). Hermanns, F., Krüger A.: Vorrichtung zum Messen der Geschwindigkeit von Textilfäden an einer Wickleinrichtung.
- /56/ Scheibe, H., Krüger A., Gerig-Leifeld, M.: Längenmessung in der Kreuzspulerei - Ein wichtiges Leistungsmerkmal für die Textile Prozesskette. In: *Melliand Textilberichte* (2005), Nr.5.
- /57/ Yeh, Y., Cummins, H.Z.: Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer. In: *Appl Phys Lett* (1964), Nr. 4, S. 176-179.
- /58/ Penny, C.M.: Differential Doppler velocity measurements. In: *IEEE of Quantum Electr* (1969), Nr. QE-5, S. 318.
- /59/ Durst, F., Melling, A., Whitelaw J. H.: *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*. 2. Auflage London: Academic Press, 1981.
- /60/ Drain, L.E.: *The Laser Doppler Technique*. Chichester , John Wiley & Sons, 1980, ISBN: 0471276278 .
- /61/ Ruck, B.: *Laser-Doppler-Anemometrie*. Stuttgart: AT-Fachverlag, 1987, ISBN: 3-921 681-00-6.
- /62/ Albrecht, H.-E., et al.: *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Berlin: Springer, 2003, ISBN: 3-540-67838-7.
- /63/ Dopheide, D., et. al: Laser- und Avalanche-Dioden für die Geschwindigkeitsmessung mit Laser-Doppler-Anemometrie. In: *Technisches Mesen tm* (1987), Nr. 54, S. 291-303.

- /64/ Grünhaupt, U.: Berührungslose richtungsempfindliche Weg- und Geschwindigkeitsmessung nach dem Laser-Doppler-Verfahren für schnelle Servosysteme. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992, ISBN: 3-18-140908-1.
- /65/ Niccum, D.: A New Tool for Fibre Spinning Process Control and Diagnostics. In: International Fiber Journal (1995), Nr. 10, S. 48-57.
- /66/ BETA LaserMike, Berührungsfreie Längenmessung an Rollenschneidern und Wickelmaschinen. Dayton/USA, 05/2005 – Firmenschrift.
- /67/ BETA LaserMike, LaserSpeed Berührungsfreie Geschwindigkeits- und Längenmessung. Dayton/USA, 4/2008 – Firmenschrift.
- /68/ Fechtmann, C.: Entwicklung miniaturisierter Laser-Doppler-Anemometer Systeme. 10. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Uni Bremen ZARM (Hrsg.), Uni Rostock (10.-12.09.2002), S.34.1-34.7.
- /69/ Fechtmann, C., Eggert, M., Müller, H.: Miniaturized Laser-Doppler-Anemometer for Space Applications. 13.th int. Symp. on Applications of Laser techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal (26-29.06.2006).
- /70/ Zervos, P.: Zur berührungslosen Längenmessung mit Hilfe des Doppler-Effektes. In: PTB-Mitteilungen (3/1978), Nr. 88, S. 193-197.
- /71/ Zervos, P.: Ein Verfahren zur Längenmessung bewegten Meßgutes nach dem Doppler-Effekt. In: PTB-Bericht Me-63, Physikalisch Technische Bundesanstalt (Hrsg.), Braunschweig, (06/1984).
- /72/ Zervos, P.: Winkeleinfluß auf die Längenmessung bewegter Materialien nach dem Laser-Referenzstrahl-Dopplerverfahren. In: Feinwerktechnik & Messtechnik(1985), Nr. 93, S.234-236.
- /73/ Zervos P.: Ein Vergleich von Differenz- und Referenz-Dopplerverfahren zur Längenmessung bewegter Materialien. In: PTB-Mitteilungen (1988) Nr. 98, S. 115-120.
- /74/ Abou-Zeid, A., Zervos P.: Längenmessung bewegter Materialien nach dem Referenz-Dopplerverfahren mit Diodenlasern. In: Technisches Messen tm (10/1988), Nr.55, S. 383-388.
- /75/ Zervos, P.: Längenmessung florbesetzter Textilien mit Hilfe der Lasertechnik. In: Melliand Textilberichte (1990), Nr. 7, S. 513-516.

- /76/ Abou-Zeid, A., Steinfeld, H., Zervos, P.: Ein Laser-Doppler-Längenmessgerät für bewegte Materialien. In: PTB-Mitteilungen (1994), Nr. 104, S. 75-82.
- /77/ Zervos, P., Lampe, J.: Erprobung eines Laser-Doppler-Längenmeßgerätes an Stoffmeßmaschinen. In: PTB-Mitteilungen (1995), Nr. 105, S. 335-371.
- /78/ Zervos, Panagiotis: Doppler effect underpins robust length sensors. In: Opto & Laser Europe (1996), Nr. 6, S. 25-26.,
- /79/ Ringens, W., et. al.: Optoelektronischer Sensor zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung an textilen Oberflächen. In: Textil praxis int. (1988), Nr. 6, S. 640-643.
- /80/ Schollmeyer, E.: Lasermessverfahren zur Steuerung textiler Prozesse. In: Messen, Steuern, Regeln - Betriebsmeßtechnik in der Textilerzeugung und -veredelung (1988), Band 16, S.245-273.
- /81/ Ringens, W., Schmitz, F.-J., Schollmeyer E.: Optoelektronischer Sensor erlaubt genauere Ergebnisse. In: Bekleidung + Wäsche (1989), Nr. 20, S. 40-42.
- /82/ Ringes, Schollmeyer: Wissenschaftliche Erarbeitung von Grundlagen eines kostengünstigen Lauflängen-Meßsystems für die Textilerzeugung und -veredelung. Abschlußbericht AIF-Forschungsvorhaben 195 D/II - Teil DTNW e.V. Krefeld (1994).
- /83/ Ringens, W., Bahners, Th., Schollmeyer, E.: Kostengünstiges Lauflängen-Messsystem für die Textilerzeugung und -veredelung. In: Textilveredelung (1995), Nr. 11/12, S. 262-264.
- /84/ Bauer W.: Laser-Doppler-Anemometrie. In: Chemiefasern/Textilindustrie. (1987), Nr. 37, S. 829-832,
- /85/ Tetzlaff, G., Bergmann, J.: Einsatz der Laser-Doppler-Anemometrie zur Messung der Fasergeschwindigkeit und der Garndrehzahl beim OE-Friktionsspinnen. In: Schriftenreihe des Deutschen Wollforschungsinstitutes an der RWTH-Aachen (DWI). (8/1989), Nr. 104, S.127-128.
- /86/ Gering, M., Tetzlaff, G.: Der Einsatz eines Laser-Doppler-Anemometers in der Spinnereivorbereitung. In: Tachenbuch für die Textilindustrie (1993) S.166-175.
- /87/ Lauber, Wulfhorst: Einsatz eines Laser-Doppler-Anemometers (LDA) zur Messung der Faserbewegungs- und Strömungsverhältnisse an ausgewählten

- Textilmaschinen. 5. Chemnitzer Textilmaschinentagung, RWTH-Aachen - Institut für Textiltechnik (Hrsg), Chemnitz, (15./16.11.1995).
- /88/ Lauber, M., Wulfhorst, B.: Berührungslose Messung der Fasergeschwindigkeit beim Kardieren und Verstrecken von Baumwolle. In Melliand (11/1995), Nr. 76, S. 294-298.
- /89/ Dubbeldam, G. C.: The Contactless Measurement of Yarn Speed with Laser-Doppler-Velocity Meter. In: Journal of the Textile Institute (1974), Bd. 65, Heft 9, S. 483-487.
- /90/ Mesch, F., Fritsche, R.: Non-contact speed measurement - a comparison of optical systems. In: Measurement and Control. (7/1973), Nr. 6, S. 293-300.
- /91/ Zeitler, R., Haap, S.: Längenmessung von Fasergarnen beim Spulprozeß. In: Melliand Textilberichte (1996), Nr. 4, S. 192-198.
- /92/ Uster Technologies AG, Anwendungshandbuch Online-Qualitätsmanagement in der Spulerei. Uster/Schweiz, 05/2005 – Firmenschrift.
- /93/ Locher, H., Ernst, H.: Profit Leak: Yarn Defects. In: Textile Industries (2/1973), Nr. 137, S. 33-45.
- /94/ Mathuprabha, K., Chandran, K. V.: Yarn Imperfections. In: The Indian Textile Journal (2/2000), Vol. 110, Heft 5, S. 46-48.
- /95/ Haldemann, P., Keller R.: Erscheinungsbild und Ausreinigung von Fremdmaterialien bei Kurzfasergarnen. In: International Textile Bulletin (1992), Nr. 3, S. 20-28.
- /96/ Wulfhorst, W., Bergmann J.: Vergleich verschiedener optischer Meßverfahren zur Bestimmung des tatsächlichen Garndurchmessers. In: Melliand Textilberichte (1989), Nr. 2, S. 95-97.
- /97/ Schwerdtner, A., Heidrich H., Klee V.: Optoelektronische Meßverfahren zur Durchmesserbestimmung von Fäden. In: Formeln, Faserstoffe, Fertigware (1988), Nr. 2, S. 24-30.
- /98/ Schutzrecht EP 0 531 894 B1 (05.03.1997). Pidoux, R., Haldemann, P.: Verfahren und Vorrichtung zum Klassifizieren und Reinigen von Garnen.
- /99/ Uster Technologies AG, Uster Quantum Application report Basic yarn clearing SG 2000. Uster/Schweiz, 2007 – Firmenschrift.

- /100/ Gebrüder Loepfe AG, FACTS Klassierung von Garnfehlern und Spleissen. Wetzikon/Schweiz – Firmenschrift.
- /101/ Färber, C., Meier R.: Strategien zur Bekämpfung von Fremdfasern. 11. Reutlinger Spinnerei-Kolloquium "Innovationen - Chance zum Überleben". Zellweger Uster (Hrsg.), Eningen (6.-7.05.1997).
- /102/ Neuhaus, L.: Aufgaben für den elektronischen Garnreiniger. In: Textil-Industrie (1970), Nr. 6, S. 476-480.
- /103/ Klösger, H.: Die automatische Kreuzspulerei Schlüsselstelle zwischen Spinnerei und Weiterverarbeitung. In: Textil-Industrie (1970), Nr. 6, S. 471-475.
- /104/ Schutzrecht EP 0 877 108 B1 (16.07.2003). Wepfer, H., Heusser, J., Biondi, E.: Verfahren und Vorrichtung zum Reinigen von Garnen.
- /105/ Schutzrecht EP 1 249 422 B1 (04.05.2005). Krüger, A., Küsters, G., Sturm, C.: Garnreinigungseinrichtung an der Spulstelle einer Textilmaschine.
- /106/ Schutzrecht WO 2007/112980 A1 (11.10.2007). Linden, M., Hermanns, F., Kohns, P.: Verfahren und Anordnung zur Erzeugung eines vergrößerten Messvolumens zur Bestimmung der Struktur und/oder Spulgeschwindigkeit textiler Fasern auf Basis der Laser-Doppler-Anemometrie.
- /107/ Schutzrecht WO 2008/012093 A3 (31.01.2008). Linden, M., Hermanns, F., Kohns, P.: Verfahren und Anordnung zur Bestimmung der Garnqualität und/oder Spulenqualität eines laufenden Fadens auf Basis der Laser-Doppler-Anemometrie.
- /108/ Schutzrecht DE 10 2008 004 731 A1 (02.04.2009). Linden, M., Hermanns, F.: Verfahren und Anordnung zur Bestimmung des Durchmessers eines laufenden Fadens.
- /109/ Rückauer, C.: Laser-Doppler-Anemometer. In: messen + prüfen/automatik. (1980), Nr. 10, S. 672-683.
- /110/ Schutzrecht CH 521 590 (31.05.1972). Iten, P.D., Mastner, J.: Verfahren und Einrichtung zur Messung der Periodendauer eines elektrischen Signals mit statistisch schwankenden Signalamplituden.
- /111/ Schutzrecht CH 601 804 A5 (14.07.1978). Affolter, P., Gautschi, M.: Verfahren zur Messung der Frequenzen und Periodendauer von nicht kohärenten Wellenpaketen.

- /112/ Schutzrecht US 4 843 564 (27.06.1989). Jenson, L.M.: Apparatus and method for measuring frequency of coherent component of a composite signal.
- /113/ Schutzrecht DE 196 43 475 C1 (25.06.1998). Drewling, P.: Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung nach dem Laser-Doppler-Prinzip.
- /114/ Schulz, W.: Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Messung der Geschwindigkeit und der Länge mit Hilfe der Lasertechnik. Bundesministerium für Forschung und Technologie (Hrsg.), Forschungsbericht T 76-17. Düsseldorf, (06/1976).
- /115/ Sonntag, E.: Einsatz computerunterstützter Meßtechnik zur Systemanalyse des Ringspinnprozesses – Teil I-III, Melliand Textilberichte 12/1993, 1207-1212; 3/1994, 223-227; 5/1994, 350-354.
- /116/ Schutzrecht DE 100 26 389 A1 (22.03.2001). Henze, H., Birlem, O.: Vorrichtung zur Überwachung von Garnparametern eines laufenden Garns.
- /117/ Linden, M., Heitmann, U., Ausheyks, L. Hermanns, F.: Messung der Fadengeschwindigkeit mittels Laser-Sensor. In: Melliand Textilberichte (2009), Nr. 1-2, S. 19-20.

10 Anhang

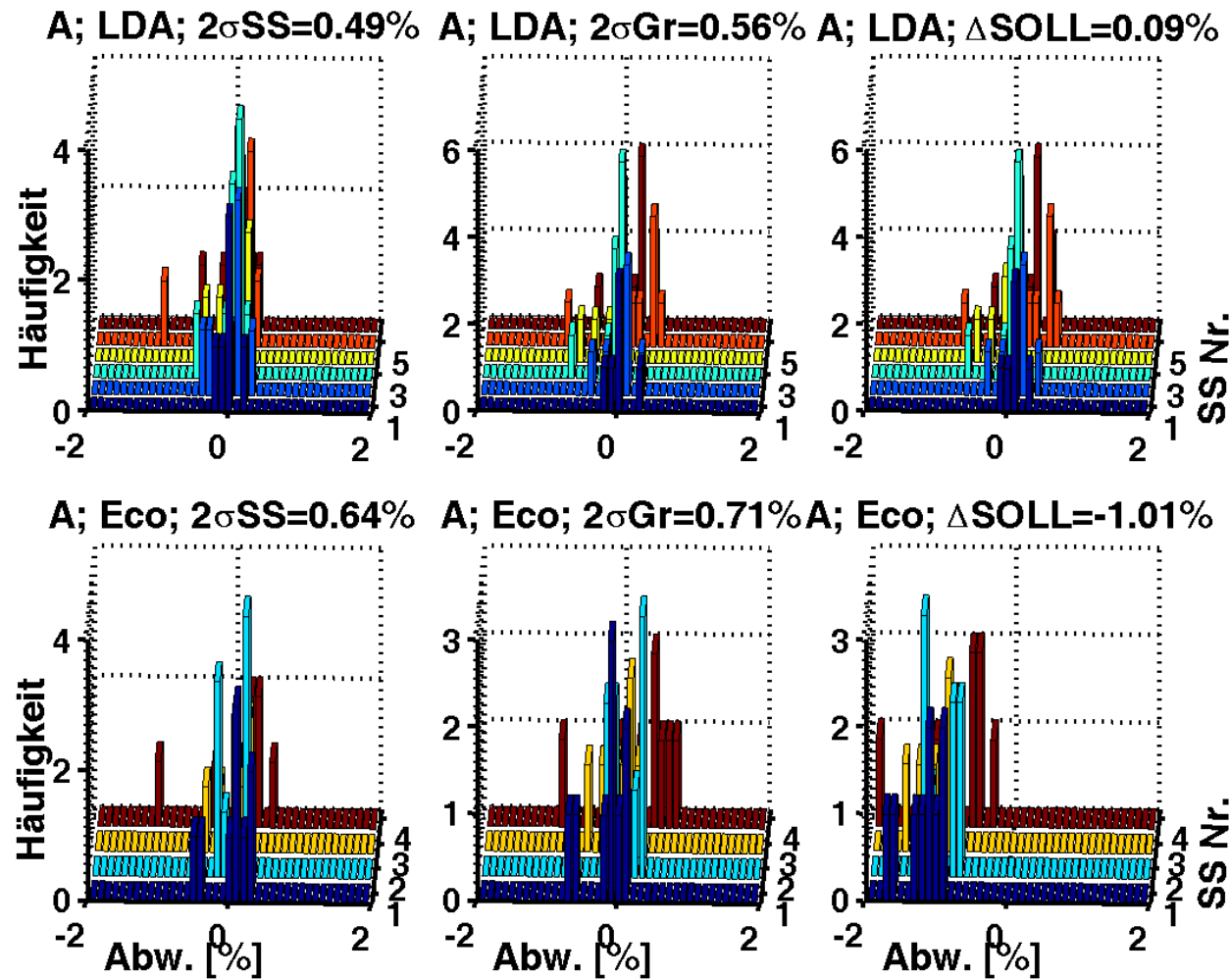


Abb. 61: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie A

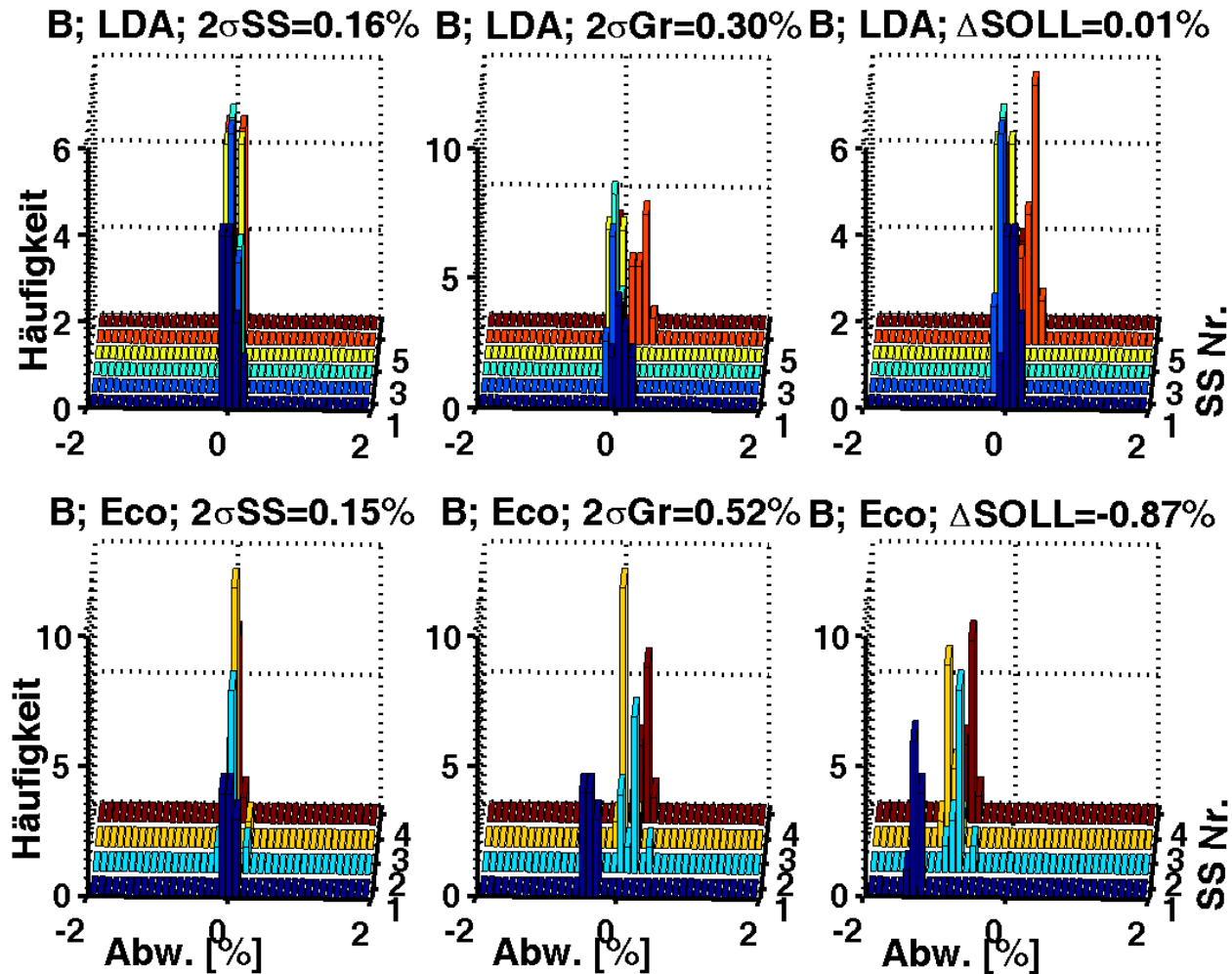


Abb. 62: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie B

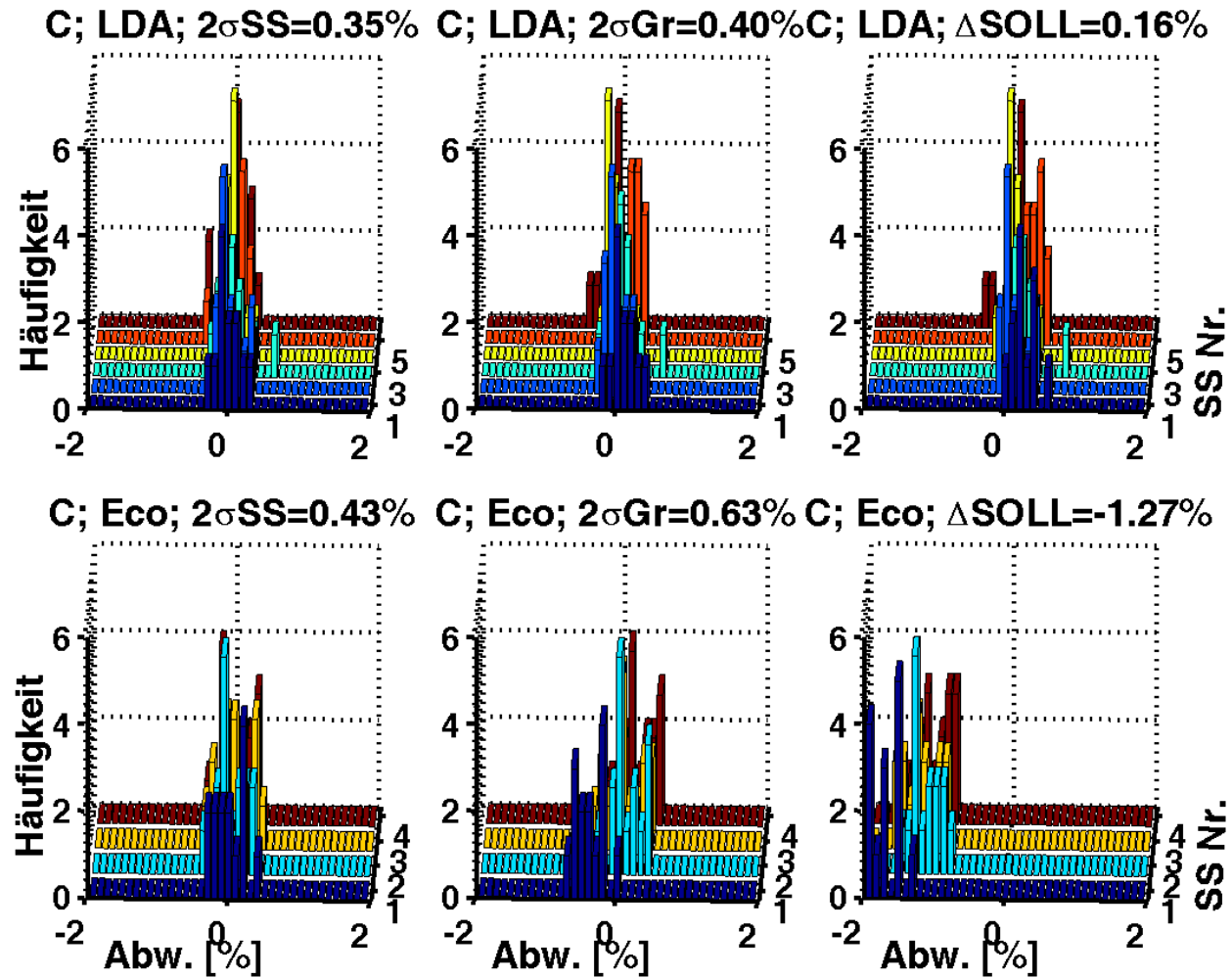


Abb. 63: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie C

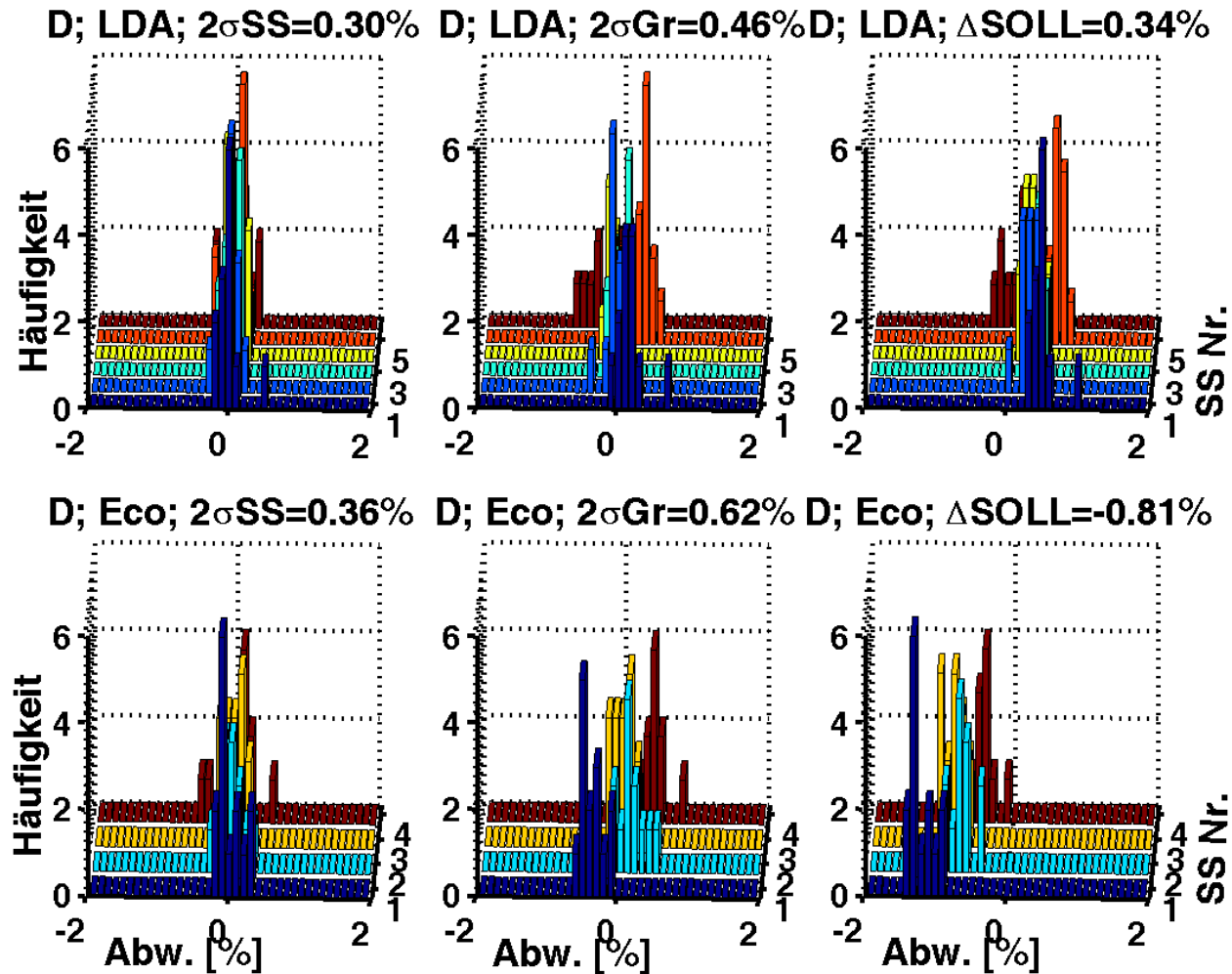


Abb. 64: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie D

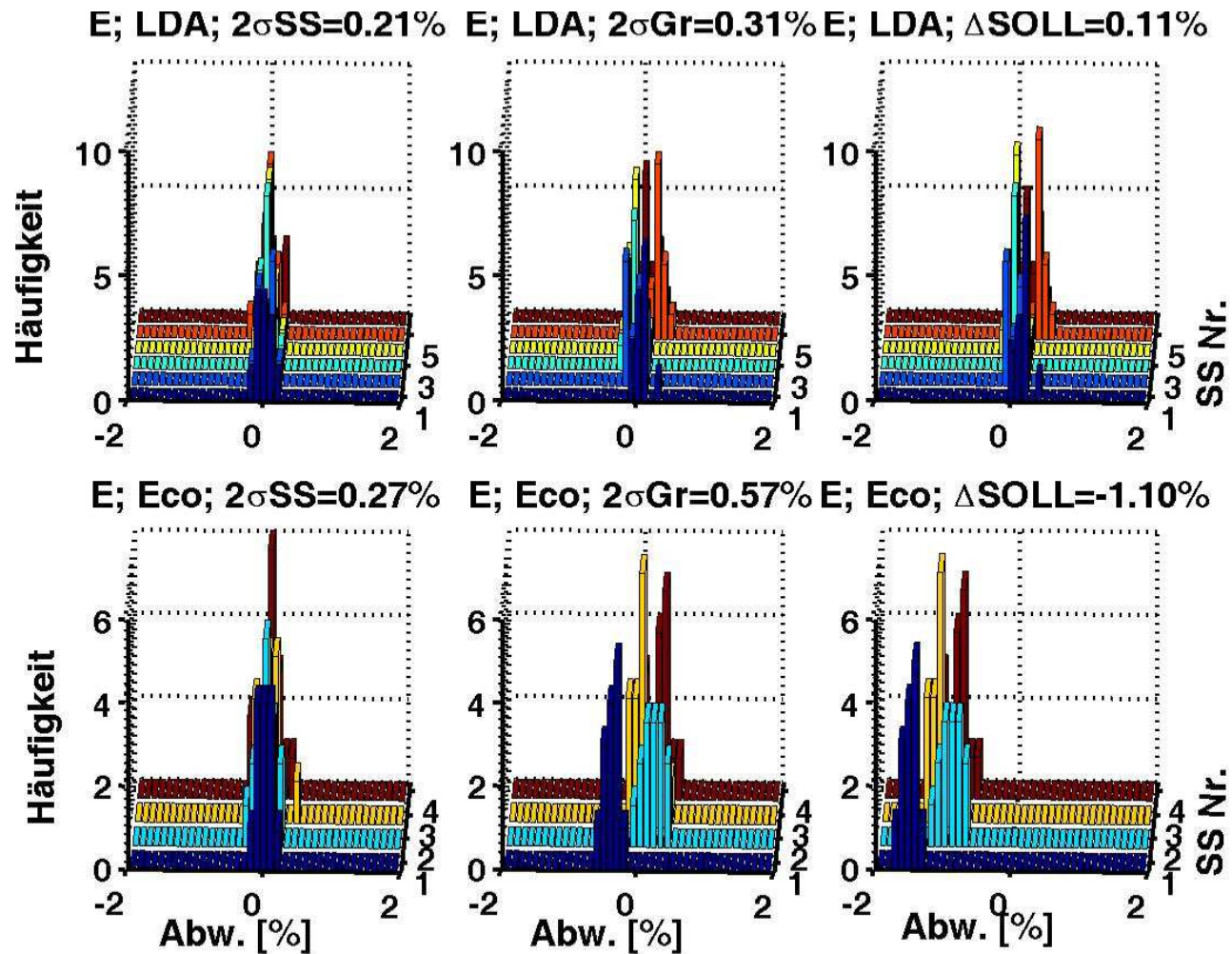


Abb. 65: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie E

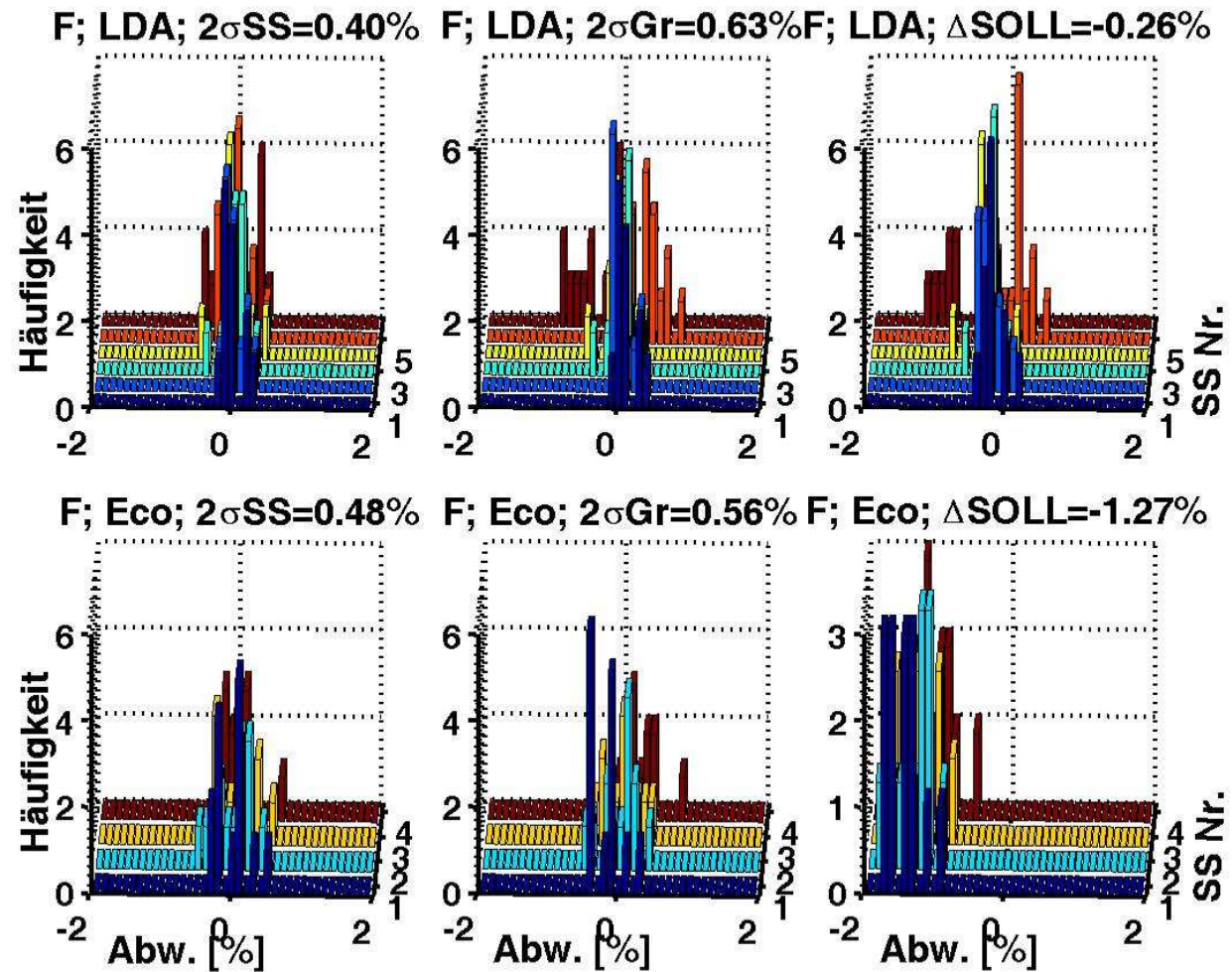


Abb. 66: Längengenauigkeit des LDA-Sensors und des Ecopack-Systems bei Partie F

Lebenslauf

Persönliche Daten: Martin Linden
geboren am: 25.04.1978
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet, 1 Kind

Schulausbildung:

1984-1990 Grund- und Hauptschule Blankenrath
1990-1994 Realschule Cochem/Mosel

Berufsausbildung:

11.08.1994-24.06.1996 Ausbildung zum Physikalisch-Technischen-Assistenten
an der Berufsbildenden Schule Naturwissenschaften
Ludwigshafen am Rhein
02.09.1996-27.06.1997 Fachhochschulreife Elektrotechnik
Fachoberschule Cochem/Mosel

Zivildienst:

01.09.1997-30.09.1998 Rettungssanitäter an der DRK Rettungswache Zell/Mosel

Studium:

01.10.1998-23.11.2002 Studium der Lasertechnik an der
Fachhochschule Koblenz, RheinAhrCampus Remagen
Abschluss: Diplom-Ingenieur (FH)
01.10.2002-23.03.2004 Studium der Informatik an der
Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg
Abschluss: Master of Science in Autonomous Systems
01.10.2005-31.03.2007 Eignungsfeststellungsverfahren Promotion an der
Universität Stuttgart

Berufliche Tätigkeit:

Seit 01.05.2004 Entwicklungsingenieur Sensorik bei der
Firma ViEnCo GmbH in Mönchengladbach