



Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik

**Orts-Frequenzanalytische Untersuchung analoger
Informationsübertragungsvorgänge in Rolle-zu-Rolle Prozessen**

zur kausalen Ursachenrückverfolgung von Prozessstörungen entlang der
Wertschöpfungskette am Beispiel von Bahnlauf- und Registerschwankungen im
Verpackungstiefdruck

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

eingereichte Dissertation

von
Tobias Enk, M.Sc.
geboren am 08.11.1990
in Bocholt

Datum der Einreichung: 18.06.2024

Datum der mündlichen Prüfung: 21.11.2024

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Urban

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jung

Danksagung

An erster Stelle danke ich Prof. Dr.-Ing. Peter Urban für die Ermöglichung meines Promotionsvorhabens. Durch sein Vertrauen in mich und die Gewährung großer Freiräume konnte ich stets meinen eigenen Interessen und Ideen nachgehen. Das war prägend und dafür bin ich sehr dankbar. Ihm und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jung danke ich für die Begutachtung dieser Arbeit.

Meinem Mentor Prof. Dr.-Ing. Michael Dattner danke ich für das Öffnen vieler Türen. Vor allem aber für die Initiierung und Einbindung in das Forschungsprojekt, das einen außergewöhnlichen industriellen Rahmen für meine Forschungsarbeit schaffen sollte. Seine unendlich motivierende Art hat mich immer wieder einen Schritt weitergebracht. Ingo Ellerbrock danke ich für die jahrelange gute Zusammenarbeit, das große Vertrauen und die Unterstützung meiner Forschung. Dr.-Ing. Elke Braun danke ich für die intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit und das konstruktive hinterfragen meiner Ergebnisse. Dr.-Ing. Hannes Vomhoff danke ich für die vielen spannenden fachlichen Diskussionen rund um die Papiertechnik und weit darüber hinaus. Sein großes Engagement in der Förderung meiner persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung waren unheimlich wertvoll. Axel Heise danke ich für seine außergewöhnliche Weitsicht und seinen langen Atem im Projekt. Seine beherzten Worte waren es, die im richtigen Moment das Forschungsprojekt und damit auch meine Forschungsarbeit gerettet haben, als es aufgrund äußerer Umstände zu scheitern drohte.

Meinen wissenschaftlichen Hilfskräften Swathikrishna Valayanad, M.Sc. und Lukas Roos, M.Sc. danke ich für die sehr angenehme und bereichernde Zeit am Lehrstuhl und die großartige Unterstützung bei der Bearbeitung verschiedener Forschungsprojekte. Meinen Kollegen Dr.-Ing. Daniel Bohn und Tim Stiene M.Sc. danke ich für die vielen Diskussionen rund um meine Arbeit und für die unvergessliche gemeinsame Zeit im FL-Keller mit den wildesten Forschungsideen und tiefgründigsten Gesprächen über Gott und die Welt.

Meiner Schwester Anne und meiner Mutter Annette danke ich für die vielen Mühen beim Korrekturlesen meiner Arbeit.

Meinen Freunden und meiner ganzen Familie danke ich für das große Verständnis, das sie mir in den letzten Jahren entgegengebracht haben und dafür, dass sie immer zu mir gestanden haben, auch wenn ich oft nicht so viel Zeit für sie hatte, wie sie es verdient hätten. Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, nicht nur für die vielfältige Unterstützung in den letzten Jahren, sondern vor allem für das solide Lebensfundament, das sie mir als Kind errichtet haben. Heute stehe ich fest darauf.

Meinen beiden Kindern danke ich dafür, dass sie mich jeden Tag mit ihrem Lachen oder Weinen daran erinnern, was wirklich wichtig im Leben ist. Meiner Frau Ann-Sophie gilt der größte Dank. Ihr widme ich diese Arbeit. Ich liebe dich.

Abstract

The present study introduces an approach to cross-process causal traceability of web run and register fluctuations in packaging gravure printing. The approach is grounded in an analogy between a roll-to-roll value chain and an analog information transmission system. The material web serves as a material analog transmission medium, influenced by various process disturbances in the subprocesses and connecting individual processes through the material flow. In the context of the study, a dataset comprising over 7000 printed rolls from a sensor-equipped roll gravure printing machine is collected and examined for corresponding disturbances. The time-frequency analysis, not conventionally utilized in the context of roll-to-roll printing processes, is implemented in a specialized form as a spatialfrequency analysis for the run-length-synchronous visualization of web run and register fluctuations in the printing process. A concept from communication engineering is adapted to differentiate the various pieces of information contained in web edges, similar to a shared transmission channel in communication technology. A structural analysis of spatial-frequency signatures provides additional opportunities to identify the causes of specific printing process disturbances. The developed methods are subsequently applied to the dataset to assign real web run and register disturbances to specific cross-process causes. Hypotheses from the literature regarding the transmission behavior of various disturbance causes in web run along the printing machine are validated through the observation of the material web within the case study, thus tested in a practical context. Finally, the identified and assigned web run disturbances are correlated with register fluctuations, enabling the differentiation and conclusive traceability of the root causes of the most dominant register disturbances.

roll-to-roll, process data analysis, web run, register, root cause analysis, spectrogram

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt einen Ansatz zur prozessübergreifenden kausalen Ursachenrückverfolgung von Bahnlauf- und Registerschwankungen im Verpackungstiefdruck vor. Dem Ansatz liegt eine Analogie zwischen einer Rolle-zu-Rolle-Wertschöpfungskette und einem analogen Informationsübertragungssystem zugrunde. Die Materialbahn fungiert als materielles analoges Übertragungsmedium, das durch verschiedene Prozessstörungen in den Teilprozessen beeinflusst wird und die einzelnen Prozesse über den materiellen Warenstrom miteinander verbindet. Im Rahmen der Studie wird ein Datensatz von über 7000 bedruckten Rollen, einer mit Sensorik ausgestatteten Rollentiefdruckmaschine erhoben und auf entsprechende Störungen untersucht. Die im Kontext von Rolle-zu-Rolle Druckprozessen nicht etablierte Zeit-Frequenzanalyse wird in einer speziellen Form als Orts-Frequenzanalyse zur laufmetersynchronen Visualisierung von Bahnlauf- und Passerschwankungen im Druckprozess umgesetzt. Ein Konzept aus der Nachrichtenübertragungstechnik zur Mehrfachnutzung eines gemeinsamen Übertragungskanals wird zur Unterscheidung der verschiedenen in Bahnkanten enthaltenen Informationen adaptiert. Eine Strukturanalyse der Orts-Frequenzsignaturen bietet weitere Möglichkeiten, um die Ursachen der jeweiligen Druckprozessstörungen zu identifizieren. Die entwickelten Methoden werden anschließend auf den Datensatz angewendet, um reale Bahnlauf- und Registerstörungen konkreten Ursachen prozessübergreifend zuzuordnen. Die aus der Literatur stammenden Hypothesen zum Übertragungsverhalten verschiedener Störursachen im Bahnlauf entlang der Druckmaschine werden durch die Beobachtung der Materialbahn innerhalb der Fallstudie validiert und so in einem praxisrelevanten Umfeld getestet. Schließlich werden die so identifizierten und zugeordneten Bahnlaufstörungen mit Passerschwankungen in Bezug gebracht, sodass die Grundursachen der dominantesten Registerstörungen am Ende tatsächlich differenziert zurückverfolgt werden können.

Rolle-zu-Rolle, Prozessdatenanalyse, Bahnlauf, Register, Ursachenrückverfolgung, Spektrogramm

Inhaltsverzeichnis

1 Notation	1
2 Einleitung	7
2.1 Ausgangssituation	7
2.2 Forschungsfrage	10
2.3 Herausforderungen	11
2.4 Zielsetzung	14
3 Grundlagen und Begriffsdefinitionen	15
3.1 Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette	15
3.1.1 Papierproduktion	16
3.1.2 Rollentransport und -zwischenlagerung	30
3.1.3 Rolle-zu-Rolle Druckprozess	32
3.2 Analoge Informationsübertragung	45
3.2.1 Nachrichten- und signaltheoretische Begriffe	45
3.2.2 Signalanalyse	53
3.2.3 Signalsynthese	61
4 Stand der Forschung und Technik	75
4.1 Digitale Vernetzung der Wertschöpfungskette	75
4.2 Materialbahn oder Rolle als materieller analoger Informationsträger	78
4.3 Zeit-Frequenzanalyse zur Überwachung von Prozessstörungen im Druck	81
4.4 Einzeluntersuchungen relevanter Prozessstörungen	82
4.4.1 Bahnkantenvariationen durch Störungen in der Schneidpartie	83
4.4.2 Vibrationen der Fertigrolle im Tragwalzenroller	86
4.4.3 Unrundheit des Rollenwickels	89
4.4.4 Bahnlaufstörungen	91
4.4.5 Registerschwankungen	99
4.5 Abgrenzung	102
5 Eigener Ansatz	105
5.1 Ansatz der analogen Informationsübertragung	105

5.2 Analogien	108
6 Methodischer Teil	115
6.1 Fallbeispiel und Datensatz	115
6.1.1 Konkrete Rollentiefdruckmaschine	115
6.1.2 Datenerhebung	118
6.1.3 Datenexploration	121
6.1.4 Datenvorverarbeitung	123
6.1.5 Übertragungskanäle	124
6.2 Orts-Frequenz Spektrogramm	124
6.2.1 Implementierung und Parametrierung	124
6.2.2 Achsen und Wertebereich	125
6.3 Interpretationsstrategie	129
6.3.1 Manuelle Datenexploration	129
6.3.2 Systematisierte Analyse des Übertragungsverhaltens	137
6.3.3 Synthese prinzipieller Orts-Frequenzsignaturen	147
7 Modellierte Informationsbeispiele	155
7.1 Radiale Störungen	155
7.1.1 Exzentrizität	156
7.1.2 Lokale Deformation	159
7.1.3 Konstant periodische Materialdickenschwankung	160
7.2 Laterale Störungen	162
7.2.1 Konstant periodische Bahnkantenstörungen	163
7.2.2 Nicht konstant periodische Bahnkantenstörungen	165
7.2.3 Sprünge und Phasenversatz	169
7.3 Tangentiale Störungen	172
7.3.1 Bahndehnung im Wickelprozess	172
7.3.2 Bahndehnung in Druckmaschine	174
8 Reale Informationsbeispiele	177
8.1 Bahnkantenstörungen - Validierung Hypothese 1	178
8.1.1 Vibration der Fertigrolle im Maschinenroller	178
8.1.2 Deformierte Mutterrolle	184
8.1.3 Nicht ideal rotierende Tragwalze im Maschinenroller (V-Muster)	188
8.1.4 Messervibrationen in Fertigrollenwicklung	195
8.2 Materialinduzierte Bahnlaufstörungen - Validierung Hypothese 2 a)	199
8.2.1 Plötzlicher Materialwechsel bei gespliceter Fertigrolle	200
8.2.2 Inhomogenität der Materialeigenschaften	206

8.3 Extern induzierte Bahnlaufstörungen - Validierung Hypothese 2 b)	217
8.3.1 Nicht ideale Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine	217
8.3.2 Nicht ideale Walzen in der Druckmaschine	225
8.4 Registerstörungen - Validierung Hypothese 3)	236
8.4.1 CD-Registerstörungen	238
8.4.2 MD-Registerstörungen	245
8.4.3 Quantitative Bewertung	250
9 Zusammenfassung	255
10 Ausblick	259
Abbildungsverzeichnis	267
Tabellenverzeichnis	279
Literaturverzeichnis	281
A Anhang	i
A.1 Druckversuche - Validierung 2 a)	i
A.2 WGS Oszillationsversuch - Validierung 2 b)	viii
A.3 Bahnkantenmessung an Klinikroller	xi

1 Notation

Zeichen	Beschreibung	Einheit
CD	Querrichtung, Seitenrichtung (engl. Cross Direction)	
MD	Längsrichtung, Maschinenrichtung (engl. Machine Direction)	
ZD	Richtung senkrecht zur Materialebene (engl. Z Direction)	
T	Materialdicke (engl. Caliper)	mm
TSO	Faserorientierung (engl. Tensile Stiffness Orientation)	rad
TSI	Zugsteifigkeit (engl. Tensile Stiffness Index)	kN m/g
σ	Mechanische Spannung	N/m ²
ε	Deformation	mm
η	Viskosität	N s/m ²
E	Elastizitätsmodul	N/m ²
S	Spannungsgrenze	N/m ²
TB	Obermesser (engl. Top Blade)	
LB	Untermesser (engl. Lower Blade)	
OL	Überlappung (engl. Overlap)	mm
v	Geschwindigkeit	m/s
v_{Web}	Bahngeschwindigkeit	m/s
v_{TB}	Umfangsgeschwindigkeit des Obermessers	m/s
Δv	Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Obermesser zur Bahn (engl. Overspeed)	%
σ_{radial}	Radiale Spannung der Lage im Wickel	N/m ²
$\sigma_{tangential}$	Tangentiale Spannung der Lage im Wickel	N/m ²
W	Wickel- bzw. Bahnbreite	m
L	Bahnlänge	m
D	Wickeldurchmesser	m
D_{voll}	Durchmesser eines vollen Wickels	m
$D_{leer}, D_{Hülse}$	Durchmesser einer Hülse bzw. eines leeren Wickels	m
UW	Abwicklung (engl. Unwinding)	

Zeichen	Beschreibung	Einheit
WM_{UW}	Bahnfeuchtigkeitsmessung nach der Abwicklung	%
D_{UW}, D_{RW}	Tänzerwalze (engl. Dancer)	%
WT	Bahnzugmessung (engl. Web Tension)	N
WGS	Seitliche Bahnlaufrégelung (engl. Web Guiding System)	mm
WE	Bahnkantenmessung (engl. Web Edge)	mm
IPU	1. Zugwerk (engl. Infeed Pull Unit)	N
PU	Druckwerk (engl. Print Unit)	
EU	Prägewerk (engl. Embossing Unit)	
OPU	2. Zugwerk (engl. Outfeed Pull Unit)	N
RW	Aufwicklung (engl. Rewinding)	
ΔR^{CD}	Registerfehler in CD	mm
ΔR^{MD}	Registerfehler in MD	mm
F	Kraft bzw. Bahnzug	N
OS	Bedienseite (engl. Operating Side)	
DS	Antriebsseite (engl. Drive Side)	
y	Bahnposition in y-Richtung (CD)	mm
δy	Abweichung der CD-Bahnposition	mm
δOS	Abweichung der Bahnkante auf der Bedienseite	mm
δDS	Abweichung der Bahnkante auf der Antriebsseite	mm
δW	Abweichung der Bahnbreite	mm
σ_{Web}	Bahnspannung	N/m ²
NEL	Normal Entry Law	
Θ	Winkel einer lateralen Bahnablenkung	rad
L_Z	Bahnlänge zwischen zwei Walzen (Freier Zug)	m
v_y	Geschwindigkeit einer lateralen Bahnablenkung	
$x(t)$	Analoges Zeitsignal	
$x[n]$	Diskretisiertes Zeitsignal	
\hat{x}	Amplitude eines Zeitsignals	
f	Frequenz bzw. Ortsfrequenz	1/s, 1/m
$X(f)$	Frequenzspektrum	
$ X(f) , \hat{X}(f)$	Analoges Betrags- bzw. Amplitudenspektrum	
$ X[k, m] , \hat{X}[k, m]$	Diskretes Betrags- bzw. Amplitudenspektrogramm	
ω	Winkelfrequenz	1/s, 1/m
P	Periodendauer bzw. -länge	s, m
dB	Dezibel	
SNR	Signal-Rausch-Abstand (engl. Signal-Noise-Ratio)	

Zeichen	Beschreibung	Einheit
f_s	Abtastfrequenz	1/s, 1/m
f_{alias}	Alias-Frequenz	1/s, 1/m
B	Bandbreite	1/s, 1/m
FT	Fourier-Transformation (engl. Fourier-Transformation)	
DFT	Diskrete Fourier-Transformation (engl. Discrete Fourier-Transformation)	
STFT	Kurzzeit Fourier-Transformation (engl. Short Time Fourier-Transformation)	
\Re	Realteil einer komplexen Zahl	
\Im	Imaginärteil einer komplexen Zahl	
k	Frequenzkoeffizient der STFT-Ergebnismatrix	1/s, 1/m
m	Zeit- bzw. Ortskoeffizient der STFT-Ergebnismatrix	s, m
$w[n]$	Diskretes Analysefenster mit N Elementen	
H	Hop-Parameter	
M	Maximaler Zeit- bzw. Ortsrahmenindex	
K_{uniq}	Größter Frequenzindex des positiven Spektralanteils	
N	Länge des Analysefensters w	
φ	Phasenversatz	
f_T	Frequenz des Trägersignals	1/s, 1/m
f_M	Frequenz des Modulationssignals	1/s, 1/m
B_{AM}	Bandbreite eines amplitudenmodulierten Signals	1/s, 1/m
f_{min}	Untere Grenzfrequenz eines zu übertragenen Signals	1/s, 1/m
f_{max}	Obere Grenzfrequenz eines zu übertragenen Signals	1/s, 1/m
OSB	Oberes Seitenband	
USB	Unteres Seitenband	
m_{AM}	Modulationsgrad einer Amplitudenmodulation	
$g(x)$	Nichtlineare Kennlinie	
f_{IMO}	Frequenz der Intermodulationsprodukte (bzgl. der Ordnung O)	1/s, 1/m
t_i	Zeitstempel eines Signals	s
τ_i	Zeitkonstante	s
l_i	MD-Position eines Sensors in der Druckmaschine (relativ zur Abwicklung l_{UW})	m
RL	Rapportlänge	
K	Schwellwert des Sensorrauschen	dB
β	Sehr kleiner Hilfswert $\beta \ll K$	dB

Zeichen	Beschreibung	Einheit
G	Verstärkungs- und Dämpfungsschwellwert	dB
\hat{X}_3^c	Ein beispielhaftes gefiltertes Pegel-Spekrogramm	
$T[i]$	Materialdicke eines Bahnelementes im Wickelmodell	mm
$l[i]$	Länge eines Bahnelementes im Wickelmodell	mm
r_0	Radius der Hülse im Wickelmodell	mm
$r[i]$	Radius des Bahnelementes i im Wickelmodell	mm
$r[\hat{i}]$	Radius des Bahnelementes \hat{i} im Wickelmodell (liegt unter i)	mm
$\varphi[i]$	Drehwinkel im Wickelmodell	rad
$\delta\varphi[i]$	Differenzieller Drehwinkel im Wickelmodell	rad
$\delta l[i]$	Äquidistante Bahnelementlänge im Wickelmodell	mm
$lc[i]$	Aktuelle Lagenanzahl im Wickelmodell	
$\varphi_{rel}[i]$	Relativer Drehwinkel im Wickelmodell	rad
I	Menge aller Bahnelemente der unterliegenden Lage im Wickelmodell	
δr	Störung im Wickelradius	mm
δT	Störung in der Materialdicke	mm
δWE	Störung in der Bahnkante	mm
δy	Störung in der lateralen Lagenposition	mm
δl	Störung in der Bahnlänge	mm
$\delta \varphi$	Störung in der tangentialen Lageposition	rad
f_{FR}	Drehfrequenz einer Fertigrolle	1/s, 1/m
f_{MR}	Drehfrequenz einer Mutterrolle	1/s, 1/m
f_{r_0}	Drehfrequenz einer abgewickelten Rolle	1/s, 1/m
$f_{r_{max}}$	Drehfrequenz einer vollen Rolle	1/s, 1/m
U	Umfang	m
f_1	Frequenz einer beispielhaften Störung 1	1/s, 1/m
b	Zwischenfrequenz	1/s, 1/m
N_P	Periodenanzahl eines Ringmusters im Wickel	
E	Ordnungszahl des Ringmusters im Wickel	
$*, **, ***$	Ausprägungsstärke von Ringmuster im Wickel	
$\Delta\epsilon$	Zusätzliche Bahndehnung im Wickelprozess	%
f_R	Frequenz der Überlagerungsschwingung	1/s, 1/m
$f_{Schwebung}$	Schwebungsfrequenz	1/s, 1/m
$P_{Schwebung}$	Schwebungsperiode	s, m
λ	Wellenlänge	m
k	Wellenzahl	1/m

Zeichen	Beschreibung	Einheit
σ	Standardabweichung	
+	Induzierung Orts-Frequenzsignatur	
>	Dämpfung einer Orts-Frequenzsignatur	
<	Verstärkung einer Orts-Frequenzsignatur	
\cong	Fast identische Orts-Frequenzsignatur	
\sim	Ähnliche Orts-Frequenzsignatur	
\neq	Unähnliche Orts-Frequenzsignatur	

Tabelle 1.1 Verwendete Notationen nach Auftreten im Dokument

2 Einleitung

2.1 Ausgangssituation

Rolle-zu-Rolle Produktionssysteme, wie beispielsweise Rollentiefdruckmaschinen, sind hochkomplexe Systeme. Die präzise und sichere Führung der Bahn und das Erzielen einer hohen Passgenauigkeit bzgl. Bedruckung oder sonstiger Bearbeitung sind neben dem Prozess der Farbübertragung selbst, der Trocknung sowie der Auf- und Abwicklung die zentralen Kerntechnologien einer jeden Druckmaschine. Nur durch hochpräzisen Maschinenbau und Systeme zur aktiven Regelung des Bahnlaufs und der Passlage der Druckzylinder zueinander, kurz auch *Passer* oder *Register* genannt, kann ein Druckbild erzeugt werden, welches als nicht störend wahrgenommen wird. Passerabweichungen führen typischerweise zu einem unscharfen Erscheinungsbild im Mehrfarbendruck und können auch Farbdrifts hervorrufen. Im Bereich gedruckter Elektronik entscheidet die Registerqualität u.a. sogar über die Funktionalität. Zu große Registerschwankungen führen allgemein zu inakzeptablen Ergebnissen und damit zu Makulatur. Die Passlage ist daher ein zentrales Qualitätsmerkmal eines jeden Druckprozesses. Die Bahnlauf-, Bahnnspannungs- und Registerregelung sind die zentralen Systeme in einer Druckmaschine, die zur Erzielung der geforderten Druck- bzw. Registerqualität hauptsächlich verantwortlich sind. Abbildung 2.1 zeigt das Phänomen von Bahnlauf- und Registerschwankungen in seitlicher bzw. lateraler Richtung (CD = engl. cross direction) und in Längsrichtung (MD = engl. machine direction) schematisch.

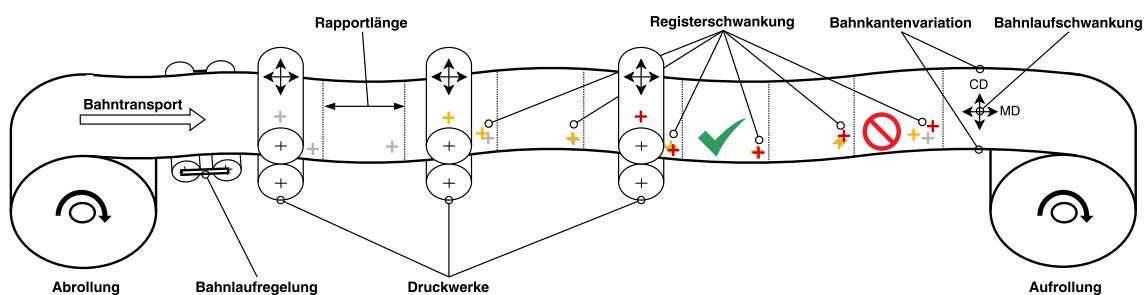


Abbildung 2.1 Stark vereinfachtes Schema von Bahnlauf- und Registerschwankungen in einem Rolle-zu-Rolle Druckprozess

Trotz allgemeiner und spezifischer Weiterentwicklungen im Druckmaschinenbau und bei den Regelungssystemen, kommt es auch in der heutigen Praxis immer wieder dazu, dass die Passerqualität unterhalb der vom Kunden oder den intern vorgegebenen Qualitätsvorgaben fällt. Eine dadurch häufig notwendige Verringerung der Maschinengeschwindigkeit reduziert die Produktivität i.d.R. signifikant. Unter Umständen muss die Produktion sogar unterbrochen werden. Nicht selten rückt das Substrat¹ als potentielle Ursache für die Bahnlauf- und Registerprobleme in den Fokus, woraufhin einzelne Materialrollen oder ganze Chargen beim Papierlieferanten reklamiert werden. Eine für den Papierhersteller differenzierte und damit hilfreiche Dokumentation der Problematik fehlt dabei in aller Regel. Eine gezielte Fehlerbehebungsstrategie ist dem Papierhersteller daher in den meisten Fällen nicht möglich. Am Ende verschwendet ein derartiges Szenario sowohl bei Druckereien als auch bei Papierherstellern wertvolle Ressourcen und es besteht ein gegenseitiges Interesse an einer Verbesserung des Status Quo.

In der Qualitätssicherung von Druckereien werden die Bahnlauf- und Passerschwankungen aus verschiedenen Gründen nicht tiefergehend analysiert, um die eigentlichen Grundursachen der Störungen aufzudecken (siehe 2.3). Im besten Fall basiert eine Fehleranalyse der Passerabweichungen auf eine oder mehrere statistische Größen wie Mittelwert, Standardabweichung oder die Prozessfähigkeit, die die Registerschwankungen über eine gewisse Zeitspanne, z.B. über eine Rolle, quantitativ bewerten. Die Aufklärungsrate, welche Grundursache(n) im Detail verantwortlich für relevante Bahnlauf- und Registerprobleme im Druckprozess waren, ist auf diese Weise verschwindend gering. Informationen zur Charakteristik der Schwankungen über die Zeit oder anders ausgedrückt, den Rhythmen der Störungen, gehen dabei vollständig verloren, obwohl insbesondere dieser Aspekt wertvolle Informationen über die Grundursache(n) bereithält.

Häufig bleiben die konkreten Zusammenhänge zwischen den Auswirkungen im Druck zu den Ursachen im Gesamtprozess daher unerkannt, weshalb die gleichen Probleme häufig immer wieder von Neuem auftreten.

Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 2.2 eine Übersicht über potentielle Ursachenquellen entlang der Prozesskette für die in dieser Arbeit betrachteten Bahnlauf- und Registerschwankungen im Druckprozess gegeben.

¹In dieser Arbeit werden insbesondere Kartonagen betrachtet. In der gesamten Arbeit wird der Begriff „Papier“ als Synonym für einen faserbasiertes Substrat wie Karton verwendet.

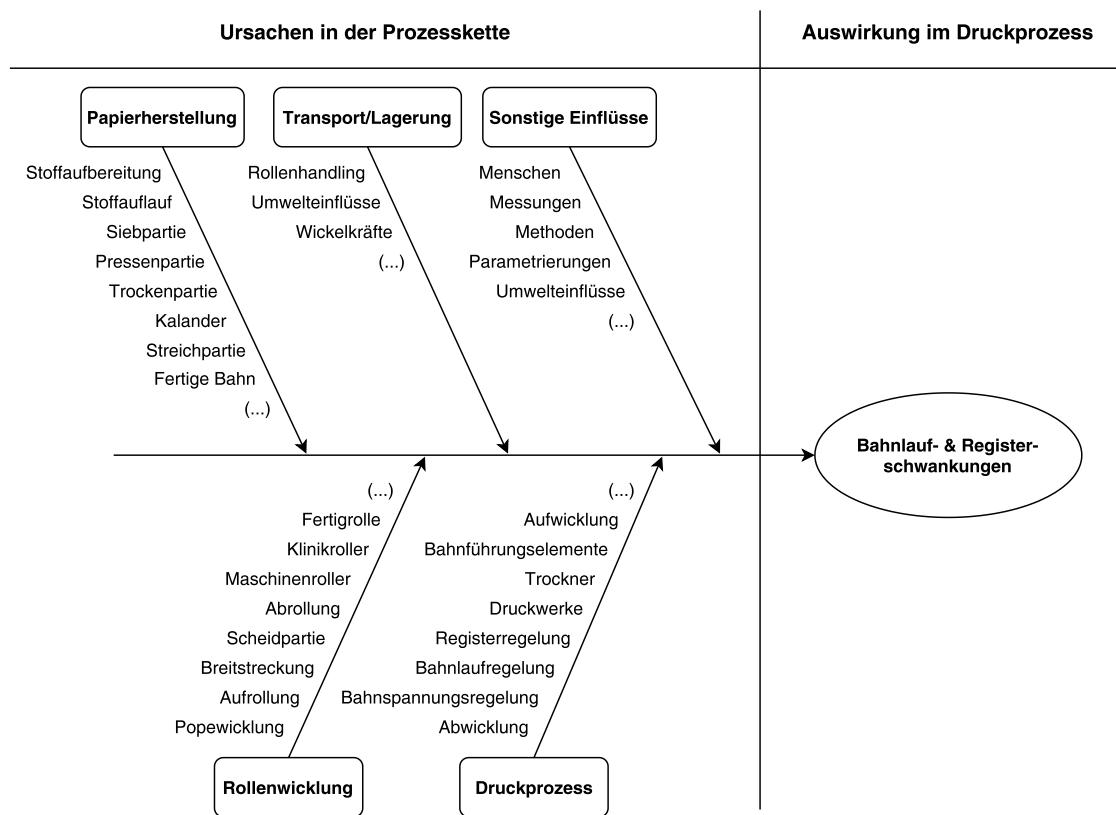


Abbildung 2.2 Ursache-Wirkungs-Diagramm mit vielfältigen Ursachen in den einzelnen Teilprozessen entlang der Prozesskette die potentiell Auswirkungen auf Bahnlauf- und Registerschwankungen im Druckprozess besitzen

Simplifiziert man den Bahnlau- und Registerregelungsprozess innerhalb einer Druckmaschine als einen einfachen Standard-Regelkreis, wie in Abbildung 2.3 veranschaulicht, wird deutlich, dass an zwei grundsätzlichen Größen gearbeitet werden kann, um das Gesamtergebnis, also hier den Bahntransport oder die Passerqualität zu optimieren:

- 1. Optimierung der Regelung(en)
- 2. Verringerung der Störgröße(n)

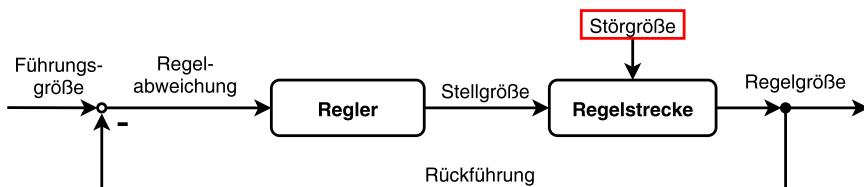


Abbildung 2.3 Einfacher Regelkreis

Die regelungstechnische Seite stellt ein eigenes Handlungsfeld dar. Die Parametrierung der Bahnlauf- und Registerregelungssysteme sind meist mit großer Vorsicht zu behandeln und stehen den Maschinenbedienern häufig gar nicht oder nur stark eingeschränkt zur Verfügung. Sie werden in der Regel nur bei der Maschinenabnahme voreingestellt oder im Zuge von Maschinenoptimierungen durch Experten entsprechend angepasst. Es besteht immer die Gefahr einer erheblichen Verschlechterung der generellen Regelqualität zugunsten einzelner weniger Problemfälle. Unter Umständen sind die regelungstechnischen Möglichkeiten manchmal sogar ausgeschöpft. In jedem Fall sind sie limitiert und abhängig vom jeweiligen Regler und der Regelstrecke, also maschinenabhängig. Eine Auseinandersetzung mit der regelungstechnischen Seite wird in dieser Arbeit daher bewusst nicht verfolgt.

Auf der anderen Seite stehen die Störgrößen. Ganz allgemein versucht man diese so gering wie möglich zu halten. Genau hier setzen z.B. auch maschinenbaulichen Optimierungen wie z.B. eine Reduzierung von Maschinenschwingungen an. Die Aufgabe der Regelung ist es, die verbleibenden Störeinflüsse möglichst gut zu kompensieren, um die Führungsgröße zu erreichen. Kommt es bei grundsätzlich gut parametrierten Regelsystemen zu größeren Regelabweichungen, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass zu starke Störungen in den Regelkreis eingehen, sodass die Regelung es nicht schafft diese hinsichtlich der geforderten Toleranzgrenzen ausreichend zu kompensieren. Um die Qualitätsvorgaben dennoch zu erreichen, empfiehlt es sich also auch aus produktionstechnischer Sicht, Störgrößen mehr in den Fokus zu nehmen. *Genau an dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an.*

2.2 Forschungsfrage

Aus der beschriebenen Ausgangssituation stellen sich im Kontext von Bahnlauf- und Registerstörungen also zusammenfassend folgende praxisrelevante Fragen:

- *Welche Bahnlauf- und Registerstörungen lassen sich in realen Druckprozessen beobachten?*
- *Wo liegen ihre jeweiligen Ursachen innerhalb des Gesamtprozesses?*
- *Wodurch werden sie jeweils konkret verursacht?*

Zur Adressierung dieser praxisrelevanten Fragen, lautet die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit:

Wie können Bahnlauf- und Registerschwankungen in Rolle-zu-Rolle Druckprozessen systematisch differenziert und ihren Ursachen entlang der Prozesskette kausal zugeordnet werden?

Zur Veranschaulichung dieser Fragestellung wird das bereits bekannte Ursache-Wirkungs-Diagramm durch blaue und rote Pfeile ergänzt, die die systematische Differenzierung der Auswirkungen im Druckprozess bzw. die anschließende Zuordnung entlang der gesamten Prozesskette zu potentiellen Ursachen darstellt.

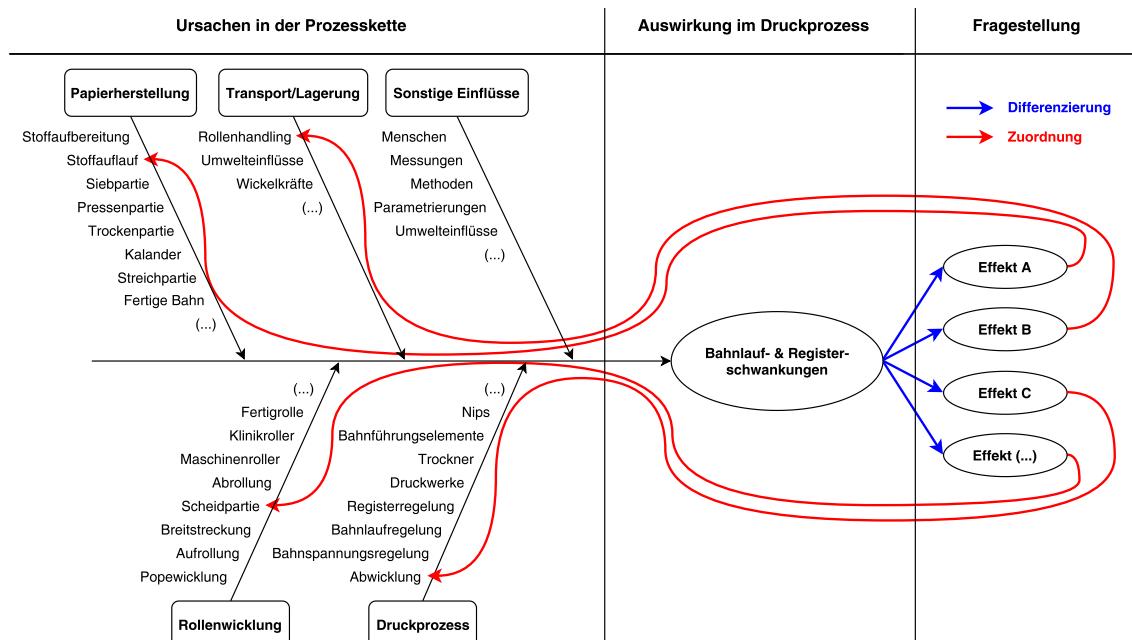


Abbildung 2.4 Differenzierung und Zuordnung im Ursache-Wirkungs-Diagramm

2.3 Herausforderungen

Herausforderung 1: Wahrnehmung des Gesamtprozesses als Summe voneinander getrennter Einzelprozesse Der Herstellungsprozess eines Druckproduktes ist typischerweise in wirtschaftlich und örtlich stark voneinander getrennte Teilprozesse aufgeteilt. Im Großen besteht die Wertschöpfungskette aus den Teilprozessen Substratherstellung², Druckproduktion und Folgeprozesse, wie in Abbildung 2.5 illustriert.

²In dieser Arbeit werden Kartonagen für Faltschachteln betrachtet, die in einer faserbasierten Substratsherstellung erzeugt werden.

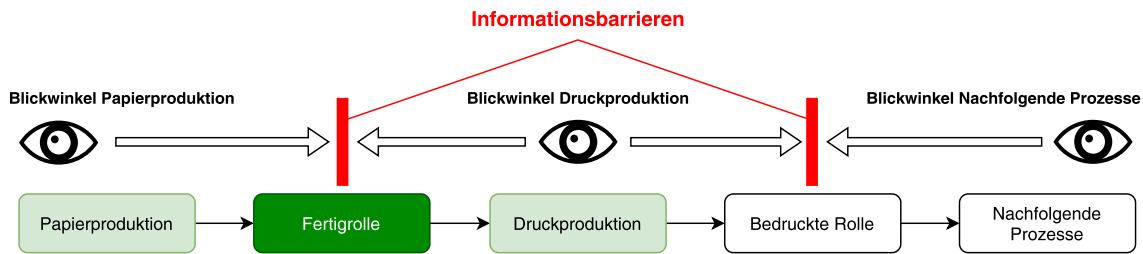


Abbildung 2.5 Wahrnehmung des Gesamtprozesses als Summe voneinander getrennter Einzelprozesse mit entsprechenden Informationsbarrieren

Der Produktionsprozess eines Druckproduktes wird in der Wahrnehmung daher nicht als zusammenhängender Gesamtprozess gesehen, sondern vielmehr aus den jeweiligen Blickwinkeln seiner Einzelprozesse. Die Papierherstellung endet bei der Aufwicklung der Fertigrolle. Die Druckproduktion beginnt verfahrenstechnisch bei der Abwicklung der Fertigrolle und endet bei der Aufwicklung der bedruckten Rolle. Der Zugriff auf Produktionsdaten³ aus dem Gesamtprozess ist für jeden Teilprozess auf den jeweils eigenen Prozess begrenzt. Aufgrund der Informationsbarrieren erhält der Papierhersteller dadurch in der Regel keine qualifizierte Rückmeldung, wie die Laufeigenschaften des Substrates in den Folgeprozessen waren. Für eine Druckerei bleibt dagegen unklar inwieweit eigene Prozessprobleme oder vorgelagerte Prozesse für Bahnlaufprobleme oder Registerschwankungen verantwortlich sind. Untersuchungen zu Passerschwankungen bewegen sich daher bis auf wenige Ausnahmen (siehe Kapitel 4.4.5), typischerweise nur innerhalb des Druckprozesses.

Herausforderung 2: Hürden bei der digitalen Vernetzung faserbasierter Wertschöpfungsketten Die Druckindustrie strebt wie viele andere Industrien im Rahmen der Megatrends „Digitalisierung“ und „Industrie 4.0“ nach einer Produktionsübergreifenden *digitalen* Vernetzung von Produktionsprozessen und ganzer Wertschöpfungsketten (siehe Kapitel 4.1). Auf technischer Ebene existieren entsprechende Schnittstellen⁴ und Anwendungen für einen plattformunabhängigen Austausch von digitalen Prozess- und Qualitätsdaten zur Vernetzung voneinander getrennter Produktionen. In faserbasierten Wertschöpfungsketten existieren bisher keine zur Beantwortung der Fragestellung nützlichen digitalen Vernetzungsansätze zwischen der Papierherstellung und Druckproduktion. Einige augenscheinliche Gründe dafür sind:

- Allgemeine und psychologische Hemmschwellen beim Austausch von Produktionsdaten seitens der stark von einander getrennten Teilprozesse, insbesondere zwischen Papierherstellung und Druckproduktion.

³wie z.B. Maschinendaten, Prozessüberwachungsdaten, Qualitätsdaten

⁴z.B. OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) [52]

- Technische Hemmschwellen beim Datenaustausch, insbesondere durch das große Datenvolumen. Da im Vorfeld unklar ist, welche Prozessschwankungen in Bezug auf die Druckprozessschwankungen relevant sind und welche nicht, müssen zunächst möglichst viele Daten in sämtlichen Teilprozessen gesammelt, vorgehalten und schließlich analysiert werden.
- Hemmschwellen im Bereich der Datenkonsistenz und Vergleichbarkeit von Prozessdaten aus unterschiedlichsten Teilprozessen und von unterschiedlichen Papierlieferanten, mit jeweils individuellen Prozessen und Datensystemen, trotz Ausnutzung standardisierter Schnittstellen.
- Hemmschwellen im Bereich des Datenanalyseaufwandes und den dafür notwendigen Kapazitäten und Kompetenzen. Entsprechende Analysen müssen perspektivisch durch Papierhersteller und/oder Druckereien durchgeführt werden, was in beiden Fällen nicht zum Kerngeschäft dieser Betriebe gehört.

Herausforderung 3: Für Ursachenanalyse nicht hilfreiche Datenvisualisierung Ein weiteres Problem besteht darin, dass Bahnlauf und Registerschwankungen nicht besonders intuitiv zu interpretieren sind. An Druckmaschinenleitständen sieht man in der Regel Visualisierungen der Passermarken, die die aktuellen Abweichungen anzeigen. In Dashboards für die Qualitätssicherung werden die Messdaten im besten Fall als Zeitreihen dargestellt oder in statistische Kennzahlen oder Trendlinien überführt. Mit diesen Darstellungsformen ist nicht ersichtlich aus welchen einzelnen Effekten sich die Prozessstörungen zusammensetzen und welche Ursachen sie jeweils haben könnten.

Herausforderung 4: Kaum Erfahrung welche Informationen Bahnlauf- und Registerschwankung enthalten In der Fachliteratur existieren keine praxisrelevanten Dokumentationen darüber, welche Informationen Bahnlauf- und Registerschwankungen typischerweise enthalten (siehe 4.4). Damit ist im Grunde auch nicht klar, wonach in Daten aus einem digitalen Ansatz⁵ eigentlich gesucht werden soll und welche Daten sinnvollerweise für bestimmte Fragestellungen kausal miteinander korreliert werden können und mit welchen spezifischen Einschränkungen. Offenbar zugängliche Druckmaschinendatensätze existieren ebenfalls nicht. Untersuchungen zu Bahnlauf- und Registerschwankungen haben i.d.R. nur Einzeleffekte im Fokus, aber keinen Prozessübergreifenden Ansatz. Kurz gesagt gibt es keine Erfahrung darin, inline erhobene Bahnlauf- und Registerdaten bzgl. ihrer verschiedenen Ursachen in der Wertschöpfungskette systematisch und differenziert zu analysieren.

⁵Der allgemein durch die Druckindustrie verfolgte Industrie 4.0 Ansatz, der eine Wertschöpfungskette digital miteinander vernetzt.

2.4 Zielsetzung

Zur Überwindung der im Anwendungsbereich identifizierten Herausforderungen im Kontext der zentralen Forschungsfrage, wird folgende Zielsetzung formuliert:

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Erprobung eines eigenständigen Ansatzes, mit dem Bahnlaufstörungen und etwaige Registerschwankungen systematisch analysiert und prozessübergreifend potentiellen Ursachen entlang der Wertschöpfungskette differenziert zugeordnet werden können.

Die Arbeit soll damit einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses bzgl. komplexer dynamischer Vorgänge in Druckprozessen in Rolle-zu-Rolle Prozessen und deren tatsächlichen Ursachen am Beispiel von Bahnlauf- und Registerschwankungen im Verpackungstiefdruck leisten.

Die Relevanz der Arbeit besteht darin, dass durch ein verbessertes Verständnis von kausalen Zusammenhängen zwischen Auswirkung im Druck und potenziellen Ursachen im Prozess eine zielgerichtete Optimierung der relevantesten Störgrößen an den entsprechenden Stellen im Gesamtprozess ermöglicht wird. Zudem ist ein exemplarischer Nachweis konkreter Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in einer praxisrelevanten Fallstudie fundamental wichtig für den in der Druckindustrie allgemein verfolgten Ansatz einer digitalen Vernetzung der Produktionsprozesse. Nachträgliche Prozessanalysen auf Basis digital erhobener Daten aus den Einzelprozessen können zwar Korrelationen zwischen den gesammelten Prozess- und Qualitätsdaten aufzeigen. Aber für das zur Interpretation dieser Daten notwendige Wissen über die Kausalität konkreter Zusammenhänge, liefert die vorliegende Arbeit einen fundamental wichtigen Beitrag. Insbesondere bei Problemfällen besteht durch eine systematische Störgrößenanalyse, im Gegensatz zur Anpassung von Regelungssystemen für Einzelfälle, ein besonders großes Potenzial die zugrundeliegenden Ursachen für die Störungen zu identifizieren und daraufhin gezielte Fehlerbehebungsmaßnahmen einzuleiten, wodurch am Ende die gesamte Produktionskette nachhaltig profitieren kann.

3 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen angrenzender Themengebiete erläutert und entsprechende Fachbegriffe eingeführt. Zunächst werden die relevantesten Prozessschritte der im Anwendungsfall betrachteten Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette, namentlich die Papierproduktion, die Fertigrollenwicklung, der Transport und die Druckproduktion erläutert. Anschließend werden Grundlagen aus der analogen Informationsübertragung eingeführt, die wichtig zum grundlegenden Verständnis des spezifischen Ansatzes der Arbeit und für spezielle Aspekte in den darauffolgenden Untersuchung sind.

3.1 Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette

Rolle-zu-Rolle Verfahren sind Fertigungsverfahren bei denen eine zu veredelnde Materialbahn kontinuierlich abgewickelt und am Ende des Prozesses wieder aufgewickelt wird. Zwischen den beiden Rollen am Anfang und Ende der Maschine wird die Bahn durch verschiedenste Prozesseinheiten, wie Druckwerke, Trockner, Prägewerke etc. geführt. Kerntechnologien für derartige Produktionssysteme sind u.a. Rollenwicklungsprozesse zur Auf- und Abwicklung der Materialbahn sowie Bahnlauf- und Bahnspannungsregelungssysteme zur Realisierung eines möglichst exakten und störungsfreien Bahntransportes durch die Maschine und die darin enthaltenen Bearbeitungsprozesse.

Aus den Blickwinkeln der jeweils voneinander getrennten Teilprozesse (siehe Abbildung 2.5 (S.12)), werden einige Grundlagen der beiden für diese Arbeit besonders relevanten Teilprozesse *Papierproduktion* und *Druckproduktion* erläutert. Außerdem wird die Herstellung der *Fertigrolle* erläutert, die quasi als Schnittstelle die beiden Teilprozesse miteinander verbindet. Der zwischen den eigentlichen Produktionsprozessen notwendige *Rollentransport* und etwaige *Zwischenlagerungen* werden zur Vervollständigung ebenfalls kurz erläutert.

3.1.1 Papierproduktion

Die dem Druckprozess vorgelagerte Papierproduktion⁶ teilt sich grundsätzlich in die drei Hauptprozessschritte *Papierherstellung (PH)*, *Papierveredelung (PV)* und *Papierverarbeitung (PA)* auf. Je nach Papierfabrik und Produkt sind Unterprozesse mehr oder weniger integriert. Jede Papiermaschine endet mit der Aufrollung der Bahn zur Mutterrolle. Die Papierverarbeitung mit der Fertigrollenwicklung ist stets entkoppelt von der Papiermaschine, wird aber typischerweise sehr zeitnah und örtlich direkt hinter der Papiermaschine durchgeführt um Transportwege und Lagerzeiten kurz zu halten. Ein beispielhafter Papierproduktionsprozess bis zur Fertigrolle ist in 3.1 abgebildet. Hierbei wird deutlich, dass die Papierbahn auf einer konfektionierten Fertigrolle innerhalb der Papierfabrik, je nach konkretem Prozess, bereits mehrfach auf und wieder abgewickelt wird.

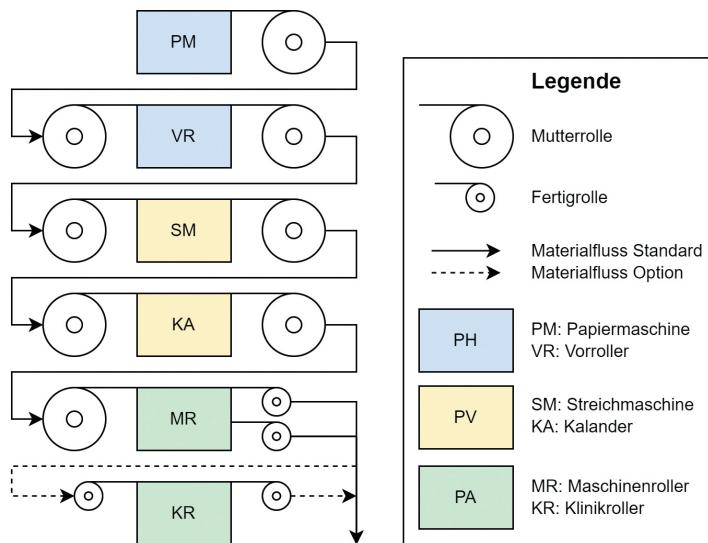


Abbildung 3.1 Nicht vollständig integrierter Papierherstellungsprozess mit den Produktionsabschnitten Papierherstellung (PH), Papierveredelung (PV) und Papierverarbeitung (PA) mit Rollenwickelprozesse als verbindendes Element nach [25]

3.1.1.1 Papierherstellung und Papierveredelung

Papiermaschine Die Papierherstellung selbst hat sich seit über zweitausend Jahren vom Grundprinzip kaum verändert. Seit je her werden Fasern in Wasser aufgequollen und in einer Wasser-Faser Suspension aufgeschwemmt und anschließend entwässert, um so einen festen Faservlies zu erzeugen. Im Anschluss wird dem Vlies solange Wasser entzogen bis ein festes Papier entsteht. Schließlich werden Oberflächeneigenschaften über die Glättung

⁶Die in dieser Arbeit betrachteten Substrate sind Kartonagen. Der Begriff Papier ist hier also eine Verallgemeinerung und kann synonym verwendet werden.

oder einen Papierstrich final eingestellt. Dieser ganze Prozess läuft innerhalb einer Papiermaschine ab, die eine hochkomplexe technische Anlage darstellt. Je nach Art und Aufbau des Produktes (Karton, Papier, Mehrlagigkeit etc.) sind Papiermaschinen unterschiedlich dimensioniert und konfiguriert. Typischerweise ist eine Papiermaschine 150 m lang, 10 m breit und produziert mit einer Bahngeschwindigkeit von bis zu 2000 m/min. Bei der für diese Arbeit relevanten Kartonmaschinen⁷ liegen die Produktionsgeschwindigkeiten bei etwa 500 m/min [30]. Abbildung 3.2 zeigt das Prozessschema einer Papiermaschine vom Stoffauflauf bis zur Aufrollung.

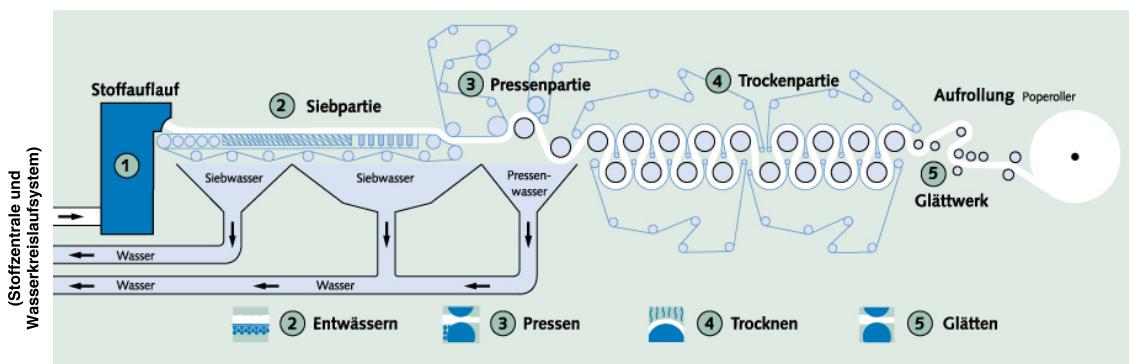


Abbildung 3.2 Papiermaschine vom Stoffauflauf bis zur Aufrollung [13]

Im *Stoffauflauf* wird eine Wasser- (ca. 99 %), Faser- und Füllstoff- (zusammen ca. 1 %) Suspension über eine Schlitzdüse am Stoffauflaufkasten (engl. Headbox) auf ein umlaufendes Siebband gepumpt. Die noch flüssige Suspension gelangt an dieser Stelle mit einer spezifischen Geschwindigkeit und Schichtdicke auf das Sieb. Die Differenzgeschwindigkeit zwischen Sieb und Suspension (engl. Jet-to-Wire) beeinflusst dabei maßgeblich die Faserorientierung. Bei gleicher Geschwindigkeit legen sich Fasern ungeordnet auf das Sieb ab. Bei ungleicher Geschwindigkeit orientieren sich die Fasern in Maschinenrichtung. Die Schichtdicke, der Volumenstrom und der Faseranteil sind grundlegende Parameter, da sie maßgeblich das Flächengewicht beeinflussen. Turbulenzen in der Düse sorgen dafür, dass die Suspension nicht verklumpt. Die fluidodynamischen Prozesse im Stoffauflauf sind ein zentraler Faktor bei der Homogenisierung der aufgeschwemmmten Suspension.

In der Siebpartie wird der Suspension über Schwerkraft und Vakuum mit Hilfe von Saugwalzen, Saugkästen und Foils Wassers entzogen, wodurch am Ende ein Faservlies mit ca. 80 % Restfeuchte auf dem Sieb entsteht. Zur weiteren Vergleichmäßigung der Faserverteilung und Reduzierung der Faserorientierung wird bei manchen Papiermaschinen auch mit

⁷Die in dieser Arbeit untersuchten Bahnen stammen von unterschiedlichen Herstellern und damit von verschiedenen Kartonmaschinen

einer seitlichen Oszillation des Siebes gearbeitet, wodurch es an siebnahen Schichten zu großen Turbulenzen kommt, was die Flockenbildung auf dem Sieb reduziert. [111]

Bei mehrlagigen Produkten, wie beispielsweise Kartonagen für Verpackungen, gibt es mehrere solcher Stoffaufläufe und Siebpartien, die jeweils mit spezifischen Suspensionen beschickt werden. Jede Lage bringt eigene mechanische und andere Eigenschaften mit. Außenlagen müssen z.B. gut bedruckbar sein. Innenlagen sorgen z.B. für die notwendige mechanische Zugfestigkeit und/oder für das gewünschte Volumen bzw. Flächengewicht.

In den nachfolgenden Pressen- und Trockenpartien wird dem Faservließ kontinuierlich immer weiter Wasser entzogen, sodass am Ende eine Restfeuchtigkeit von 3% bis 8% eingestellt ist, je nach Produkt.

In Papierverarbeitungseinheiten können Oberflächeneigenschaften und Flächengewicht optional eingestellt und optimiert werden. In der Streichpartie kann die Bahn mit unterschiedlichsten Füllstoffen⁸ beschichtet werden. Im Kalander wird über Reibung, Druck und Hitze die Papieroberfläche mechanisch geglättet. Abweichend zu den Abbildungen 3.1 und 3.2 sind diese Prozessschritte typischerweise in der Papiermaschine voll integriert.

[30, S.259-266]

Der Papierherstellungsprozess läuft kontinuierlich und mit konstanter Prozessgeschwindigkeit ab. Prozessvariationen in der Papierherstellung sind typischerweise an dem jeweiligen Rhythmus der Fehlerursache gekoppelt. Beispiele sind Drehfrequenzen von Walzen (z.B. Leitwalzen, Trockenzyylinder, Kalanderwalzen) sowie Umlaufsiebe und Filzbänder, Eigenfrequenzen diverser Maschinenteile oder Druckschwankungen in der Suspensionförderung in der Headbox [65].

Merke: Jeder Papierherstellungsprozess unterliegt individuellen Prozessschwankungen, die über die Zeit vergleichsweise konstant auftreten, da der Herstellungsprozess an sich ebenfalls kontinuierlich und möglichst konstant abläuft. Die Schwankungen selbst sind aber so individuell wie die jeweilige Papiermaschine bzw. das Produkt, welches mit ihr hergestellt wird.

Mutterrollenwicklung Nach der Herstellung des fertigen Papiers wird die maschinenbreite Papierbahn in der *Popewicklung* oder *Mutterrollenwicklung* am Ende der Papiermaschine bei voller Maschinengeschwindigkeit, kontinuierlich auf ca. 1 m dicke Tamboure zu Mutterrollen gewickelt. Die Mutterrollen fassen je nach Papiertyp z.B. 60 000 m und haben einen Durchmesser von bis zu 3,5 m und wiegen bis zu 70 t. An den Tambouren wird

⁸z.B. Mineralpigmente, Stärke oder Latex

formschlüssig das Moment für die Auf- oder Abwicklung angelegt. Außerdem bieten die Tamboure Angriffspunkte für den Transport und für eine gewichtsentlastende kombinierte Zwischenlagerung auf dem Umfang und der Stahlachse, um Schäden an äußeren Lagen zu verhindern, bevor sie weiterverarbeitet werden können.

Grundsätzlich ermöglicht die Konfektionierung auf Rollen eine kompakte Speicherung des Materials, bei dem die Materialeigenschaften so wenig wie möglich verändert werden. Zudem wird ein einfacher Transport in den nachfolgenden Prozess ermöglicht.

3.1.1.2 Materialeigenschaften

Papier kann über eine Vielzahl an Materialeigenschaften charakterisiert werden. Die folgende Aufzählung stellt nur eine beispielhafte Auswahl dar:

- Dicke / Volumen
- Dichte / Flächenbezogene Masse
- Rauheit / Porosität / Glätte
- Adhäsion / Friktion / Haftreibung
- Wasseraufnahmeverhalten (Hygroskopie)
- Feuchtigkeit
- Bedruckbarkeit / Druckfarbenabsorption
- Feuchtdehnungsverhalten (Hygroexpansion) / Thermisches Dehnungsverhalten
- Querkontraktionsverhalten / Elastizitätsmodul / Belastungs- Verformungsverhalten

[84, 23-89], [32], [107]

Eine zentrale Herausforderung in der Papierherstellung besteht darin, sämtliche Papiereigenschaften über die volle Maschinenbreite (CD) homogen und über die Zeit, also in Maschinenrichtung (MD), möglichst konstant zu halten. Eine vollständige Homogenisierung des Prozesses gelingt in der Praxis nicht, wodurch die Materialeigenschaften in CD-Richtung profiliert und in MD-Richtung als schwankend angenommen werden können. Abbildung 3.3 zeigt zur Veranschaulichung dazu schematisch die Überlagerung von CD- und MD-Profilen im Stoffaufbau am Beispiel der Materialdicke T . Grundsätzlich können auch andere Materialeigenschaften auf diese Weise variieren. [115]

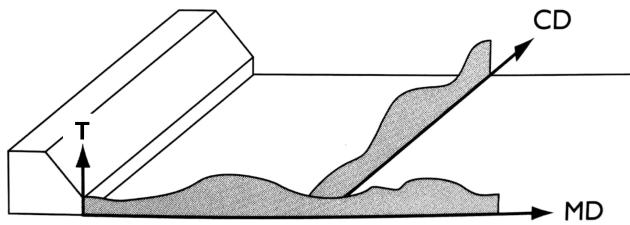


Abbildung 3.3 CD- und MD-Variationen im Stoffauflauf des Papierherstellungsprozesses [115]

Als besonders einflussreich auf die Bahnlaufeigenschaften und die Wickelqualität gelten in diesem Kontext Eigenschaften wie Materialdicke, Restfeuchte, Oberflächenrauheit und ganz besonders das Belastungs- Verformungsverhalten.

Die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften ist ein weiterer wichtiger Aspekt für die Laufruhe. Fasern können in Längsrichtung mehr Kräfte aufnehmen als in Querrichtung. Dadurch besitzt Papier bei Orientierung der Fasern im Stoffauflauf anisotrope Materialeigenschaften, wie beispielsweise richtungsabhängiges Zug- und Feuchtdehnungsverhalten. Die Richtungsabhängigkeit des Materials kann über die Zugsteifigkeitsausrichtung (TSO = engl. Tensile Stiffness Orientation), kurz *Faserorientierung* ermittelt werden. Sie beschreibt den Winkel bei dem die Zugsteifigkeit (TSI = engl. Tensile Stiffness Index) maximal ist.

Papier ist außerdem ein viskoelastisches Material, was bedeutet, dass das Ergebnis aus einer Belastung nicht nur von seiner Größe abhängt, sondern auch von der Geschwindigkeit, sowie von der Temperatur und dem zeitlichen Belastungsverlauf. Papier wird daher vereinfacht als System aus Federn und Dämpfern betrachtet. In einem einfachen Voigt-Kelvin Modell modelliert die Feder (H = Hooke-Element) den reversiblen elastischen Anteil, und der Dämpfer (N = Newton-Element) den zeitabhängigen plastischen Anteil. Eine Spannung σ_0 verteilt sich dann wie folgt auf die beiden parallel geschalteten Elemente. Wobei ε den Betrag der Deformation, $\dot{\varepsilon}$ die Deformationsgeschwindigkeit, E das Elastizitätsmodul und η die Viskosität beschreibt.

$$\sigma_0 = \sigma_H + \sigma_N = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Die Relaxion der Dehnung ε unter konstanter Spannung σ bzw. die Relaxion der Spannung unter konstanter Dehnung ist allgemein als zeitabhängig anzunehmen und verläuft nichtlinear. Das Kraft-Verformungsverhalten in CD, MD und auch in Z-Richtung (ZD) wird in dieser Arbeit mit Verweis auf [84, S.40-52] im Allgemeinen, bzw. auf [74] und [32, S.125-127] in Bezug auf die für diese Arbeit besonders relevanten Kartonagen, als nichtlinear angenommen.

In dieser Arbeit wird in Anlehnung an [58, S.5-6] und [74] für alle Richtungen (CD, MD und ZD) folgendes allgemeines nichtlineares Materialgesetz für Papier angenommen und verwendet (siehe Abbildung 3.46 (S.71)), mit E^{ini} als initiale Elastizitätsmodul und S als obere Spannungsgrenze.

$$\sigma = E^{ini} \left(\frac{1}{1 + \frac{E^{ini}}{S} \cdot \epsilon} \right) \cdot \epsilon \quad (3.2)$$

Abbildung 3.4 zeigt den sich aus Gleichung 3.2 ergebenden Spannungs-Dehnungsverlauf.

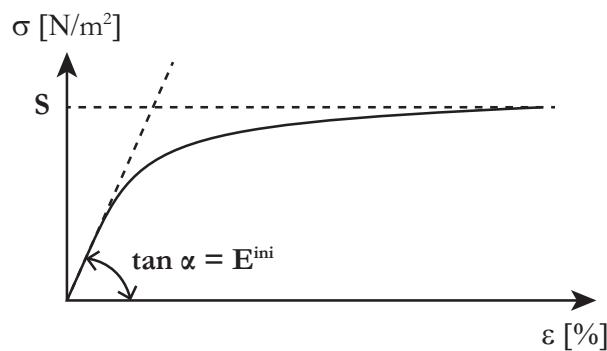


Abbildung 3.4 Allgemeines nichtlineares Materialgesetz von Papier [58, 5-6]

Zusammenfassend kann Papier als *flächiger, poröser, inhomogener, aus Fasern netzartig aufgebauter, anisotroper und hygroskopischer Werkstoff* betrachtet werden. Das Spannungs-Verformungsverhalten ist u. a. abhängig von:

- dem Ort der Belastung
- der Richtung der Belastung
- der Stärke der Belastung
- dem zeitlichem Belastungsverlauf (Geschwindigkeit, Frequenz, Dauer)
- der Belastungshistorie
- der Temperatur
- der Feuchtigkeit

[25, S.42]

Merke: Durch Prozessschwankungen im dynamisch hochkomplexen Papierproduktionsprozess ergeben sich inhomogene Druck- bzw. Spannungs- Verformungseigenschaften in CD-, MD- und ZD-Richtung, welche in der Materialbahn ortsfest gespeichert sind. Wie sich etwaige Materialstörungen auf den Bahnlauf auswirken, hängt u. a. aufgrund des nichtlinearen materialspezifischen Spannungs- Verformungsverhalten, vom Arbeitspunkt und von den allgemeinen Betriebsbedingungen des jeweiligen Rolle-zu-Rolle Prozesses ab.

3.1.1.3 Papierverarbeitung bzw. Fertigrollenwicklung

In der Papierverarbeitung werden die Mutterrollen schließlich auf Papphülsen zu Fertigrollen konfektioniert. Dieser Teilprozess wird im Weiteren verallgemeinert als *Fertigrollenwicklung* bezeichnet. Der Prozess wird auf einem sogenannten *Maschinenroller*, auch *Rollenschneider* genannt, durchgeführt.

Zur Anpassung von Konfektionierungsparametern oder zur Korrektur der Wickelqualität von Fertigrollen, gibt es noch sogenannte *Klinikroller*. Diese sind häufig in Funktionalität und Maschinenaufbau mit dem Maschinenroller vergleichbar, nur dass Fertigrollen abgewickelt werden und keine Mutterrollen. Dementsprechend sind sie deutlich kleiner dimensioniert.

Merke: *Prozessschwankungen in der Papierverarbeitung, wie beispielsweise in der Popewicklung und generell Umrollvorgänge sowie Zwischenlagerungen und Transport (siehe 3.1.2) der Rollen innerhalb der Papierfabrik nehmen Einfluss auf die Belastungshistorie der Materialbahn und wirken damit zusätzlich auf die schlussendliche Materialbeschaffenheit. Jeder Umrollvorgang kehrt zudem die Materialbahnrichtung um.*

Die Fertigrollenwicklung ist im Gegensatz zur Popewicklung ein diskontinuierlicher Prozess, bei dem die maschinenbreite Mutterrolle zu kundenspezifischen, und damit für Druckmaschinen geeignete Rollengrößen konfektioniert werden (siehe Abbildung 3.5). Insbesondere Rollenbreite, Rollendurchmesser, Hülsendurchmesser, Gewicht und Materiallänge sind wichtige Rollenparameter (siehe Abbildung 3.11 (S.29)). Im weiteren Verlauf wird der Begriff *CD-Rollenposition* für die Position der jeweiligen Fertigrolle auf der ursprünglichen Mutterrolle in CD-Richtung als fortlaufende Nummer verwendet, beginnend bei der Antriebsseite (DS = engl. drive side). Ein *Rollenset* oder *Rollenwurf* bezeichnet alle Fertigrollen die zeitgleich gefertigt wurden. Je nach Material und Rollendimensionierung lassen sich unterschiedlich viele CD-Rollenpositionen und Rollensets produzieren.⁹

⁹Beim letzten Set kann es dazu kommen, dass die geforderte Fertigrollenlänge nicht ganz erreicht werden kann, sodass die Bahn der nächsten Mutterrolle angeklebt (engl. *gespliced*) wird, um das Rollenset zu Ende zu wickeln. Die Fertigrolle setzt sich dann aus der Papierbahn zweier unterschiedlicher Mutterrollen zusammen.

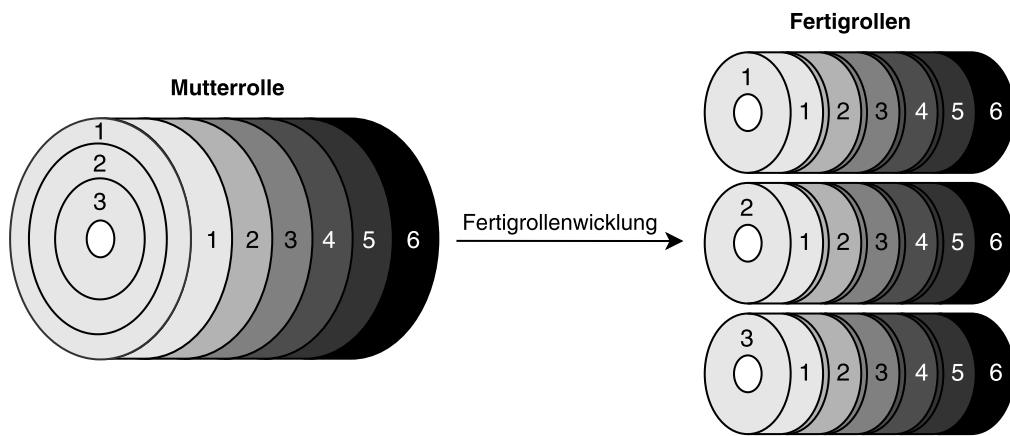


Abbildung 3.5 Prinzipielle Aufteilung einer einzelnen Mutterrolle zu 18 Fertigrollen mit CD-Rollenposition (1-6) und Set-Nummer (1-3)

Merke: Die Materialeigenschaften einer Rolle sind allgemein stark abhängig von der Inhomogenität der maschinenbreiten Materialbahn (CD-Profil und MD-Schwankungen) in Kombination mit der individuellen Aufteilung der Mutterrolle in einzelne Fertigrollen in der Fertigrollenwicklung. Die Konfektionierung kann bei jeder Mutterrolle anders sein, je nach Kundenauftrag in der Papierfabrik.

Rollenwicklerklassen Innerhalb der betrachteten Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette kommen unterschiedliche Wicklerklassen mit verschiedenen Wickelprinzipien, Wickelparametern und Antriebskonzepten zum Einsatz, die jeweils spezifische Einflüsse auf den Wickelaufbau (siehe 3.1.1.3) besitzen. *Zentrumswickler* kommen typischerweise in Druckmaschinen und Weiterverarbeitungsmaschinen zum Einsatz. *Umfangswickler* und *kombinierte Zentrums- und Umfangswickler* kommen in der Popewicklung zum Einsatz. In der Fertigrollenwicklung kommen sowohl kombinierte Zentrums- und Umfangswickler als auch reine Umfangswickler zum Einsatz [25]. Das für diese Arbeit wichtigste Antriebskonzept zur Herstellung der Fertigrollen für Kartonagen ist der Umfangswickler in der Bauform als *Doppeltragwalzenroller*. Sämtliche Rollen, die in dieser Arbeit analysiert werden, wurden auf Maschinenrollern dieser Bauart gefertigt. Abbildung 3.6 zeigt das Prozessschema eines typischen Doppeltragwalzenrollers.

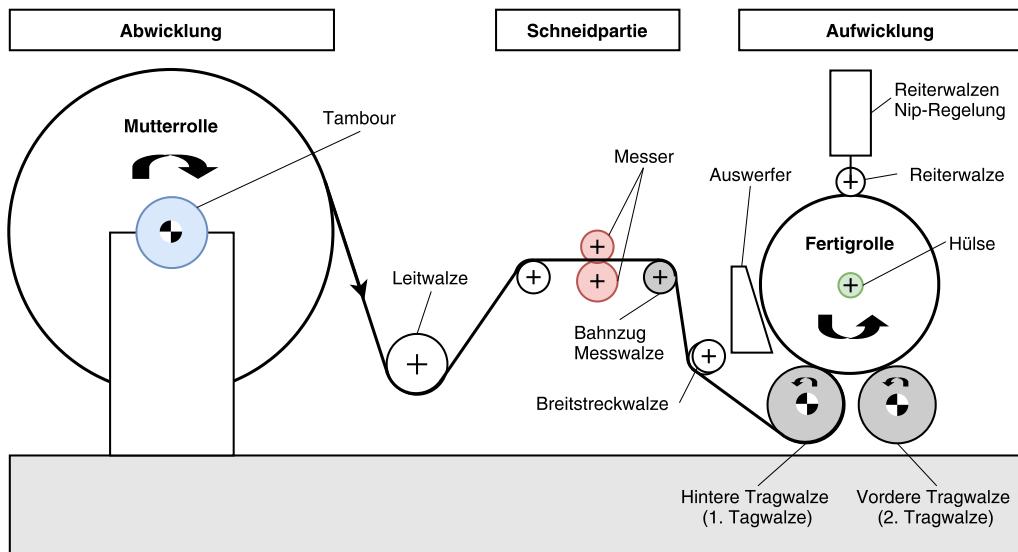


Abbildung 3.6 Schematischer Aufbau eines Doppeltragwalzenrollers (in Anlehnung an [83])

Anders als beim Stützwalzenroller werden die Fertigrollen beim Doppeltragwalzenroller in einem Walzenbett nebeneinander und nicht gegenüberliegend an einer Stützwalze gelagert. Von oben drückt eine Reiterwalze die Rolle nach unten auf die Tragwalzen um eine ausreichende Nipkraft gegenüber den Tragwalzen aufzubringen. Die immer größer werdende Gewichtskraft der Rolle während der Wicklung führt zu steigenden Nipkräften und stellt eine typische Herausforderung im Wickelprozess bei Tragwalzenrollern dar. Die beiden Tragwalzen sind separat angetrieben, wobei die hintere Tragwalze (1.) drehzahlgeregelt die Bahngeschwindigkeit bestimmt. Über die vordere Tragwalze (2.) wird das Differenzdrehmoment eingeleitet, wodurch der Wickelaufbau (siehe S.28) beeinflusst wird. Für den Wicklungsprozess besonders wichtige Eigenschaften der Tragwalzen sind neben einer exakten Geometrie auch entsprechende Oberflächeneigenschaften, die eine möglichst geringe Vibrationsanfälligkeit der Tragwalze bzw. der Rolle sicherstellen sollen (siehe Kapitel 4.4.2). Im Wesentlichen besteht ein Doppeltragwalzenroller außerdem noch aus der Abwicklung¹⁰, der Schneidpartie und einer oder mehrerer Breitstreckwalze(n) zur Separierung der längs geschnittenen Bahnen kurz vor der Aufrollung, sodass die Fertigrollen nicht verblocken.

***Merke:** Jeder Wickelprozess hinterlässt potentiell spezifische Prozessstörungen in der Bahn, die insbesondere vom Aufbau und den Prozessbedingungen des jeweiligen Wicklers abhängen.*

¹⁰Je nach dem ob es sich um einen Maschinenroller oder Klinikroller handelt, sind hier Mutterrollenabwicklung oder Fertigrollenabwicklung gemeint.

Schneidpartie Da in dieser Arbeit insbesondere Bahnkantendaten untersucht werden, ist der Schneidprozess innerhalb der Fertigrollenwicklung ein besonders wichtiger Prozessschritt, da hier die eigentliche Bahnkante erzeugt wird. In der *Schneidpartie* (engl. Slitter) wird die maschinenbreite Papierbahn der Mutterrolle während des Umrollvorgangs mit Hilfe von Rundmessern längs aufgetrennt. In der Papier- oder Kartonherstellung wird in der Regel das Scherschneideprinzip eingesetzt. Dabei wird die Materialbahn vertikal an der Scherkante zweier gegenüberliegender Rundmesser abgelenkt. Zur Erzielung einer hohen Schneidqualität müssen Ablenkungseffekte der Bahn im Scherspalt möglichst klein gehalten werden [104, 395]. Aus diesem Grund kommen für starre Materialien, wie dicke Papiere und Kartonagen, typischerweise sogenannte *Tangentialschneider* zum Einsatz. Abbildung 3.7 zeigt den schematischen Aufbau.

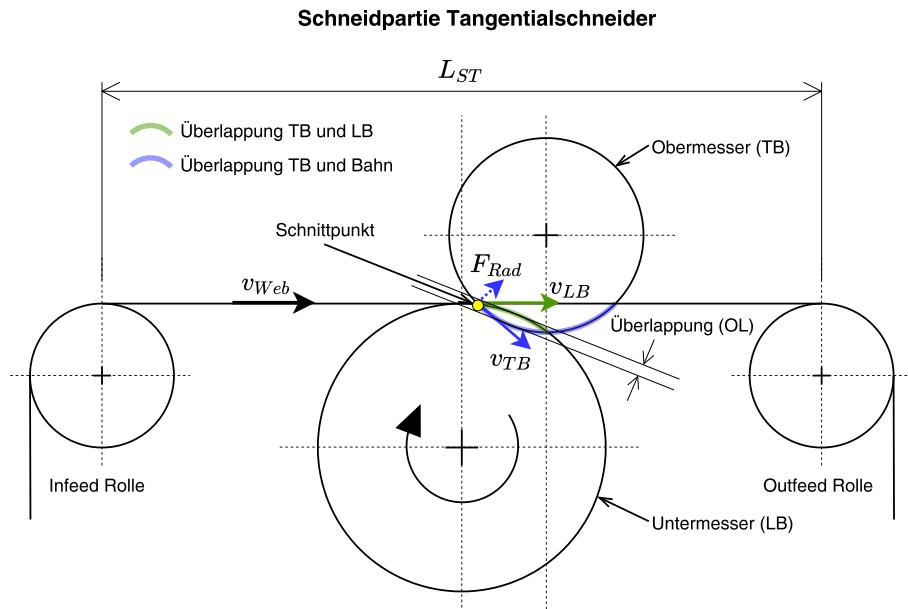


Abbildung 3.7 Schematische Darstellung der Schneidpartie als Tangentialschneider in Anlehnung an [114]

Die Schneidpartie beschreibt den Bereich zwischen Infeed und Outfeed Rolle, die vor und nach den Rundmessern angeordnet sind. Die Rollen sorgen dafür, dass das Material glatt durch die Messer läuft. Die Infeed und Outfeed Rollen müssen daher sehr exakt ausgerichtet sein, um die Bahn gerade und ruhig zu führen. Häufig wird an der Outfeed Rolle der Bahnzug gemessen, um den Bahntransport in diesem Bereich möglichst gut zu kontrollieren. Das Obermesser (TB = engl. Top Blade) ist zum Untermesser (LB = engl. Lower Blade) tangential versetzt angeordnet. Zur Sicherstellung eines Schereffektes unterscheiden

sich die Oberflächengeschwindigkeiten beider Messer untereinander und relativ zur Bahn wie folgt:

$$v_{Web} < v_{TB} < v_{LB} \quad (3.3)$$

Der sogenannte *Overspeed* bezeichnet das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Obermesser zur Bahn (siehe Gleichung 3.4). Bei der Verarbeitung von Kartonagen liegt er typischerweise im Bereich zwischen 3% und 5%.

$$\Delta v = \frac{v_{Web}}{v_{TB}} \quad (3.4)$$

Das Untermesser ist beispielsweise mit einem Verhältnis von 1.5:1 i.d.R. deutlich größer als das Obermesser. Häufig wird nur das Untermesser angetrieben und schleppt das Obermesser über Friktion mit. Es gibt aber auch direkt angetriebene Obermesser. Je nach Antriebskonzept können die Messer separat angetrieben werden oder sind mit einem Übersetzungsgetriebe fest an die Bahngeschwindigkeit gekoppelt. Abbildung 3.8 zeigt zwei unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile der Schneidpartie zur Bahngeschwindigkeit des Wicklers über einen kompletten Wicklungszyklus einer Rolle. In den rot hinterlegten Bereichen ist die Geschwindigkeitsdifferenz zu klein oder negativ. Der Schereffekt wird dann gestört oder unterbrochen und es kommt vermehrt zu BahnrisSEN oder anderen Störeffekten. Je nach Antriebskonzept und eingestellten Geschwindigkeitsprofilen kann das Overspeed-Profil über einen Rollenwicklungszyklus variieren.

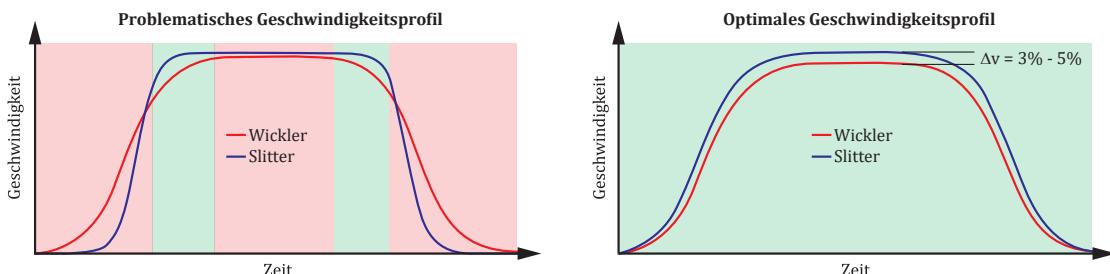


Abbildung 3.8 Vergleich eines Geschwindigkeitsprofils einer Schneidpartie mit kritischen Geschwindigkeitszonen (rot hinterlegt) im Gegensatz zu einem optimalen Geschwindigkeitsprofil (rechts), in Anlehnung an [11]

Messervibrationen und Abnutzungseffekte sind typische Prozessstörungen einer Schneidpartie, die direkt Einfluss auf die Bahnkantenqualität nehmen. In Abbildung 3.9 sind zwei exemplarische Messerunwuchten (links) dargestellt sowie der prinzipielle Einfluss der Messerabnutzung auf den Messerradius von Ober- und Untermesser (rechts).

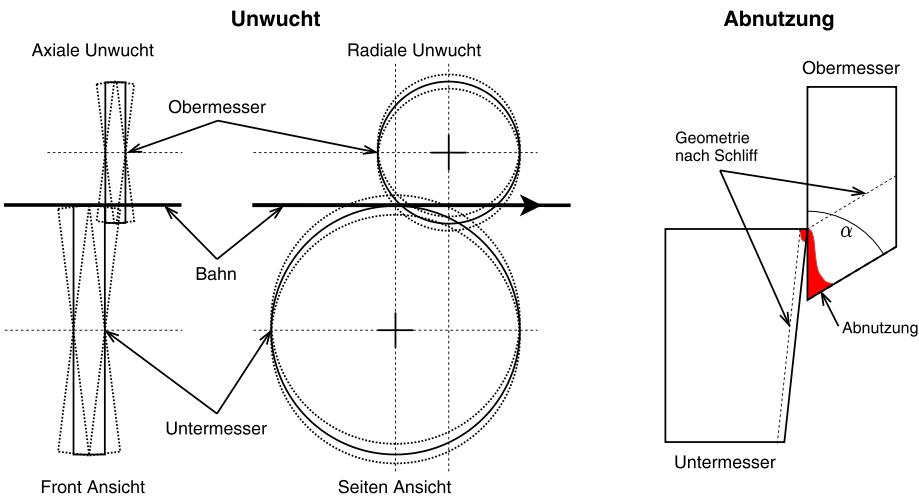


Abbildung 3.9 Beispielhafte Ursachen für Schnittprobleme; Unwucht (links) nach [86] und Abnutzung (rechts) nach [114]

Generell ist das tangentiale Schneideverfahren ein vergleichsweise komplexer Prozess bei dem Probleme im Schneidprozess häufig auf eine Kombination mehrerer Ursachen zurückzuführen sind. Einige wichtige Parameter/Eigenschaften zur Erzielung einer sauberen Bahnkante sind zusammengefasst:

- Messerprofil und Messerschärfe
- Scherwinkel
- Überlappung
- Seitenkraft
- Geometrie
- Differenzgeschwindigkeit
- Bahngeschwindigkeit
- Bahnlaufstabilität

[14] [114]

Merke: Ein nicht idealer Schneidprozess hinterlässt spezifische Bahnkantenstörungen, die als solche ortsfest und dauerhaft in der Bahn gespeichert sind. Bahnkanten dienen in den meisten Rollendruckmaschinen als Regelgröße zur seitlichen Bahnpositionierung. Variationen in den Bahnkanten stellen damit eine indirekte aber potentielle Ursache für seitliche Bahnlaufstörungen im Druckprozess oder ggf. auch nachgelagerten Prozessen dar.

Wickelaufbau Ein zentrales Qualitätskriterium beim Wickeln einer Rolle ist der Aufbau der Wickelhärte über den Radius, auch Wickelhärteverlauf oder Wickelaufbau (engl. Tapering) genannt, der über das Zusammenspiel mehrerer Wickelparameter eingestellt werden kann. Abhängig von der Bauart des Wicklers und dem verwendeten Wickelprinzip, stehen unterschiedliche Wickelparameter zur Verfügung. Es existieren Wicklerklassen mit nur einem einzigen Parameter, wie z.B. den Zentrumswickler. Mehr Parameter ermöglichen in der Tendenz einen breiteren Wickelhärtebereich abzudecken. Bei einem Doppeltragwalzenroller stehen die folgenden vier Wickelprozessparameter zur Verfügung, wobei jeder Parameter für sich gesehen die Wickelhärte beeinflusst.

- Bahnzug
- Nipkraft¹¹
- Drehmoment¹²
- Bahngeschwindigkeit¹³

Da sich das Rollengewicht, die Umfangsgeschwindigkeit und die Nipkräfte über den Zyklus einer Rollenwicklung stark verändern und damit direkt auf den Wickelhärteverlauf einwirken, müssen sie über den Rollenradius angepasst werden. Einen typischen Wickelhärteverlauf mit entsprechenden Wickelparameterfunktionen an einem Doppeltragwalzenroller zeigt Abbildung 3.10. [23][3-33]

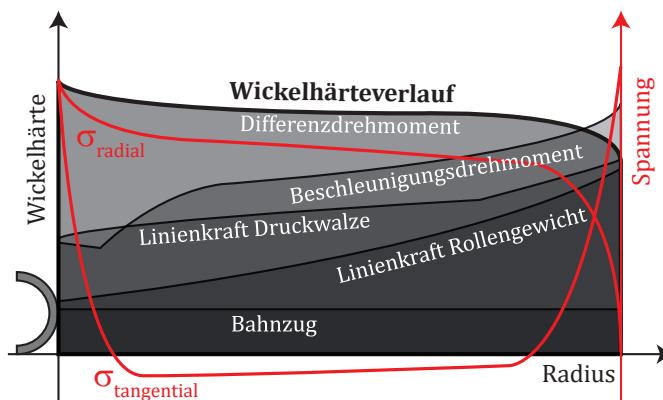


Abbildung 3.10 Prinzipielles Zusammenspiel der an einem Doppeltragwalzenroller zur Verfügung stehenden Wickelparameter zur Erzielung eines optimalen Wickelhärteverlaufs in Bezug auf die radiale und tangentiale Wickelspannung, in Anlehnung an [25]

¹¹Im Rollenwicklungskontext ist mit *Nip* die Kontaktzone zwischen einer Walze und der Substrat führenden Fertigrolle gemeint

¹²Beschleunigungsdrehmoment, der hinteren Tragwalze (1.) und das Differenzdrehmoment der vorderen Tragwalze (2.)

¹³Nur in speziellen Fällen besteht eine Geschwindigkeitsabhängigkeit auf die Wickelhärte wie z.B. im Kontext von Vibrationsanregungen und in Bezug auf eine Einschleppung von Luft in den Wickel

Beim Doppeltragwalzenroller wird der Bahnzug i.d.R. konstant gehalten. Nipkräfte und das Differenzdrehmoment stellen den gewünschten Wickelhärteverlauf (schwarze Linie) unter Berücksichtigung des steigenden Rollengewichtes ein. Ein optimaler Wickelhärteverlauf ist am Kern erhöht und verläuft über den Innenteil der Rolle konstant bis leicht abfallend zu den äußeren Lagen. Die sich daraus ergebene Wickelspannung teilt sich in eine radiale und eine tangentiale Spannung σ_{radial} bzw. $\sigma_{tangential}$ auf (rote Linien). Die Tangentialspannung ist in großen Teilen sehr klein oder gar negativ. Die Radialspannung fällt mit steigendem Rollenradius immer weiter ab.

Merke: Variationen im Wickelprozess können die Wickelparameter gegenseitig stören und wirken dadurch direkt auf den Wickelaufbau. Die komplexen Wechselwirkungen führen schließlich zu einem spezifischen Wickelaufbau, der direkt bestimmte Rollendefekten verursacht, oder andere begünstigt (siehe auch Tabelle 4.1 (S.80)).

Rollengeometrische Wickelphänomene Abbildung 3.11 zeigt eine ideale Fertigrolle mit den wichtigsten geometrischen Parametern wie die Breite W , den Hülsendurchmesser $D_{Hülse}$ (auch D_{leer}), den Rollendurchmesser D_{Rolle} (auch D_{voll}) sowie die auf dem Wickel befindliche Bahnlänge L und die Materialdicke T .

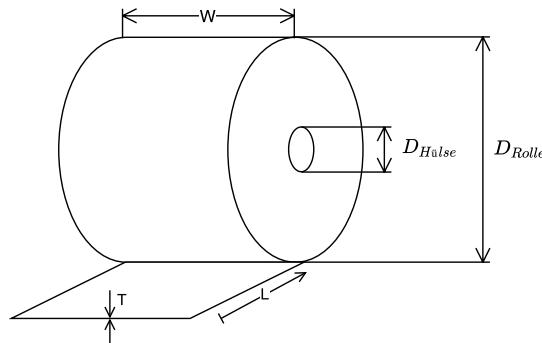


Abbildung 3.11 Idealer zylindrischer Rollenwickel mit den wichtigsten Rollengeometrieparametern: W = Breite; $D_{Hülse}$ = Hülsendurchmesser; D_{Rolle} = Rollendurchmesser; L = Bahnlänge; T = Materialdicke

Durch verschiedenste Einflüsse bzw. Prozessstörungen innerhalb der Papierherstellung, Papierverarbeitung, Lagerung sowie den Rollentransport entsprechen reale Rollen, wenn sie in eine Druckmaschine eingespannt werden, in der Regel nicht einer perfekt zylinderförmigen Spirale, sondern im Querschnitt eher irregulären Vielecken mit Eindellungen und über ihre Breitenerstreckung teilweise unregelmäßigen Kegelstümpfen. Die Rollenbreite

kann darüber hinaus durch seitliche Lagenverschiebungen oder Variationen in der Bahnkante und/oder Bahnbreite variieren. Eine relativ zu einer perfekt zylinderförmigen Rolle abweichende Rollengeometrie wird in dieser Arbeit als *rollengeometrische Wickelstörung* bezeichnet. Etwaige Störungen im Wickel können als komplexer Systemfehler aus Wickler, Material und der Rolle selbst betrachtet werden. Außerdem können mehrere Wickelstörungen in einer Rolle gleichzeitig und in unterschiedlicher Intensität und Ausprägung auftreten. Jede Störung für sich besitzt charakteristische geometrische wie visuelle Merkmale, wodurch sie voneinander differenziert werden können. Sie besitzen unterschiedliche Bezeichnungen und häufig mehrere potentielle Grundursachen. Die meisten Störungen treten in ihrer Ausprägungsstärke graduell auf. Da es keine eindeutige Definition dafür gibt, ab welcher Ausprägungsstärke man diese als *Defekt* deklarieren kann, wird im weiteren Verlauf bevorzugt der Begriff *Phänomen* anstelle von *Defekt* verwendet. Abbildung 3.12 zeigt eine Illustration einiger beispielhafter Phänomene.[23, S.36]

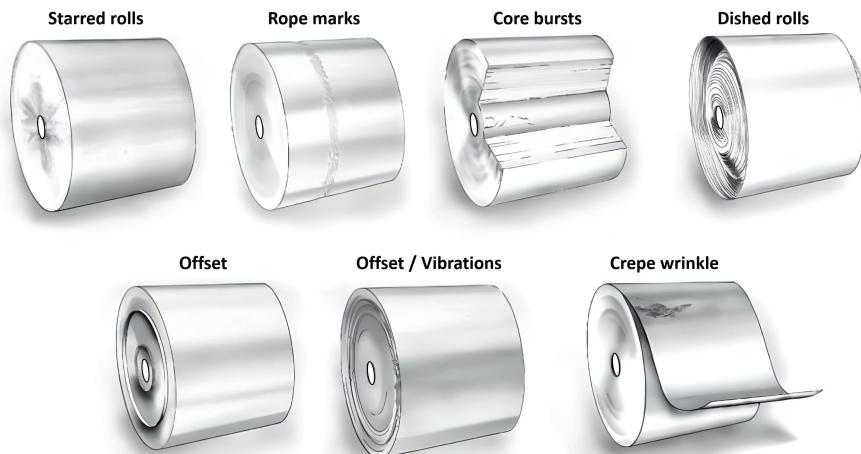


Abbildung 3.12 Beispielhafte Rollendefekte [30, S.384]

Merke: Einige der rollengeometrischen Wickelphänomene stellen potentielle Ursachenquellen für Prozessstörungen im Druckprozess dar.

3.1.2 Rollentransport und -zwischenlagerung

Nach Produktion der Rollen werden diese in Rollenlagern i.d.R. auf der Stirnseite gelagert. Der Transport der Rollen wird meist über den Umfang der Rolle realisiert. Gabelstapler klemmen die Rolle dafür mit einer speziellen Klemmgabel am Umfang. Zur kurzzeitigen Zwischenlagerung werden Fertigrollen meist auf dem Umfang abgesetzt. Mutterrollen werden entweder zentral auf dem Tambour, nur auf dem Umfang oder kombiniert zwischengelagert. Durch das Eigengewicht des Wickels kann es grundsätzlich dauerhaft zu

radialen Deformationen kommen, was wiederum zu Problemen in nachfolgenden Prozessen führen kann. Grundsätzlich gilt, je geringer die Wickelhärte, desto anfälliger ist eine Rolle für Deformationen (siehe Kapitel 4.4.3).

Ein weiterer problematischer Effekt für den Bahnlauf in Folgeprozessen sind Querprofile in der Materialbahndicke, was im Wickel zu ungleichförmigen Spannungsbelastungen führt. Das Material wird dann in manchen Bereichen besonders stark gedeht und gedrückt. Bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze kommt es zu einer nicht reversiblen Überdehnung der Bahn, was wiederum zu ungleichmäßiger Bahnspannung (CD und/oder MD) in den Folgeprozessen führt (engl. Baggy Paper), siehe Tabelle 4.1 WD-6) und [45].

Außerdem tritt die Fertigrolle während der Lagerung und im Transport in einen Feuchtigkeitsaustausch mit der Umwelt, da Papier mit einem Restfeuchtegehalt von ca. 5 % bis 8 % zur Umgebungsluft relativ trocken ist. Dadurch dringt von außen über die Rollenoberfläche (Stirnseiten, Außenlage, Rollenkern) Feuchtigkeit in die inneren Lagen ein. Über die Zeit entsteht dementsprechend ein dreidimensionaler Feuchtigkeitsgradient von den jeweiligen Oberflächen zum inneren Bereich des Wickels [84, S.595]. Durch das materialspezifische Feuchtdehnungsverhalten kann es daher über die Rollenlänge zu einem veränderlichen Spannungs-Dehnungsverhalten kommen. Diesem Effekt kann beispielsweise durch eine klimatische Kapselung und Schutz vor äußeren Beschädigungen der Fertigrollen durch Verpackung der Rolle in Folie oder Papier vorgebeugt werden. Zum Ausgleich etwaiger Feuchtigkeitsdifferenzen in der Bahn wird manchmal auch eine thermische Vorkonditionierung der Bahn in der Druckmaschine vor dem ersten Druckwerk durchgeführt.

Abbildung 3.13 zeigt eine Übersicht typischer externe Einflüsse, die auf eine Rolle wirken und diese beispielsweise deformieren oder ihre Materialeigenschaften nachhaltig beeinflussen.

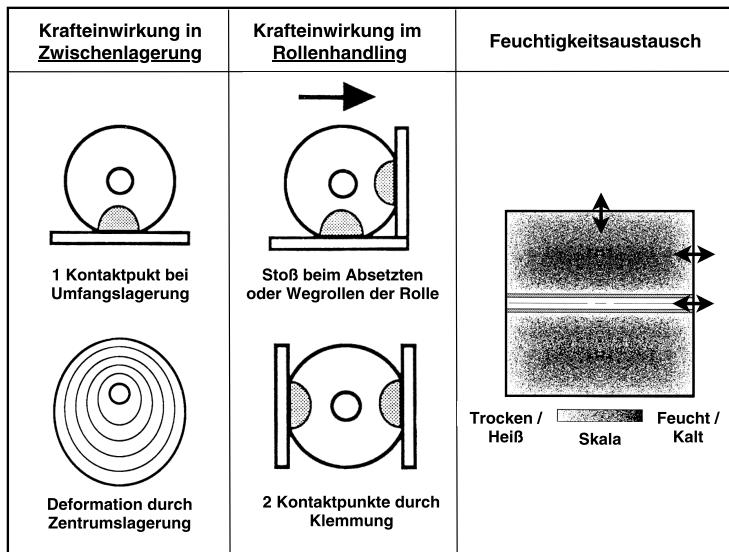


Abbildung 3.13 Typische externe Einflüsse auf eine gewickelte Rolle (Fertigrolle und/oder Mutterrolle) in der Zwischenlagerung und im Transport, die zu Deformationen führen oder die Materialeigenschaften nachhaltig beeinflussen (Auszüge aus [83])

Merke: Rollenhandlings- sowie Zwischenlagerungsprozesse hinterlassen spezifische Störungen in der Rollengeometrie (siehe auch Tabelle 4.1 (S.80)) und/oder in den Materialeigenschaften der Bahn. Etwaige Einflüsse werden ortsfest auf die Rolle bzw. Bahn übertragen.

3.1.3 Rolle-zu-Rolle Druckprozess

Im Druck gilt es meist mehrere Druckfarben, -lacke oder funktionale Beschichtungsmedien passgenau auf ein Substrat zu applizieren. Die Wahl des Druckverfahrens und der Maschinenkonfiguration hängt von zahlreichen Faktoren ab wie z.B. Produkttyp, Auflage, Funktionalität etc. Auf die Prozesstechnik der Bearbeitungsschritte Farübertragung, Trocknung, Prägung etc. sei an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da sie für die Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit keine Rolle spielen. Für Grundlagen des Tiefdrucks sowie andere drucktechnische Verfahrensschritte sei auf [43] verwiesen. Abbildung 3.14 zeigt als Übersicht alle für diese Arbeit relevanten Prozessschritte eines Rolle-zu-Rolle Druckprozesses in einem stark vereinfachtem Prozessschema am Beispiel einer prinzipiel-

len Rollentiefdruckmaschine, welche im Aufbau und in der Funktionsweise an die konkret verwendete Druckmaschine angelehnt ist.¹⁴ ¹⁵

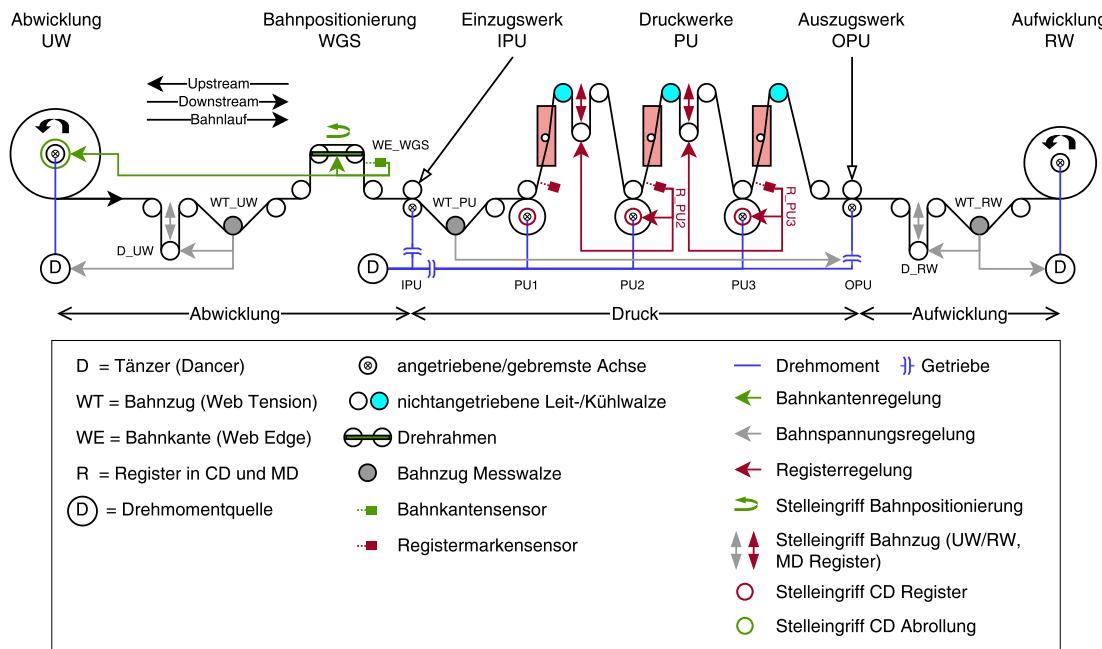


Abbildung 3.14 Prozessschema einer prinzipiellen Rollentiefdruckmaschine mit allen für diese Arbeit relevanten Komponenten und Prozessschritten in Anlehnung an die konkret verwendete Druckmaschine

3.1.3.1 Bahnspannungsregelung (MD)

In Rolle-zu-Rolle Druckprozessen wird die Bahn grundsätzlich an der Aufrollung und an den angetriebenen Klemmstellen durch die Maschine gezogen. Die notwendige Bahnspannung wird über die Bremse an der Abwicklung sowie durch Tänzersysteme nach der Abwicklung und vor der Aufwicklung realisiert und über die Zeit konstant gehalten. Zwischen den beiden Zugwerken läuft die Bahn mit annähernd¹⁶ gleicher Bahnspannung durch die sequentiell hintereinander angeordneten Druckwerke. Die Bahnspannung wird in jedem Bahnabschnitt separat geregelt. Die Bahnspannungsregelung realisiert in Kombination mit dem Maschinenantrieb den Materialtransport in MD bei möglichst definierter und

¹⁴Die in der Untersuchungen konkret betrachtete Rollentiefdruckmaschine ist in Kapitel 6.1 näher erläutert und dient in dieser Arbeit als Fallbeispiel für einen typischen Rolle-zu-Rolle Druckproduktionsprozess, bei dem eine Papierbahn sequentiell und passgenau durch verschiedene Bearbeitungseinheiten geführt wird.

¹⁵Die Abkürzung jedes Sensornamens setzt sich aus dem Kürzel des SensorTyps und einem Kürzel zum jeweiligen Druckwerk bzw. Bahnabschnitt zusammen, wo der jeweilige Sensor positioniert ist. Beispielsweise steht WT_{UW} für die Bahnspannungsmesswalze (WT = engl. Web Tension) im Bahnabschnitt Abwicklung (UW = engl. Unwinding).

¹⁶Genau genommen nimmt die Bahndehnung, nach jeder Leitwalze um einen kleinen Betrag zu.

möglichst konstanter Bahnspannung. Ein typisches und für die konkret betrachtete Maschine ebenfalls gültiges Prozessschema einer *Bahnspannungsregelung* ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Hierbei wird der Bahnzug grundsätzlich durch die Bremskraft an der Abwicklung eingestellt. Die Bahngeschwindigkeit wird durch das Einzugswerk definiert. Etwaige Schwankungen in der Bahnspannung durch Abwicklungseffekte, wie z.B. einer unrunden Rolle, werden durch ein Tänzersystem nach der Abwicklung ausgeglichen. Die Kompensationsbewegung der Tänzerwalze wird auf Grundlage der Bahnspannungsmessung, direkt nach dem Tänzersystem, aktiv gestellt. Da die Bahnspannung in jedem Bahnabschnitt separat geregelt wird, ist nachfolgend die komplette Maschine von Abwicklung bis Aufwicklung mit entsprechenden Bahnabschnitten dargestellt.

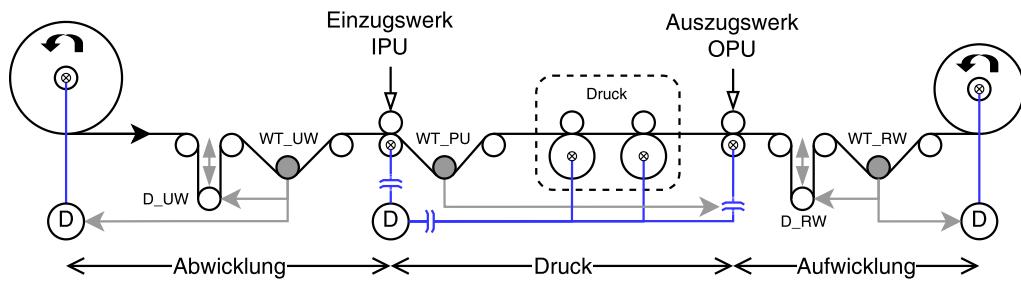


Abbildung 3.15 Prozessschema Bahnspannungsregelung

3.1.3.2 Bahnlaufregelung (CD)

Die Aufgabe der *Bahnlaufregelung*, auch *seitliches Bahnpositionierungssystem* (WGS = engl. Web Guiding System) genannt, ist es einen möglichst gradlinigen Bahnlauf in CD-Richtung zu realisieren. Die Regelung wird zwischen Abwicklung und dem Einlauf in den Bahnabschnitt „Druck“ durchgeführt. Die seitliche Bahnposition wird dabei mit Hilfe einer einseitigen oder beidseitigen Bahnkantenmessung direkt hinter dem Drehrahmen ermittelt. Bei einer Abweichung zur Soll-Bahnposition wird die Bahn über eine gezielte Winkelung des Drehrahmens zurück in die richtige Position gelenkt. Zwischen den Druckwerken erfährt die Bahn keine weitere geregelte seitliche Ausrichtung. Ein typisches und in der konkret betrachteten Maschine ebenfalls zum Einsatz kommendes Bahnlaufregelungsprinzip basiert auf einem Dreh- oder Schwenkrahmen, auch Pivot-Prinzip genannt. Es besteht aus einem schwenkbaren Oberrahmen auf einem Untergestell mit feststehenden Ein- und Auslaufrollen. Die Bahn wird am Einlauf der Bahn um seinen Drehpunkt ausgelenkt und an die Auslaufrolle übergeben. Der seitliche Lagefehler der Bahn wird kurz hinter der zweiten Rolle am Drehrahmen gemessen. Der Freie Zug L_Z dient als Korrekturlänge. Der maximale Drehwinkel des Drehgestells limitiert die maximale seitliche Korrektur. Gelangt

die Bahn an diese Grenze¹⁷, wird zur Nachsteuerung die komplette Abrollvorrichtung ggf. axial verfahren. Abbildung 3.16 zeigt das Schema der seitlichen Bahnpositionierung.

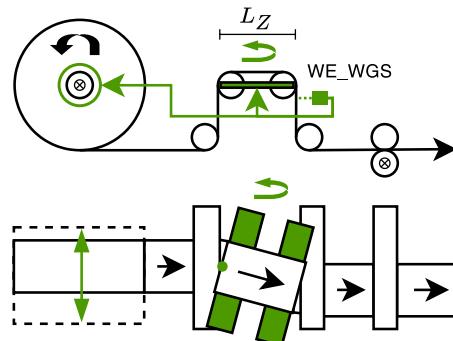


Abbildung 3.16 Prozessschema Seitliche Bahnpositionierung

Der Regelerfolg ist u. a. von der Ist-Position des Stellantriebes, dem Betrag der Abweichung sowie der zeitlichen Dynamik¹⁸ der Abweichungen abhängig. Außerdem weist ein solches System stets eine Zeitverzögerung (Phasenverschiebung) auf. Neben maximaler Auslenkung und der Korrekturlänge sind auch die Reibkoeffizienten von Papier und den beteiligten Walzen von Bedeutung, da die Stellbewegung des Drehrahmens über Friktion auf den Bahnlauf übertragen wird. Um die Regelung stabil zu halten wird z.B. mit Schwellwerten (Totband) gearbeitet, die erst überschritten werden müssen, bevor nachgeregt wird. Außerdem werden hochfrequente Abweichungen typischerweise Tiefpassgefiltert und so ignoriert. Grundsätzlich können die prinzipiellen Übertragungseigenschaften einer Bahnlaufregelung wie folgt eingeschätzt werden:

- Ein Mindestmaß an Abweichung muss überschritten werden, bevor es zu einer Reaktion kommt
- Langsame Abweichungen (Frequenz) sind einfacher auszuregeln als schnelle
- Kleine Abweichungen (Amplitude) sind einfacher auszuregeln als große

3.1.3.3 Registerregelung (CD und MD)

Ein Hauptqualitätsparameter für jedes mehrfarbige Druckprodukt ist die genaue Passlage der Farben zueinander. Sie wird auch als *Register-* oder *Passer* bezeichnet. Eine *Passerabweichung* kann als planar zweidimensionale relative Abweichung der einzelnen Druckfarben zueinander bzgl. CD als ΔR^{CD} und bzgl. MD als ΔR^{MD} definiert werden und beschreibt damit die Lage der Druckzyliner zueinander, wobei der Bedruckstoff ein sich

¹⁷siehe Amplitudenbegrenzung in Abbildung 3.27 (S.49)

¹⁸Geschwindigkeit, Beschleunigung, Frequenz

in CD und MD bewegliches Koordinatensystem darstellt. Passerfehler führen zu Unschärfe im Druckbild und können auch zu Farbverfälschungen führen und sind daher ein besonders kritischer Qualitätsparameter in jedem Druckprozess. Die Aufgabe einer Registerregelung ist es, eine möglichst gute Passlage sicherzustellen.

Zunächst muss dafür die Lage des jeweiligen Druckbildes (pro Druckwerk) im Prozess laufend ermittelt werden. Die Position, des auf die Bahn übertragenen Druckbildes, wird jeweils direkt nach der Übertragung optisch mit Registermarkensensoren erfasst. Das Prinzip der optischen Positionsbestimmung der Registermarken ist in Abbildung 3.17 dargestellt und basiert messtechnisch auf einer Kontrastmessung (rote Linie). Die Längsregisterabweichung ΔR^{MD} wird durch den Zeitversatz der ansteigenden Signalfanken zwischen Soll- und Ist-Signal ermittelt. Die Seitenregisterabweichung ΔR^{CD} durch die Pulsweiten-differenz.

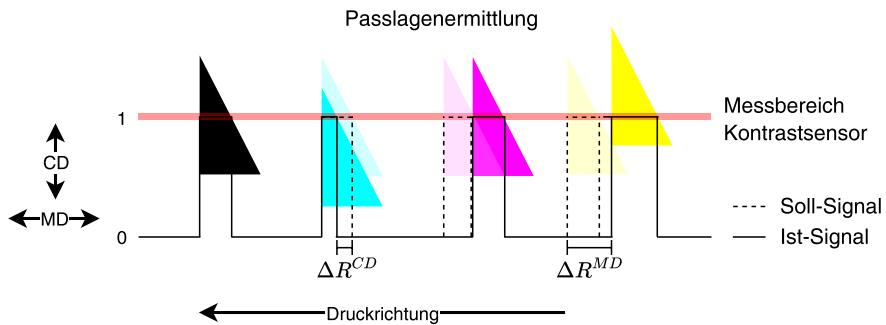


Abbildung 3.17 Messprinzip der Passlage nebeneinander gedruckter Registermarken im Rollentiefdruck

Die ermittelte Position einer gedruckten Registermarke wird immer auf die Position einer Bezugsfarbe referenziert. Je nach Regelmodus ergibt sich das Soll-Signal durch die *Standfarbe* oder die *Vorgängerfarbe* auf die pro Druckwerk referenziert wird. Abbildung 3.18 zeigt beide Varianten. Da die Marken der einzelnen Farben jeweils feste Abstände zueinander besitzen, welche über die Druckvorlage definiert sind, ergibt sich die jeweilige Soll-Position aus dem Abstand in MD-Richtung zu der jeweiligen Referenzmarke ΔR^{Ref} .

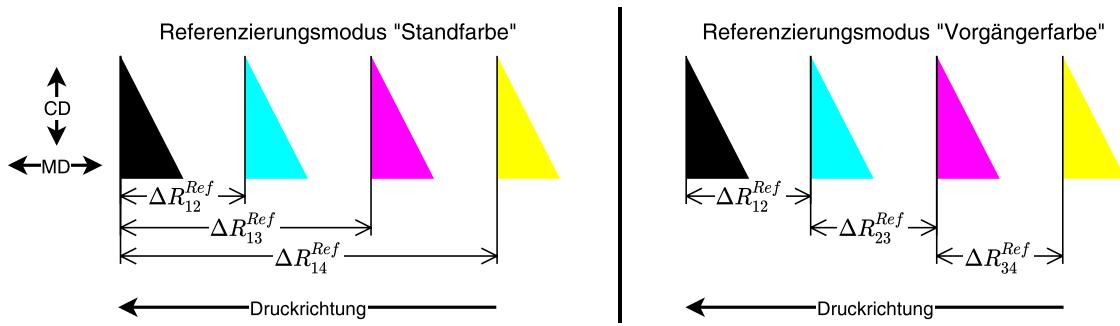


Abbildung 3.18 Referenzierungsmodi in der Registerregelung [91]

In transienten (nicht stationären) Phasen einer Druckproduktion, bei einem fliegenden Rollenwechsel, wird häufig im Referenzierungsmodus „Vorgängerfarbe“ geregelt, da die Regelstrecke so signifikant kürzer ist (Fokus auf Schnelligkeit). In stationären Phasen wird eher im Modus „Standfarbe“ geregelt, um einen optisch möglichst guten Übereinanderdruck für alle Farben zu gewährleisten (Fokus auf Qualität).¹⁹

In Abhängigkeit des Antriebskonzeptes kommen unterschiedliche Registerregelungskonzepte zum Einsatz. Bei mechanisch synchronisierten Druckzylindern²⁰ wird das Längsregister (MD-Register) durch eine Anpassung des Bahnwegs zwischen zwei Druckwerken über die sogenannte *Registerwalze* angepasst. Das Seitenregister über eine axiale (CD-Richtung) Verstellung der Druckzylinder. Abbildung 3.19 zeigt das Prozessschema der Registerreglung. [91]

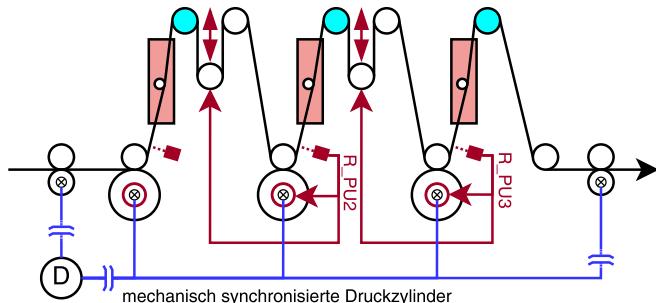


Abbildung 3.19 Prozessschema Registerregelung

¹⁹ Je nach Druckauftrag, Druckfarbenbelegung und Design, können auch mehrere Druckwerke als Standfarben für nachfolgende Druckwerke definiert sein.

²⁰ Auch die konkrete Rollentiefdruckmaschine besitzt ein solches Antriebskonzept.

3.1.3.4 Bahnlauft Messgrößen

In seitlicher Richtung kann die Bahn bzgl. ihrer CD-Lageposition y und der Bahnbreite W durch eine einseitige²¹ oder kombinierte Bahnkantenmessung an Antriebs- (DS = engl. Drive Side) und Bedienseite (OS = Operator Side) ermittelt werden. Die Bahnzugkraft F liefert bei konstanter Bahngeschwindigkeit Indizien über Abweichungen des Bahntransports in MD-Richtung. Abbildung 3.20 zeigt ein Schema, wie die jeweiligen Bahnlauft Messgrößen ermittelt werden.

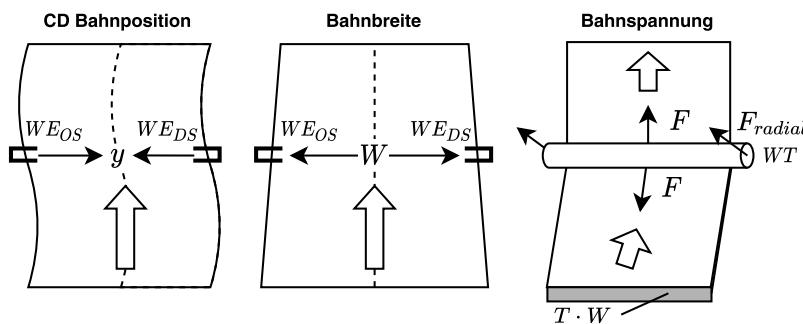


Abbildung 3.20 Bahnlauft Messgrößen

Die Abweichung der CD-Bahnposition δy wird als Mittelwert der beiden einzelnen Bahnkantenabweichungen δOS bzw. δDS in [mm] definiert. Bahnkanten können sowohl mit optischen Sensoren²², Druckluft oder Ultraschallsensoren abgetastet werden. Die Bahnkantensensoren werden mit WE_{OS} und WE_{DS} bezeichnet (engl. Web Edge).

$$\delta y = \frac{1}{2} (\delta OS + \delta DS) [\text{mm}] \quad (3.5)$$

Die Abweichung der Bahnbreite δW ist als Differenz der Sollbreite W_{Soll} zur Istbreite W_{Ist} definiert, die sich wiederum aus der Differenz der beiden Bahnkantenabweichungen ergibt.²³

$$\begin{aligned} \sigma W &= W_{Soll} - W_{Ist} [\text{mm}] \\ W_{Ist} &= W_{Soll} - (\delta OS - \delta DS) [\text{mm}] \end{aligned} \quad (3.6)$$

An den Bahnspannungsmessstellen WT (engl. Web Tension) wird die anliegende Bahnzugkraft F in [N] in MD-Richtung über die gesamte Bahnbreite W gemessen. Messtechnisch wird sie über die anliegende Radialkraft an einer Messwalze ermittelt. Die Kraft wird

²¹In der konkreten Druckmaschine wird y nur an der OS gemessen

²²In der konkreten Druckmaschine kommen als Bahnkantensensoren CCD-Zeilenkameras mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zum Einsatz (siehe Tabelle 6.2 (S.120))

²³Die Bahnbreite wird in dieser Arbeit nicht betrachtet und ist an dieser Stelle nur zur Vollständigkeit angegeben.

beispielsweise über Messdehnungsstreifen an der Lagerhalterung erfasst. Teilt man den Bahnzug durch die Bahnquerschnittsfläche $T \cdot W$ ergibt sich die tatsächliche Bahnspannung σ_{Web} in $[N/m^2]$.²⁴

$$\delta_{Web} = \frac{F}{T \cdot W} [N/m^2] \quad (3.7)$$

Die Bahnspannung ist grundsätzlich mit der *Bahndehnung* und daher auch mit dem Vorschub der Bahn verknüpft (siehe Gleichung 3.2). Beispielsweise wird bei einer konstanten Bahngeschwindigkeit und einer kurzzeitigen Erhöhung der Bahndehnung weniger Material in MD-Richtung transportiert, was zu einer temporären negativen Relativbewegung der Bahn in MD-Richtung führt.

3.1.3.5 Bahntransport

Bahnführungselemente Bahnführungselemente sind die grundlegenden Maschinenelemente, die den Bahntransport in MD-Richtung und die seitliche Führung der Bahn realisieren. Im Wesentlichen sind das Leitwalzen und geklemmte Walzenpaare.

Leitwalzen sind nicht angetriebene Walzen ohne Klemmstelle, die über Friktion die Bahn führen. Dadurch, dass sie nicht angetrieben sind und eine eigene Reibung im Lager besitzen, hemmen sie den Bahnlauf. Negativen Einfluss auf die Führungseigenschaft einer Leitwalze können z.B. eingeschleppte Luft im Walzenspalt und eine zu geringe Haftung der Papierbahn zur Walze haben. Richtungs- oder Spannungsänderungen können sich dann schlechter übertragen.

Zugwerke sind geklemmte Walzenpaare, bei denen eine Walze angetrieben ist und das Drehmoment reibschlüssig auf die Bahn sowie auf die nicht angetriebene Walze übertragen wird. Eine relevante Besonderheit bei geklemmten Walzenpaaren ist das Förderverhalten, dass sich je nach Anpressdruck, Walzenbezug und Kompressibilität der Materialbahn verändern kann. Bei Variation von Material, Walzenbezug oder Nipkraft in CD und/oder MD kann es zu Variationen in der Materialförderung kommen, was dann ggf. zu Bahnzugveränderungen und auch zu seitlichen Bahnbewegung führen kann. Nur solange alle Parameter über CD identisch bleiben, ist ein gradliniger Bahntransport gewährleistet. Ungleichmäßige Abnutzung von Walzenbezügen sind beispielsweise eine potentielle Ursache für Probleme im Förderverhalten. [84, S.395-399] [20]

²⁴In dieser Arbeit wird der Begriff „Bahnspannung“ bzw. „Web Tension (WT)“ synonym für den Bahnzug genutzt, obwohl die Messdaten der Bahnzugmesswalzen nicht auf die Bahnquerschnittsfläche bezogen werden, weil diese Informationen nicht immer verfügbar sind und ansonsten nicht für die Analysen verwertet werden könnten.

Bahnführungsabschnitte bezeichnen die Bahnabschnitte zwischen geklemmttem Walzenpaaren. In jedem Bahnführungsabschnitt wird die Bahnspannung separat aus Zusammenspiel von Zugwerken und gebremster Abwicklung und Tänzer gezielt eingestellt.

Ein *Freier Zug* (engl. Span) L_Z ist die Strecke einer Bahn, die nicht durch Walzen geführt ist. In diesem Abschnitt wirken sämtliche Kräfte auf die Bahn, die ihr durch vor- und nachgelagerte Bahnführungselemente aber auch durch die Umgebungsluft (z.B. Trocknergebläse) aufgeprägt wird.

Stationärer und instationärer Bahntransport Die in dieser Arbeit im Fokus stehenden Bahnlaufschwankungen können als *temporäre, instationäre Störungen im Bahntransport* begriffen werden, bei einem ansonsten grundsätzlich stationären Maschinenbetrieb. Bahntransportstörungen können in CD- und MD-Richtung auftreten und wandern etwa mit Bahngeschwindigkeit durch die Maschine, bis nach einer gewissen Zeit wieder ein stationärer Zustand eintritt, wenn die Störung vorüber ist.

3.1.3.6 Lateraler Bahnlauf

Mechanismen Nicht immer ist der Bahntransport ideal. Einige Mechanismen, die zur seitlichen Ablenkung einer Bahn in einem Walzensystem führen können, sind in Abbildung 3.21 zusammengefasst dargestellt. Aus dem Schema wird deutlich, dass die Seitenbewegungen zwar offensichtlich erst an dem zweiten Bahnführungselement wirksam werden, die eigentliche Ursache aber durchaus in der Bahn selbst liegen kann. Beispiele für materialspezifische Ursachen einer Seitenbewegung sind z.B. ein CD-Dickenprofil in der Bahn (ganz rechts) oder ein CD-Bahnspannungsprofil (zweites von rechts). Obwohl in dem Überblick nicht explizit angegeben, führt eine gekrümmte geschnittene Bahn zu einer einseitig durchhängenden Bahn, die sich tendenziell zur etwas weniger gespannten bzw. längeren Bahnkantenseite bewegt [105]. Nicht ideale Bahnführungselemente wie eine Nichtparallelität der Walzen (ganz links), unterschiedliche Durchmesser über die Walzenbreite (zweites von rechts) oder eine ungleichmäßige Nipkraft im Walzenspalt (mittig), können ebenfalls Seitenbewegungen induzieren, auch wenn das Material an sich vollständig homogen ist.

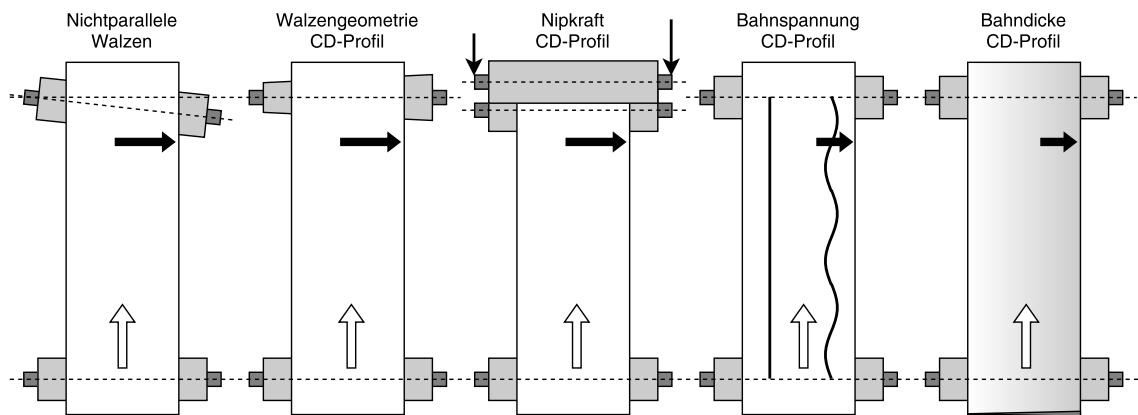


Abbildung 3.21 Zusammenfassung typischer laterale Bahnbewegungsmechanismen nach [84, S.399]

In der Realität ist der Bahnlauf (CD und MD) ein äußerst komplexes dynamisches System, das von vielen verschiedenen Einflussfaktoren abhängt. In Bahnlaufmodellen wird stets nur eine Auswahl der unterschiedlichsten Aspekte berücksichtigt:

- Bahnspannung
- Bahngeschwindigkeit
- Bahngeometrie (Dicke, Breite, Krümmung)
- Form der Bahnbiegung zwischen zwei Walzen (Biegung, Scherung etc.)
- Materialeigenschaften der Bahn bzgl. CD, MD und ZD
- Bewegungsrichtung der Bahn (CD, MD und ZD)
- Geometrie der Bahnführungselemente (Nichtparallelität, Umschlingungswinkel etc.)
- Kontaktzone zwischen Bahn und Bahnführungselementen (Oberflächenbeschaffenheit, Friktion, etc.)
- Förderverhalten bei geklemmten Walzenpaaren
- Kombinationen mehrerer Bahnführungselemente hintereinander
- Einschleppung von Luft im Spalt zwischen Bahn und Walze
- äußere Krafteinwirkung im Freien Zug (z.B. Luftstrom aus einem Trockner)
- Dynamisches Verhalten bis ein stationärer Zustand erreicht ist

Normal Entry Law (NEL) Ein fundamentales und für diese Arbeit ebenfalls sehr wichtiges Bahnlaufgesetz ist das sogenannte *Normal Entry Law (NEL)*, das erstmals 1968 von SHELTON [95, S.75] wie folgt formuliert wurde:

„The fundamental law of static steering under the simplifying assumptions (...) is that the web in the entering span approaching any given roller aligns

itself perpendicularly to the roller. The web therefore would make sharp angular breaks as it leaves each roller in a series of non-parallel rollers.“ [95, S.75]

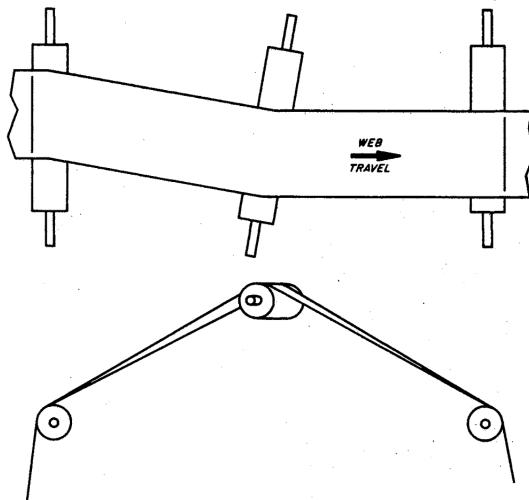


Abbildung 3.22 Stationärer Bahnlauf über ein nicht paralleles Walzensystem [95, S.75]

ROISUM drückt es wie folgt aus: [84, S.387]

„A running Web will have a stable position as it contacts a downstream roller with good traction if its entry angle is perpendicular to the axis of the roller.“ [84, S.387]

Abbildung 3.23 zeigt wie dieses Prinzip auf die Situation einer Winkelabweichung in der einlaufenden Bahn auf eine Walze (siehe Abbildung 3.23 links) oder auf die Situation einer Winkelabweichung der Walze zur gerade einlaufenden Bahn (siehe Abbildung 3.23 rechts), übertragen werden kann. In beiden Fällen kommt es zu einer dynamischen Seitenbewegung der Bahn. Nach Ablauf dieser dynamischen Phase läuft die Bahn schließlich im stationären Zustand wieder senkrecht über die Walze.

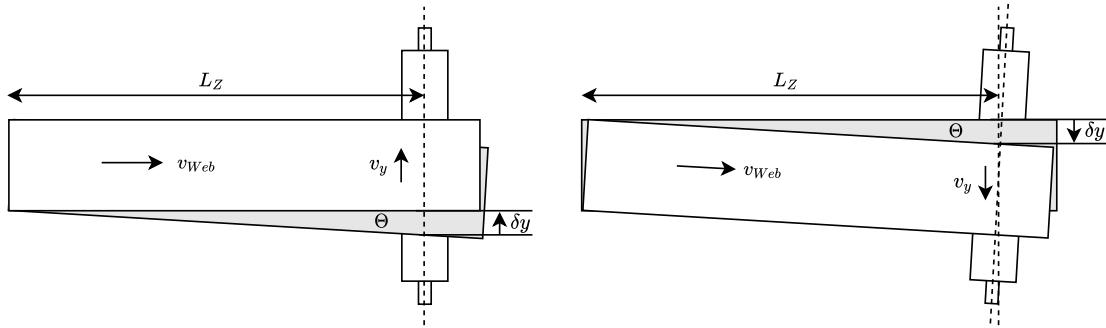


Abbildung 3.23 Dynamische laterale Seitenbewegung aufgrund des NEL [84, S.385] für zwei Fälle: Winkelabweichung der Bahn zu einer feststehenden Walze (links); Winkelabweichung einer Leitwalze zur gerade einlaufenden Bahn (rechts); die graue Bahn zeigt den initialen Bahnhlauf; die weiße Bahn den stationären Bahnhlauf

Die Stärke der Seitenverschiebung δy einer Bahn an einem nicht zur Bahn senkrecht stehenden Walzenelement ist bei einem langen freien Zug näherungsweise proportional zum Winkel Θ und der Länge L_Z des freien Zugs. Durch Ablenkung der Bahn in besonders langen freien Zügen, wie z.B. in Trocknern, kann es dementsprechend zu besonders großen Seitenfehlern im Bahnhlauf kommen [84, S.383-385].

$$\delta y \approx L_Z \cdot \Theta \quad (3.8)$$

Die Ablenkungsgeschwindigkeit v_y ist näherungsweise proportional zum Ablenkungswinkel Θ und der Bahngeschwindigkeit v_{Web} , wodurch die Ablenkungsgeschwindigkeit im zeitlichen Verlauf bis zur Annäherung an die finale Seitenverschiebung immer weiter abnimmt. [84, S.385]

$$v_y \approx v_{Web} \cdot \Theta \quad (3.9)$$

Durch die Zeitabhängigkeit der dynamischen Phase folgt grundsätzlich, dass sich langsam periodisch wechselnde Ablenkungen, egal wodurch induziert, eher ihrer stationären Position annähern können, als schnell wechselnde Ablenkungen. Es braucht eine gewisse Dauer bzw. Bahngewicht, bis sich wieder der stationäre Zustand eingestellt bzw. die Bahn sich in ihrer finalen Position eingefunden hat.

Unter Ausnutzung des NEL kann zum einen ein initialer lateraler Bahnhauflauf aktiv korrigiert werden, indem Walzen der Bahnhaufrégelung gezielt angewinkelt werden, wodurch die Bahn in eine Soll-Position zurückgeführt wird. Zum anderen führt das NEL zu einer Art Selbststabilisierung von initialen seitlichen Bahnhauftörungen nach jedem Walzenelement, was man auch als *dämpfende lineare Verzerrung* bezeichnen könnte.

Übertragungsverhalten lateraler Bahnlaufstörungen Das grundsätzliche Übertragungsverhalten einlaufender lateraler Bahnlaufstörungen in einem System aus parallelen Walzen kann wie folgt eingestuft werden. Abbildung 3.24 zeigt dazu das Bode-Diagramm (rechts) und den Versuchsaufbau (links) von SHELTON [95, 79-80]. Die initiale Bahnauslenkung Y_0 (δy_0) an der ersten Walze wird dafür mit der übertragenen lateralen Auslenkung Y_L (δy) an der zweiten parallelen Walze mit dem Abstand L (L_Z) verglichen, woraus sich das Übertragungsverhalten von einlaufenden seitlichen Bahnlaufstörungen bzgl. Phase und Frequenz bewerten lässt. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass sinusförmige Abweichungen in der Amplitude umso stärker gedämpft werden, desto höher die Eingangsfrequenz ist. Abbildung 3.24 zeigt das originale Bode-Diagramm (rechts) und den Versuchsaufbau (links). Experimentelle Oszillationsversuche bestätigten diesen grundlegenden Zusammenhang.

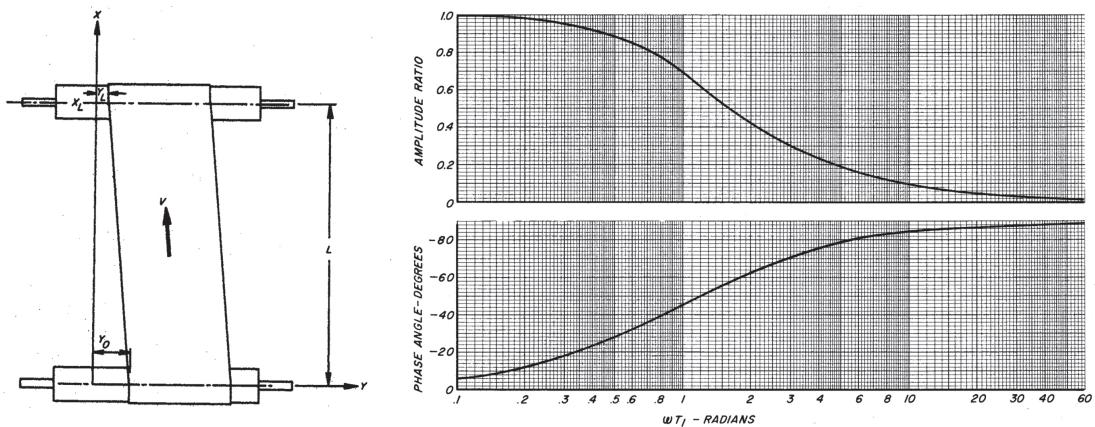


Abbildung 3.24 Bode-Diagramm der prinzipiell frequenzabhängigen linearen Verzerrung bzgl. Amplitude und Phase im Bahnlauf an zwei parallelen Walzen [95, 79-80]

Als typisches Beispiel für derartige von außen auf den Bahnlauf eingebrachte Störungen führt ROISUM [84, S.391] rotationsperiodische Schwingungen an, die z.B. durch nicht ideal rotierende Leitwalzen den Geradeauslauf der Bahn negativ beeinflussen können aber in nachfolgenden Bahnabschnitten immer weiter abgeschwächt werden.

Bei einlaufenden Bahnlaufstörungen an Walzen kommt es neben einer Amplitudenverzerrung auch zu Phasenverzerrungen. Der Aspekt der Phasenverzerrung wird in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt.²⁵

Es wird angenommen, dass derartige extern induzierte laterale Bahnlaufstörungen (Lagefehler auf Rollenwickel, WGS, oder nichtparallele Walzen etc.) sich von der Übertragung

²⁵Die übertragenen Informationen werden zwar frequenzabhängig auf der Zeitachse leicht verschoben, bleiben vom Informationsinhalt aber im Grunde identisch.

auch über mehrere Walzen genauso verhalten und es zu einer sukzessiven Abschwächung der seitlichen Ablenkungsamplitude kommt (dämpfende lineare Verzerrung).

3.2 Analoge Informationsübertragung

Zur Adressierung der Fragestellung in dieser Arbeit werden Konzepte, Prinzipien und Begrifflichkeiten aus dem Bereich der analogen Informationsübertragung genutzt, da vermutet wird, dass dieses Konzept auch bei der Übertragung von Prozessstörungen auf die Materialbahn und einer darauf folgenden materialgebundenen analogen Informationsübertragung entlang der gesamten Wertschöpfungskette stattfindet bzw. angewendet werden kann. Zur semantischen Interpretation der Maschinendaten wird eine spektralanalytische Visualisierungstechnik genutzt, die es ermöglicht Zeit- und Frequenzinformationen unabhängig voneinander darzustellen und zu beurteilen (siehe 6.2). Zur Differenzierung grundsätzlich verschiedener Informationsquellen, welche voneinander unabhängige Informationen auf die Materialbahn übertragen, wird später eine an das Demultiplexing-Verfahren angelehnte Filtermethode entwickelt (siehe 6.3.2). In Kapitel 5 werden die verschiedenen Begrifflichkeiten im Detail auf die konkrete Fragestellung dieser Arbeit übertragen und damit in die Domäne überführt. In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine allgemeine Einführung der Begriffe im konventionellen Kontext.

3.2.1 Nachrichten- und signaltheoretische Begriffe

Informationen In der Nachrichtentechnik geht es darum Informationen zu übertragen (in eine Richtung) bzw. auszutauschen (wechselseitig). Der Inhalt der zu übertragenden Information muss allgemein bekannt sein, damit sie beim Empfänger interpretiert werden kann. In einer sprachlichen Kommunikation müssen zwei Gesprächspartner beispielsweise eine beidseitig bekannte Sprache sprechen, um sich gegenseitig zu verstehen. Beim Schriftverkehr muss der genutzte Zeichensatz definiert und deren Bedeutung bekannt sein. Gleichermaßen gilt für Kommunikation über Symbole, beispielsweise bei Verkehrsschildern im Straßenverkehr. Abbildung 3.25 zeigt die Beziehung zwischen Signal, Information und Nachricht.

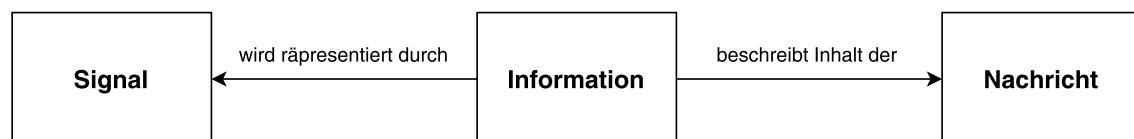


Abbildung 3.25 Beziehung zwischen Nachricht, Signal und Information, in Anlehnung an [18, S.13]

In der mathematischen Informationstheorie nach SHANNON gibt der Informationsgehalt einer Nachricht den Überraschungswert einer Nachricht an. Er hängt von der statistischen Signifikanz seiner Zeichen ab. Je unwahrscheinlicher die Struktur der Nachricht, desto höher ist der Informationsgehalt der Nachricht [77] [73, S.1129]. *Eine mathematische Bewertung des Informationsgehaltes der analog übertragenen Informationen ist ausdrücklich nicht Bestandteil dieser Arbeit.*

Signal Ein Signal ist eine Funktion, die Informationen repräsentiert oder überträgt und in der Regel von einer oder mehreren unabhängigen Variablen abhängt, wie Zeit, Raum oder Frequenz. Signale sind im technischen Kontext physikalische Größen, die mit Hilfe von Sensoren über die Zeit erfasst werden und zur weiteren Verarbeitung kontinuierlich in eine elektrische Größe übersetzt werden. Analoge Signale bzw. Zeitreihen sind zunächst Zeit- und Wert-kontinuierlich und werden erst in der Analog/Digital Wandlung zu Zeit- und Wert-diskreten Signalen quantisiert. Zur Erläuterung nachfolgender signaltheoretischer Begriffe sei das kontinuierliche Elementarsignal $x(t)$ mit \hat{x} als Amplitude, f als Frequenz, $\omega = 2\pi f$ als Winkelfrequenz und der Periodendauer $P = 1/f$ folgendermaßen definiert.

$$x(t) = \hat{x} \sin(\omega t) \quad (3.10)$$

Informationsträger und Übertragungssysteme Übertragungssysteme können auf verschiedene Weise realisiert werden. Es gibt sogenannte geführte Übertragungen, bei denen der Übertragungskanal typischerweise aus einer elektrischen oder optischen Leitung besteht. Ungeführte Übertragungssysteme basieren dagegen häufig auf elektromagnetische Wellen. Werden die Informationen auf einem materiellen Informationsträger zwischen räumlich entfernten Stellen transportiert, spricht man von einem *materiellen Übertragungssystem*. Typische Beispiele sind DVDs, USB-Stick oder aus dem Bereich der Analogtechnik beispielsweise Speicherbänder.

[18, S.17]

Komponenten eines Kommunikationssystems Ein Kommunikationssystem besteht im Kern aus einer *Quelle*, einem *Sender*, dem *Übertragungskanal* innerhalb eines materiellen oder immateriellen Informationsträgers und einem *Empfänger* mit nachgelagerter *Senke*. Ganz am Ende ist stets eine *Interpretation* der übertragenen Informationen notwendig, um eine entsprechende Rückmeldung zu geben. Abbildung 3.26 zeigt alle wesentlichen Komponenten eines vollständigen Kommunikationssystems als Schema.

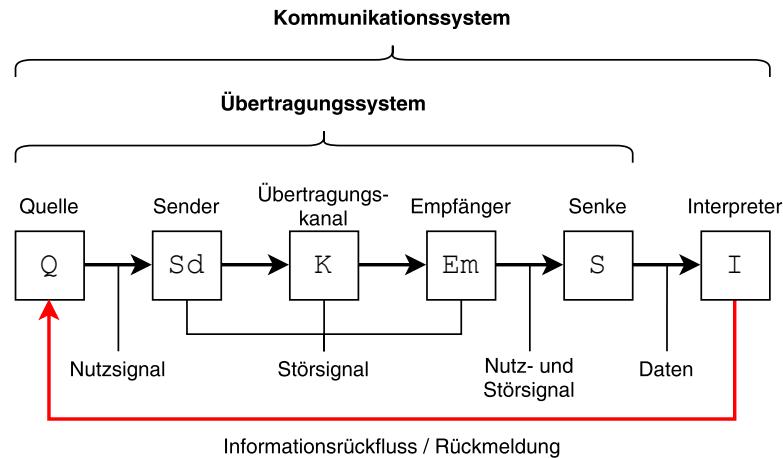


Abbildung 3.26 Das Übertragungssystem als Teil eines wechselseitigen Kommunikationssystems mit Informationsrückfluss an die Quelle, in Anlehnung an [18]

Ein unidirektionales Kommunikationssystem überträgt Informationen nur in eine Richtung. Sobald es einen Informationsrückfluss gibt, spricht man von einem Wechselbetrieb oder einem bidirektionalen Kommunikationssystem, bei dem wie der Name schon sagt, wechselseitig Informationen ausgetauscht werden können.²⁶

Jeder Sender und Empfänger kann nur auf dem ihm zugänglichen Übertragungskanal senden/schreiben bzw. empfangen/lesen. Jeder Kanal besitzt eigene Übertragungseigenschaften. Ein Beispiel für zwei voneinander unabhängige Übertragungskanäle auf ein und demselben materiellen Informationsträger sind die beiden Tonspuren (links und rechts) auf einer Stereo Schallplatte.

Bevor die übertragenen Signale interpretiert werden können, müssen sie auf der Empfängerseite aufbereitet werden. Auch wenn die Übertragung über einen analogen Übertragungskanal stattgefunden hat, kommt es typischerweise zunächst zur Wandlung der analogen zu digitalen Messwertverläufe in Form einer Quantisierung bzgl. Zeit und Wert. Anschließend werden die digitalen Signale für die gewählte Interpretationsmethodik vorverarbeitet.

Die Senke wandelt das aufbereitete Signal für die Interpretation in einer spezifischen Form auf. Ein Beispiel für eine Senke ist der Bildschirm eines Fernsehgerätes bei einer TV-Übertragung oder der Lautsprecher bei einer Radio-Übertragung.

[18]

²⁶Ein solcher Informationsrückfluss ist genau das, was im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit angestrebt wird.

Pegel In der Nachrichtentechnik ist häufig nicht der absolute Wert einer Größe von Interesse, sondern das Verhältnis von zwei gleichartigen Größen, wie beispielsweise die Signalleistung P an zwei beliebigen Stellen im Übertragungssystem P_1 und P_2 . Um einen weiten Wertebereich abzudecken nutzt man den dekadischen Logarithmus (wird mit Bel gekennzeichnet). In der Praxis wird meist das Zehntel-Bel genutzt, das Dezibel dB. Das logarithmierte Verhältnis von Leistungs- und Feldgrößen heißt Pegel L .

$$L_{rel} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \text{dB} \quad (3.11)$$

Bezieht man sich auf definierte Stellen in einem komplexeren Übertragungssystem, wie beispielsweise vor und nach einer Baugruppe, werden die Indizes mit 1 und 2, also in Wirkungsrichtung durchnummeriert. Bei diesem relativen Vergleich der Signalleistungen spricht man im Ergebnis von einem *relativen Pegel*. Bezieht man sich auf einen festgelegten Referenzwert P_{ref} , spricht man anstelle dessen von einem *absoluten Pegel*. [18, S.18-27]

$$L_{abs} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_{ref}} \text{dB} \quad (3.12)$$

Ein Pegelabstand beschreibt den Unterschied zweier Pegel an einem Ort. Und ein *Pegelmaß* den Unterschied zweier Pegel an zwei unterschiedlichen Orten im Übertragungssystem. [18, S.24-25] ²⁷

Nutz- und Störsignale Als Nutzsignal werden Signale bezeichnet, die die eigentliche Information beinhalten. Störsignale sind Signale, die beim Sender, bei der Übertragung oder beim Empfänger auftreten können und auf unerwünschte Weise die Nutzsignale beeinflussen. Rauschen ist ein wesentliches Störsignal, das vielfältige Ursachen haben kann, wie z.B. sogenanntes inneres Rauschen der verwendeten Sensoren und der zum Einsatz kommenden elektronischen Bauteile. Das am Ausgang des Übertragungssystems austretende Signal besteht dadurch in der Regel aus Nutz- und Störsignalanteilen. Die Qualität des Übertragungssystems hängt u.a. vom Signal-Rausch-Abstand SNR (Signal-Noise-Ratio) ab. Es gibt das Verhältnis aus Signalleistung P_s zur Rauschleistung P_n in Dezibel an. Störsignale sollten möglichst klein im Verhältnis zum Nutzsignal sein. [18] ²⁸

$$SNR = 10 \cdot \log \frac{P_s}{P_n} \text{dB} \quad (3.13)$$

²⁷Alle Varianten werden in dieser Arbeit genutzt.

²⁸Das Nutzsignal sollte in den meisten Kommunikationsanwendungen um Faktor 100 größer sein als das Rauschsignal. [18]

Verzerrung Verzerrungen sind Abweichungen zwischen Eingangs- zu Ausgangssignalen. Sie werden allgemein durch nicht ideale Eigenschaften in der Übertragung verursacht.

Phasenverzerrungen treten immer dann auf, wenn Signale unterschiedliche Laufzeiten durch ein Übertragungssystem besitzen.

Lineare Verzerrungen treten in der Regel in jedem realen Übertragungssystem bezüglich Amplitude und Phasenwinkel auf. Je nach Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsamplitude spricht man von Verstärkung oder Dämpfung der Signale. Eine Verstärkung liegt vor, wenn die Größe (z.B. Leistung oder Spannung) am Ausgang größer ist als am Eingang. Eine Dämpfung, wenn die Größe am Ausgang kleiner ist als am Eingang. Für nicht logarithmierte Signale liegt der Schwellwert bei 1 und bei logarithmierten Signalen bei 0.

$$\text{Verstärkung} = P_2 > P_1 \rightarrow \frac{P_2}{P_1} > 1 \rightarrow \log \frac{P_2}{P_1} > 0 \rightarrow 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \text{dB} > 0 \quad (3.14)$$

$$\text{Dämpfung} = P_2 < P_1 \rightarrow \frac{P_2}{P_1} < 1 \rightarrow \log \frac{P_2}{P_1} < 0 \rightarrow 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \text{dB} < 0 \quad (3.15)$$

Nichtlineare Verzerrungen treten auf, wenn das Übertragungssystem nichtlineare Übertragungseigenschaften besitzt. Neben der linearen Verzerrung des Eingangssignals und der Phasenverschiebung entstehen zusätzliche Signalanteile, die sich aus Oberschwingungen und/oder den Mischprodukten des Eingangssignals ergeben (siehe 3.2.3.3). In der Nachrichtenübertragung sorgen nichtlineare Übertragungselemente bzw. Baugruppen für derartige Verzerrungen und sind allgemein unerwünscht, weshalb sie aufwändig wieder aus den Signalen herausgefiltert werden. Im Bezug auf reale technische Systeme, sind nichtlineare Verzerrungen typischerweise durch folgende stetige oder nicht stetige Übertragungsformen möglich. Sie werden in Abbildung 3.27 im Vergleich zu einer linearen Kennlinie gezeigt.

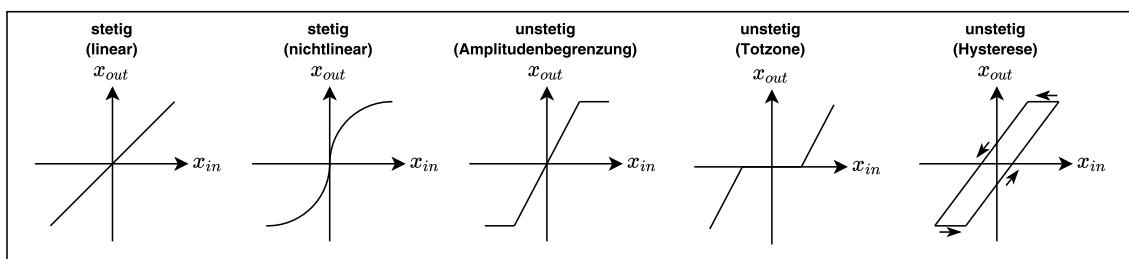


Abbildung 3.27 Typische Kennlinien für technische Übertragungssysteme

Abtastung Der Werteverlauf einer physikalischen, analogen Größe in einem Übertragungskanal wird über einen geeigneten Sensor erfasst und anschließend in ein zeit- und wertdiskretes Digitalsignal überführt. Nach dem NYQUIST-SHANNON-Theorem darf die Abtastrate bzw. Abtastfrequenz f_s nicht unterhalb der doppelten Frequenz der höchsten

im Signal vorhandenen Frequenz f_{max} fallen, da es ansonsten zu Mehrdeutigkeit kommt (siehe Aliasing). Die Frequenz $\frac{f_s}{2}$ heißt daher auch Nyquistfrequenz. Demzufolge liegt eine Überabtastung (engl. Oversampling) vor, wenn

$$f_s > 2 \cdot f_{max} \quad (3.16)$$

und eine Unterabtastung (engl. Undersampling), wenn

$$f_s < 2 \cdot f_{max} \quad (3.17)$$

[18]

Aliasing Bei einem unterabgetasteten Analogsignal kommt es also für alle Frequenzanteile, die im ursprünglichen Analogsignal oberhalb der halben Abtastfrequenz liegen, zu Störeffekten. Abbildung 3.28 zeigt eine zu geringe Abtastung, die zwei mögliche rekonstruierte Signalverläufe zulässt. Den tatsächlichen (schwarz) und einen zweiten mit einer deutlich geringeren Frequenz (rot), einem sogenannten *Alias*.

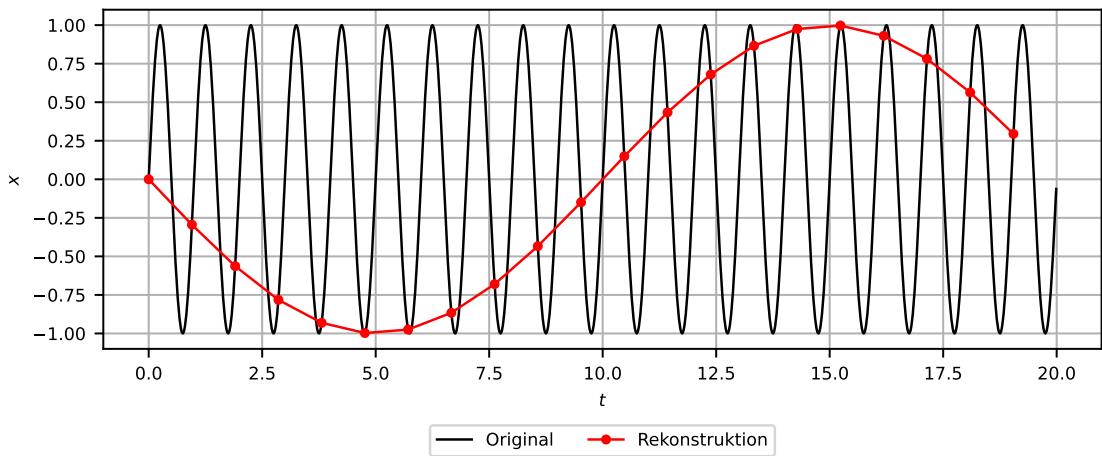


Abbildung 3.28 Ein durch Unterabtastung des Originalsignals (schwarz) entstandener Alias-Effekt beim rekonstruierten Signal (rot) mit deutlich geringerer Frequenz wie im Original

Alias-Frequenzen f_{alias} ergeben sich rechnerisch für alle Frequenzen $f > \frac{f_s}{2}$ aus der Betragsdifferenz zwischen dem nächstgelegenen ganzzahligen Vielfachen der Abtastfrequenz f_s und der im ursprünglichen Signal enthaltenen Frequenz f . [59].

$$f_{alias} = \left| \text{int}\left(\frac{f}{f_s}\right) \cdot f_s - f \right| \quad (3.18)$$

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 3.29 das originale Spektrum mit schwarzen Balken und das unterabgetastete Ergebnisspektrum mit gestrichelten roten Balken dargestellt. Beispielsweise spiegelt sich der Frequenzpeak f_3 an der halben Abtastfrequenz $\frac{f_s}{2}$ und liegt damit als Alias f_{3alias} in einer tieferen Frequenz vor als das f_{2alias} , obwohl f_2 originär niederfrequenter ist als f_3 .

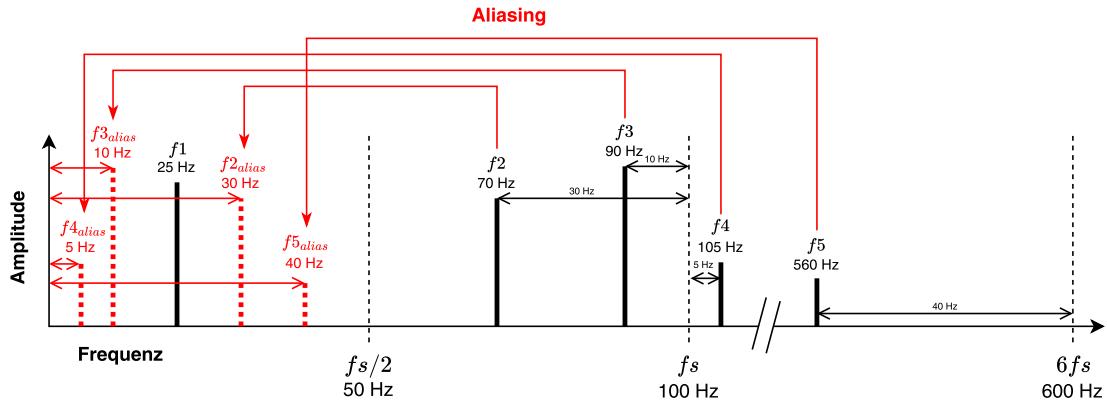


Abbildung 3.29 Original Spektrum (schwarz) und auf Basis von f_s rekonstruiertes Spektrum (rot) mit Alias-Frequenzen, in Anlehnung an [59]

Zur Unterdrückung von Alias-Frequenzen werden in der Signalübertragung üblicherweise Anti-Aliasing-Filter verwendet, die alle Frequenzen oberhalb des maximal zu übertragenen Signals f_{max} im noch nicht abgetasteten Analogsignal unterdrücken.²⁹

Bandbreite und -lage Das wichtigste Kriterium bei analoger Kommunikation ist die Frequenzbandbreite des zu übertragenen Nutzsignals bzw. die zu Verfügung stehende Bandbreite des Übertragungskanals. Sie wird durch die Differenz der oberen und unteren Grenzfrequenzen der zu übertragenen Signalfrequenzen f_{min} und f_{max} bzw. durch die Grenzfrequenzen des Übertragungskanals definiert. Negative Frequanzanteile werden nicht zur Bandbreite hinzugezählt, sodass

$$B = f_{max} - f_{min} \quad (3.19)$$

Liegt die untere Grenzfrequenz bei 0, wird das von der Quelle stammende ursprüngliche und in seiner natürlichen Lage befindliche Signal als Basisbandsignal in der Basisbandlage bezeichnet. Ist die untere Grenzfrequenz > 0 , spricht man von Bandpasslage des Signals. Das Basisband selbst wird über die Nyquistfrequenz definiert und beträgt also $-\frac{f_s}{2}$ bis

²⁹Bei festgelegter Abtastung eines real schwingenden Systems ist eine Alias-Filterung also nicht ohne weiteres möglich. Im Kontext der Arbeit ist dies insbesondere bei diskret aufgedruckten Registermarken auf einer schwankenden Materialbahn von Bedeutung.

$\frac{f_s}{2}$ [18, S.49]. Abbildung 3.30 stellt die Begriffe anhand eines Frequenzspektrums $X(f)$ in Basisbandlage dar.

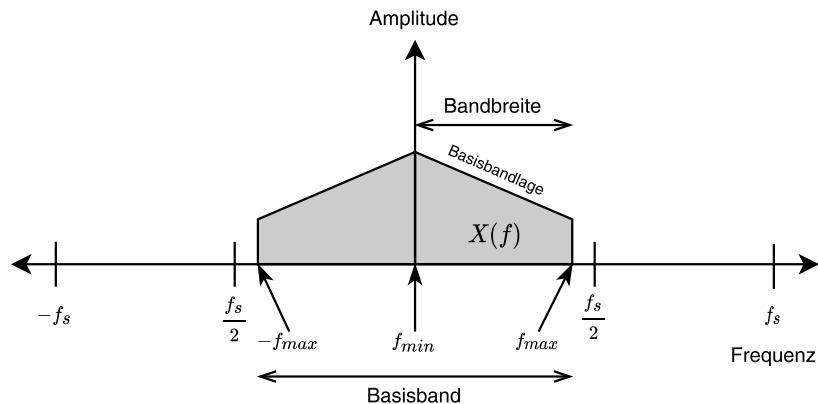


Abbildung 3.30 Bandbreite und Basisband eines Frequenzspektrums $X(f)$

Kanalkapazität Zur erfolgreichen Übertragung einer bestimmten Informationsmenge durch einen Übertragungskanal ist die Kanalkapazität eine relevante Größe. Sie beschreibt wie viel Information in einer bestimmten Zeit über einen Übertragungskanal übermittelt werden kann. Die Informationsmenge muss durch den Übertragungskanal „passen“. Die zu übermittelnde Informationsmenge ist in dieser Betrachtung durch einen Nachrichtenquader mit den drei Dimensionen Übertragungszeit, Bandbreite und Störabstand definiert. [18, S.98-99].

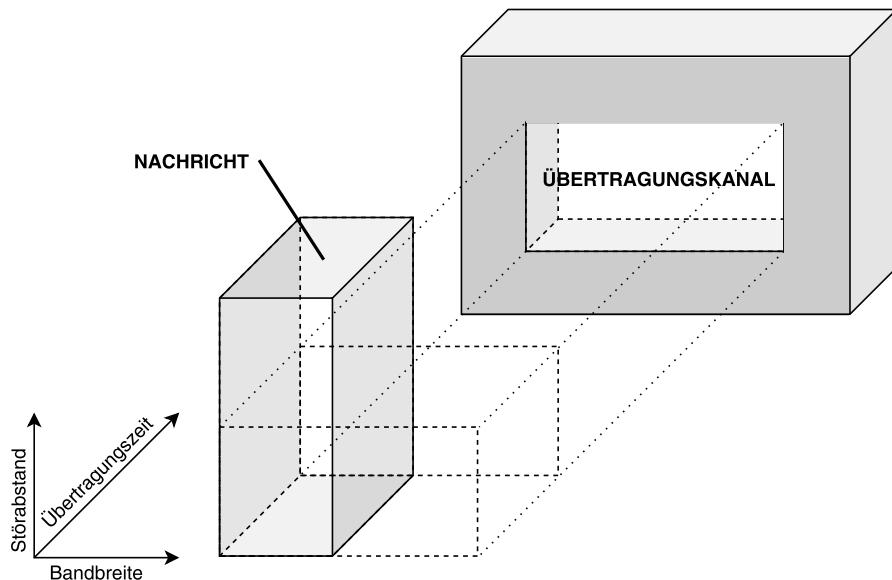


Abbildung 3.31 Veranschaulichung der Übertragungskapazität als Nachrichtenquader, in Anlehnung an [18, S.97]

Multiplexing und Demultiplexing Zur Mehrfachnutzung eines gemeinsamen Übertragungsmediums für *mehrere simultane Quelle-Senke Verbindungen* werden in der Nachrichtentechnik typischerweise *Multiplexing-Verfahren* genutzt. Der Multiplexer ermöglicht eine Bündelung der einzelnen Kanäle auf der Sender Seite auf das gemeinsame Übertragungsmedium. Die Auf trennung der Kanäle nach der Übertragung wird in einem entsprechenden *Demultiplexing-Verfahren* erreicht. Abbildung 3.32 zeigt das Schema dieser Mehrfachnutzung eines gemeinsamen Übertragungmediums bzw. Informationsträgers.

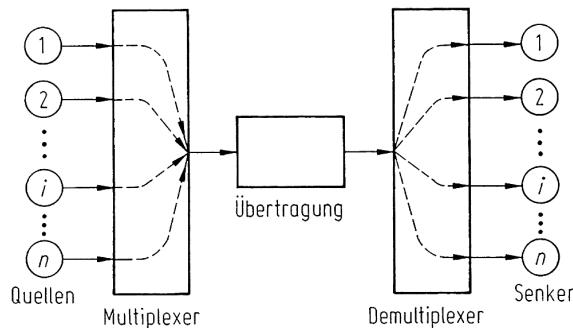


Abbildung 3.32 Vielfachnutzung eines Übertragungsmediums [28, S.132]

In der Nachrichtentechnik existieren unterschiedlichste Multiplexing- bzw. Demultiplexingverfahren, wodurch sich die Kanäle gegenseitig nicht stören. Beispiele sind:

- *Raummultiplexing* (z.B. Richtfunk), das die Kanäle örtlich voneinander trennt
- *Frequenzmultiplexing* (z.B. Radio), das die Kanäle über definierte Frequenzbänder trennt
- *Zeitmultiplexing* (z.B. CB-Funk), das die Kanäle über definierte Übertragungszeiten trennt

3.2.2 Signalanalyse

Eine *Signalanalyse* bezeichnet ganz allgemein eine Untersuchung eines Signals, um seine charakteristischen Eigenschaften wie Zeitverhalten, Frequenzverhalten, Phasenverhalten und Amplitude zu bewerten.

Frequenzanalysen umfassen sämtliche Methoden zur systematischen Untersuchung zyklischer Phänomene in Signalen. Die Strukturanalyse dieser zyklischen bzw. wellenförmigen Effekte ermöglicht die Extraktion von Informationen über ihre Ursprünge und damit detaillierte Einblicke in verschiedenste Naturphänomene oder technische Prozesse. In der Kommunikationstechnik, der Audiotechnik, im Bereich Bildverarbeitung oder in der Regelungstechnik sind Frequenzanalysen fundamental wichtig. In der produzierenden Industrie

werden Frequenzanalysen beispielsweise zur Untersuchung mechanischer Schwingungen mit Hilfe von Beschleunigungssensoren direkt an Maschinenbauteilen oder mit Hilfe von akustischen Sensoren angewendet, um frühzeitig den Verschleiß spezifischer Maschinenteile zu ermitteln. Die Anwendbarkeit für Frequenzanalysen im Bereich kontinuierlich laufender Prozesse mit entsprechenden Messsignalen ist sehr vielfältig.

3.2.2.1 Fourier-Transformation (FT)

JEAN-BAPTISTE-FOURIER hat 1807 herausgefunden, dass das Frequenzverhalten einer P -periodischen Funktion als Linearkombination von Sinus- und Cosinusschwingungen ausgedrückt werden kann. Nicht periodische Signale, wie sie in der realen Welt häufiger vorkommen, können nicht über eine Fourier-Reihe in ihre Einzelschwingungen zerlegt werden. Für diese Fälle kann die sogenannte *Fourier-Transformation* (FT) genutzt werden. Sie lässt sich aus der Fourier Reihe herleiten. [24, S.29-33]

Die Fourier-Transformierte $X(f)$ wird auch Spektrum von $x(t)$ oder als *Analyse-Gleichung* bezeichnet.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.20)$$

Das Gegenstück ist die inverse Fourier-Transformation (iFT), mit der aus dem Frequenzspektrum $X(f)$ wieder das ursprüngliche Zeitsignal $x(t)$ rekonstruiert werden kann. Diese Form wird auch *Synthese-Gleichung* genannt.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3.21)$$

Das Frequenzspektrum $X(f)$ kann in ein reelles und imaginäres Spektrum aufgeteilt werden bzw. in ein Betragsspektrum³⁰ $|X(f)| = \hat{X}(f)$ und ein Phasenspektrum $e^{jX(f)}$.

$$\begin{aligned} X(f) &= \Re\{X(f)\} + j\Im\{X(f)\} \\ &= |X(f)| \cdot e^{j\angle X(f)} \end{aligned} \quad (3.22)$$

3.2.2.2 Diskrete Fourier-Transformation (DFT)

Zeitdiskrete Signale, wie sie in dieser Arbeit vorkommen, können mit Hilfe der *diskreten Fourier-Transformation* (DFT = engl. Discrete Fourier-Transformation) [120] in seine Einzelbestandteile zerlegt werden. Bei endlichen Signalen ist die Länge des Zeitsignals

³⁰In dieser Arbeit werden ausschließlich Betragsspektren betrachtet.

$x[n]$ von der Abtastperiode $P = \frac{1}{f_s}$ abhängig und über $n \in [0 : N - 1]$ definiert. Der Frequenzvektor wird auf $k \in [0 : N - 1]$ beschränkt.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi k}{N} n} \quad (3.23)$$

Unter Berücksichtigung des NYQUIST-SHANNON-Theorems ergibt sich der größte Frequenzindex K_{uniq} des positiven Spektralanteils im Intervall $[0, \frac{f_s}{2}]$ durch folgenden Term.
31

$$K_{uniq} = \left\lceil \frac{N+1}{2} \right\rceil \quad (3.24)$$

Das Amplituden- bzw. Betragsspektrum $\hat{X}[k]$ sei gegeben durch³²

$$\hat{X}[k] = \left| \frac{1}{N} \cdot X[k] \right| \quad (3.25)$$

Abbildung 3.33 zeigt den Algorithmus der DFT.³³

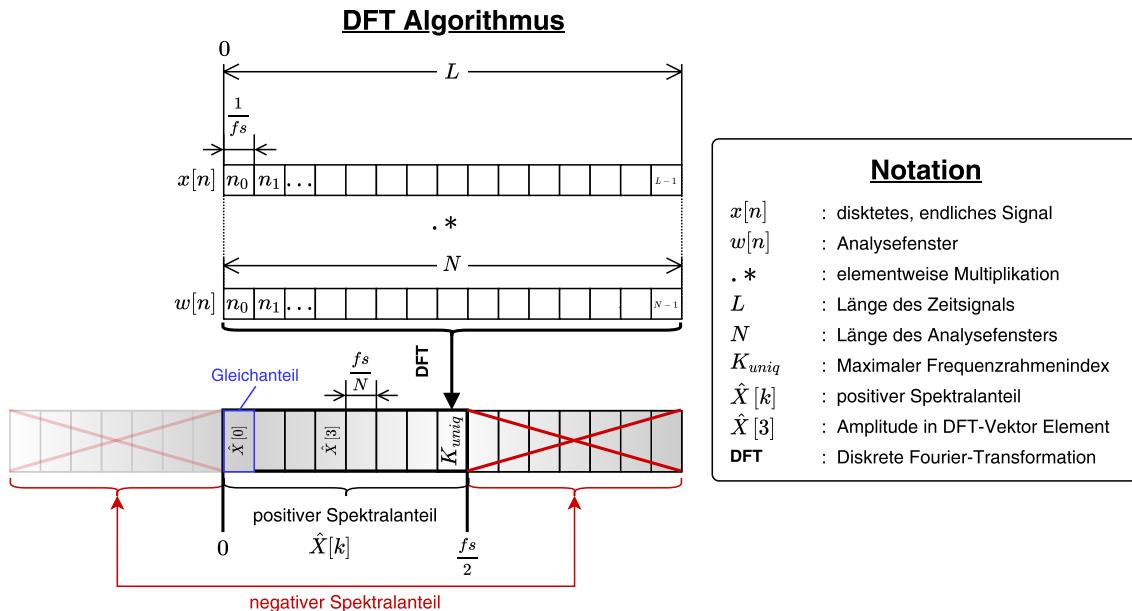


Abbildung 3.33 Algorithmus der DFT, in Anlehnung an [120]

³¹Der Gleichanteil wird sowohl zum positiven als auch zum negativen Spektrum gezählt.

³²In dieser Konvention normiert das $\frac{1}{N}$ die Amplituden bzgl. der Fensterlänge, da sie ansonsten immer weiter ansteigen würde, je länger ein Signal ist, bei ansonsten identischer Amplitude und Frequenz.

³³Der negative Spektralanteil wird im Ergebnisvektor in der Regel hinter den positiven Spektralanteil gehängt. Beide besitzen die gleiche Information, weshalb der negative Teil bei Visualisierungen nicht dargestellt wird.

3.2.2.3 Kurzzeit Fourier-Transformation (STFT)

Zur Analyse der Frequenzanteile eines über die Zeit veränderlichen Signals kann die Analyse gleitend über mehrere Teilintervalle des Gesamtsignals durchgeführt werden. Eine Methode dafür ist die *Kurzzeit Fourier-Transformation* (STFT = engl. Short Time Fourier-Transformation) [120] [3]. Hierbei wird der Frequenzinhalt mit einem endlichen Segment des diskreten Zeitsignals durch eine gleitende Fensterfunktion $w[n]$ entlang der Zeitachse wie folgt berechnet.

$$X[m, k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n + mH]w[n]e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} \quad (3.26)$$

Das diskrete Signal mit der Länge L sei in diesem Fall über $x : [0 : L - 1] \rightarrow \mathbb{R}$ definiert. Das Analysefenster hat die Länge N und ist über $w : [0 : N - 1] \rightarrow \mathbb{R}$ definiert. Im einfachsten Fall wird eine rechteckige Fensterform genutzt mit $w[n] = 1$ für alle $n \in [0 : N - 1]$. Der Hop-Parameter $H \in \mathbb{N}$ wird in Samples angegeben und bestimmt die Schrittweite in der das Fenster über das Signal verschoben wird. Zur Datenreduktion wird H z.B. mit $\frac{N}{2}$ gewählt. Die Zeit- und Frequenzkoeffizienten sind durch $m \in [0 : M]$ und $k \in [0 : K_{uniq}]$ definiert. M ist der maximale Zeitrahmenindex und K_{uniq} entspricht dem größten Frequenzindex des positiven Spektralanteils genau wie in der DFT definiert (siehe Gleichung 3.24). Um den Zeitbereich des Fensters vollständig in den Zeitbereich des Signals einzuschließen, ergibt sich die Nummer des maximalen Zeitrahmenindex M wie folgt.³⁴

$$M = 1 + \left\lfloor \frac{L - N}{H} \right\rfloor \quad (3.27)$$

Schließlich bezeichnet $X[m, k]$ den k -ten Fourier-Koeffizienten für den m -ten Zeitrahmen.

Abbildung 3.34 zeigt den Algorithmus der STFT.³⁵

³⁴Falls die Signallänge nicht zu den Fensterparametern passen und das Signal nicht vollständig mit dem Fenster abgetastet werden kann, existieren verschiedene Füllstrategien an den Signalrändern (engl. Padding).

³⁵Weitere Details zur Implementierung werden beispielsweise in [120] umfassend beschrieben.

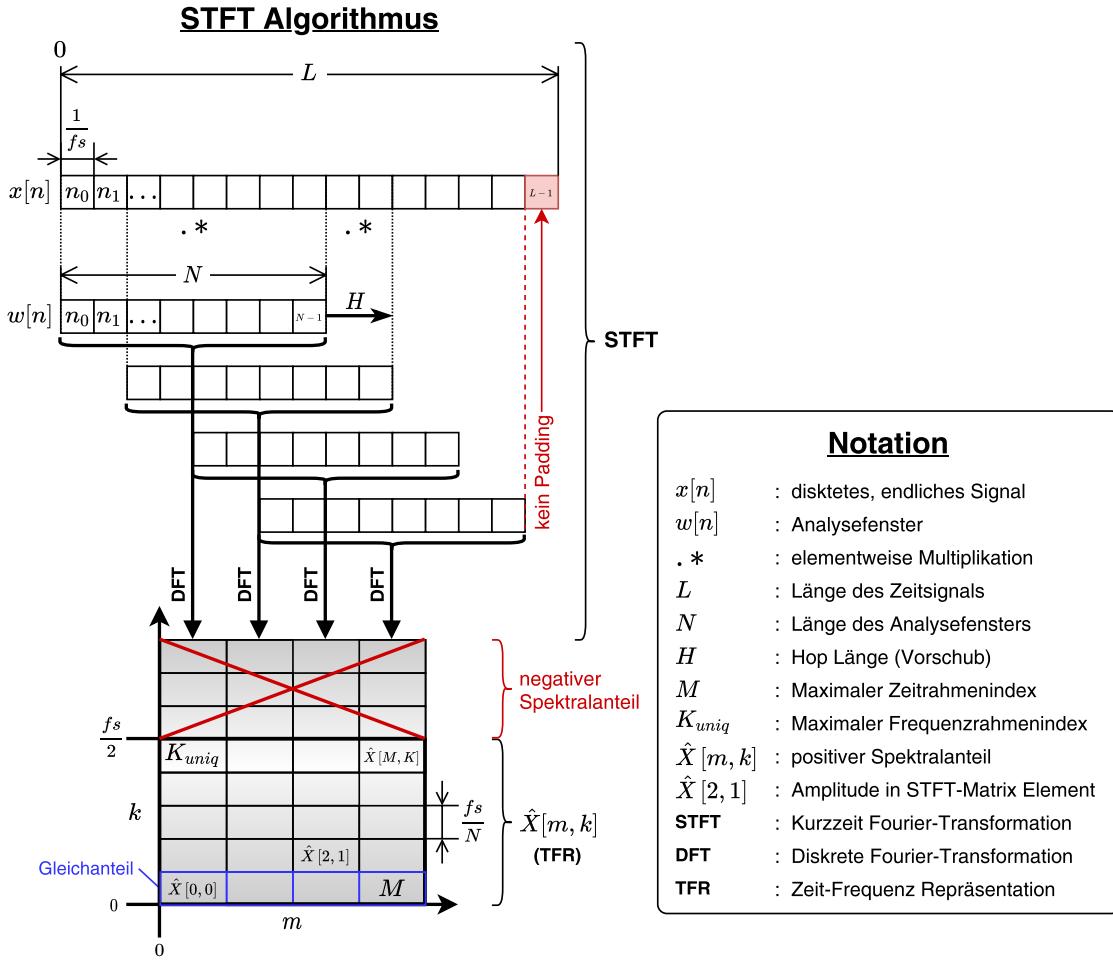


Abbildung 3.34 Algorithmus der STFT, in Anlehnung an [120]

3.2.2.4 Spektrogramm (TFR)

Die aus der STFT resultierende Ergebnismatrix wird als *Zeit-Frequenz-Repräsentation* (TFR = engl. Time Frequency Representation) oder als *Spektrogramm* bezeichnet. Das Betrags-Spektrogramm $\hat{X}[m, k]$ ergibt sich analog zu Gleichung 3.25.

$$\hat{X}[m, k] = \left| \frac{1}{N} \cdot X[m, k] \right| \quad (3.28)$$

Das Spektrogramm ist sowohl von der Fensterbreite N als auch von der Form des Fensters abhängig, also die Werteverteilung innerhalb $w[n]$. Die Fensterbreite legt eine feste Auflösung in Zeit und Frequenz fest. Ein breites Fenster führt zu einer niedrigen Zeitauflösung und einer hohen Frequenzauflösung und umgekehrt. Dieser Zusammenhang ist im Allgemeinen über die Heisenbergsche Unschärferelation und bzgl. der Nachrichtenübertragung

im Speziellen über die Küpfmüllersche Unbestimmtheitsrelation beschrieben. Sie besagt, dass die Zeitspanne und die Bandbreite nicht gleichzeitig beliebig klein werden können. Wodurch folgt, dass die Wahl von Zeit- und Frequenzauflösung immer ein Kompromiss darstellt. Aus dieser Relation folgt beispielsweise, dass man ein Signal mindestens 1 s beobachten muss um eine darin enthaltene Frequenz von 1 Hz nachweisen zu können [73, S.1131]. Abbildung 3.35 zeigt den Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzauflösung als grafische Darstellung der Küpfmüllerschen Unbestimmtheitsrelation.

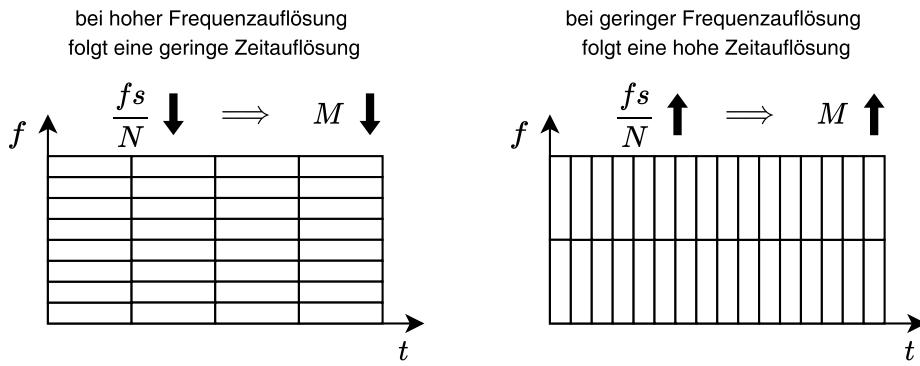


Abbildung 3.35 Grafische Darstellung der Küpfmüllerschen Unbestimmtheitsrelation

Es gibt verschiedene Ansätze um die feste Auflösung von Zeit und Frequenzachse zu überwinden, wie beispielsweise die Wavelet-Transformation. In dieser Arbeit wird jedoch ganz bewusst die STFT aufgrund ihrer Einfachheit und ihres äquidistanten Rasters in der Ergebnismatrix genutzt und kann daher direkt als Pixelbild dargestellt werden. Die Pixelwerte kodieren die Amplitude jedes Zeit-Frequenzkoeffizienten, wodurch ein Pixelbild mit Strukturen entsteht, die abhängig von den im Signal enthaltenen Informationen sind.

Die Vielfalt möglicher Fensterformen ist quasi unbegrenzt. Abbildung 3.36 zeigt einige typische Fensterfunktionen im Vergleich. Jede Fensterfunktion besitzt spezifische Vor- und Nachteile, die sich insbesondere durch ihre jeweilige spektrale Antwort zeigen.

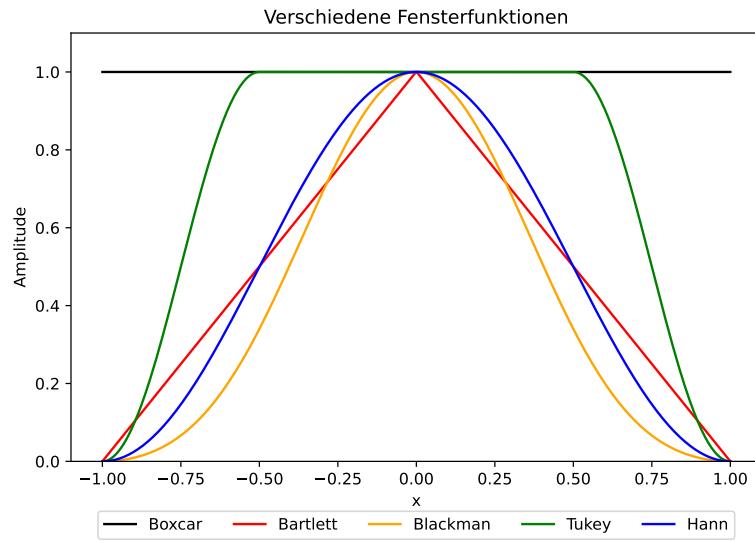


Abbildung 3.36 Vergleich verschiedener Fensterfunktionen

Das Hann-Fenster eignet sich beispielsweise besonders gut, um den sogenannten *Leck-Effekt* möglichst gering zu halten.[19] Der Effekt beschreibt das Verhältnis der Leistung unter allen Nebenmaxima im Verhältnis zur Gesamtleistung. Ist er gering, trägt er zur Realisierung einer klaren Abzeichnung von Frequenzlinien gegen den Hintergrund bei. Das Hann-Fenster besitzt eine solche „scharfe“ Frequenzantwort, da es an den Flanken im Vergleich zu anderen Fensterfunktionen relativ flach ausläuft. Abbildung 3.37 zeigt links die diskrete Hann-Fensterfunktion und rechts seine Frequenzantwort mit 128 Frequenzkomponenten, wie sie durch Anwendung der DFT auf das Fenster selbst gewonnen werden kann. Die Frequenzantwort zeigt somit, wie stark das Frequenzverhalten durch das Fenster selbst beeinflusst wird.

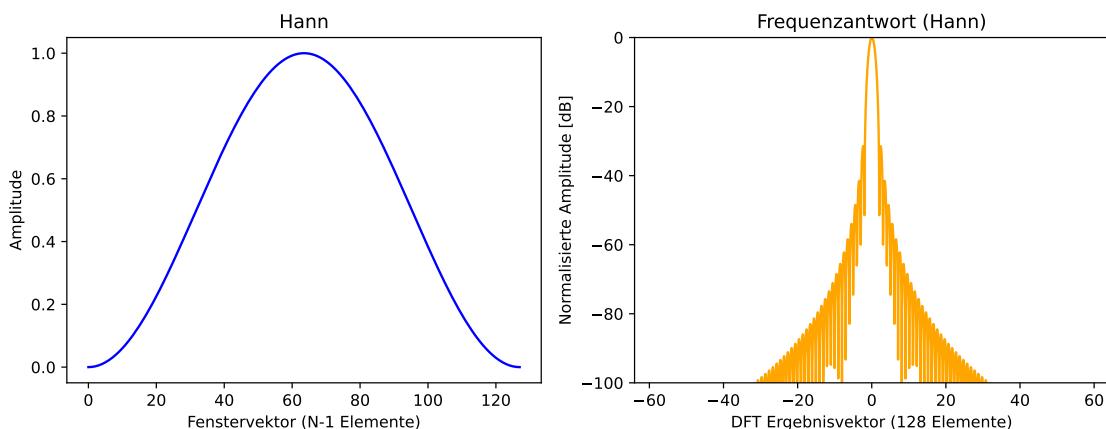


Abbildung 3.37 Hann-Fensterfunktion (links) und seine Frequenzantwort (rechts)

Zur Verdeutlichung des grundsätzlichen Vorteils eines Spektrogramms gegenüber einer Zeitreihendarstellung wird ein und dasselbe Testsignal in beiden Darstellungsformen in Abbildung 3.38 im direkten Vergleich dargestellt. Die visuelle Interpretierbarkeit von Signalen, in denen vielfältige und bzgl. Zeit- und Frequenz nicht konstante Einzelinformationen enthalten sind, ist im Spektrogramm wesentlich komfortabler als in der Zeitreihendarstellung. Links ist das Testsignal x dargestellt, welches zuvor aus fünf einzelnen Signalen x_1 bis x_6 additiv überlagert wurde. Rechts ist das mit Hilfe der STFT berechnete Spektrogramm dargestellt, mit einer den Einzelkomponenten entsprechenden Zeit-Frequenzsignatur.

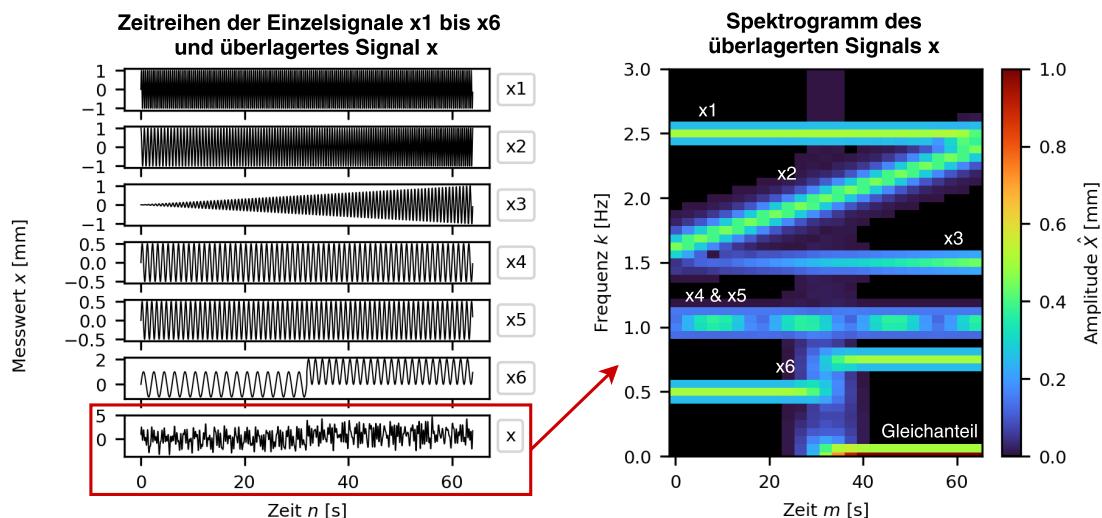


Abbildung 3.38 Zeit-Frequenz Analyse des additiv überlagerten Signals x aus den Einzelsignalen x_1 bis x_6 mit Hilfe eines Spektrogramms

Der Gleichanteil wird im kleinsten Fourier Koeffizienten dargestellt, also in der unteren Pixelreihe im Spektrogramm. Die Summe aller Elemente eines Frequenzvektors pro Zeitfenster (Spalten) gibt die Summe der Amplituden des Signals über dieses Zeitintervall wieder. Durch den Leck-Effekt wird die Amplitude jedoch über mehrere Pixel oberhalb und unterhalb der tatsächlichen Frequenz „verschmiert“. Die Amplitudeninformation ist daher im Spektrogramm visuell immer etwas schwächer ausgeprägt als im ursprünglichen Signal, da die verschmierten Amplitudenanteile in den anderen Frequenzen optisch fast nicht wahrnehmbar sind.³⁶

Der Signalanteil x_1 ist der hochfrequenteste von allen Teilsignalen x_1 bis x_6 . Außerdem ist er konstant in der Frequenz, wodurch sich eine kontinuierliche horizontale Linie bei 2,5 Hz im Spektrogramm (rechts) bildet. Der Signalanteil x_2 ist in der Amplitude genauso

³⁶Diesem Effekt kann theoretisch durch eine Normierung des Flächeninhaltes des Fensters entgegengewirkt werden, wodurch der Leck-Effekt insgesamt aber größer wird und deshalb in dieser Arbeit nicht zur Anwendung kommt.

groß wie x_1 , jedoch verläuft seine Frequenz kontinuierlich von einer etwas niedrigeren Frequenz zu einer höheren. Im Spektrogramm ist dies durch die schräg verlaufende Linie von 1,5 Hz bis 2,5 Hz gut zu erkennen. Der Signalanteil x_3 besitzt dagegen dieselbe konstante Frequenz wie x_2 bei 1,5 Hz, jedoch mit linear steigender Amplitude von 0 mm bis 1 mm. Dies zeigt sich als horizontal verlaufende Linie mit intensiver werdende Färbung. Durch die limitierte Frequenzauflösung, welche durch die Fensterlänge vorgegeben ist, können die in der Frequenz fast identischen Signalanteile x_4 und x_5 nicht mehr als eigenständige Linien aufgelöst werden. Jedoch ergibt sich eine gestrichelte Linie, die in der Frequenz genau auf der mittleren Frequenz der beiden einzelnen Signalanteile liegt, nämlich bei 1 Hz. Interessant ist, dass das Linienmuster in der Intensität über die Zeit in einem bestimmten Abstand variiert, der wiederum etwas über den minimalen Frequenzabstand der Einzelsignale preisgibt. Der Effekt wird als *Schwebung* bezeichnet und ist in Kapitel 3.2.3.2 näher beschrieben. Ein weiteres interessantes Merkmal zeigt sich bei dem plötzlichen Sprung bzgl. des Gleichabteils im Einzelsignal x_6 , genau zu dem Zeitpunkt, an dem auch seine Frequenz sprunghaft auf ein höheres Niveau wechselt. Der Sprung im Gleichanteil zeigt sich im Spektrogramm durch ein vertikales Muster aufgrund der kontinuierlichen Anregung sehr vieler Frequenzen, mit einem Amplitudenmaximum im Gleichanteil (unterste Pixelreihe).

In der Gegenüberstellung wird deutlich, wie viele einzelne systematische Informationen das überlagerte Signal x tatsächlich beinhaltet, obwohl es im Zeitbereich zunächst wie ein völlig verrauscht stochastisches Signal wirkt. Der große Vorteil des Spektrogramms gegenüber der Darstellung als Zeitreihe ist, dass in der bildhaften Signalrepräsentation die Zeit, die Frequenz und die Amplitude auf drei unabhängigen Achsen dargestellt werden können. Die zentralen Signalbestandteile werden dadurch deutlich besser sichtbar und so überhaupt erst differenzierbar.

Merke: Zur Differenzierung verschiedener spezifischer Störungen, die in den einzelnen Teilprozessen auf die Materialbahn übertragen werden und diese somit beeinflussen, scheint ein Spektrogramm als Visualisierungstechnik grundsätzlich sehr geeignet zu sein.

3.2.3 Signalsynthese

Signalsynthese bezeichnet den Prozess der Erzeugung von Signalen durch Kombination von elementaren Signalen oder Modifikation vorhandener Signale, um spezifische Eigenschaften zu erreichen. Es existieren mehrere grundlegende Prinzipien wie Signale miteinander verrechnet werden können und so schließlich zu unterschiedlichen Ergebnissignalen führen.

Merke: Die nachfolgend eingeführten Prinzipien ermöglichen potentiell grundlegende Erklärungsansätze, welche Übertragungsmechanismen zur Erzeugung eines bestimmten Ergebnisspektrums beigetragen haben können, was wiederum bei der Eingrenzung von Ursachen behilflich sein kann.

3.2.3.1 Fundamental Signale

Zur Erläuterung der verschiedenen Prinzipien seien zunächst die beiden beispielhaften Fundamental Signale $x_1(t)$ und $x_2(t)$ definiert, die im Folgenden als Eingangssignale dienen.

$$\begin{aligned}x_1(t) &= \hat{x}_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t \pm \varphi_1) \\x_2(t) &= \hat{x}_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t \pm \varphi_2)\end{aligned}\tag{3.29}$$

3.2.3.2 Überlagerung

Den einfachsten Fall der Signalsynthese stellt die additive Überlagerung dar und wird je nach Kontext auch Superpositionsprinzip genannt. Hierbei werden alle Eingangssignale $x_i(t)$ zum resultierenden Signal $x(t)$ aufaddiert. Das Prinzip ist überall dort gültig wo gleiche physikalische Größen überlagert werden, wie z.B. bei mehreren Kräften, die auf einen Körper wirken. Mathematisch ist die Signalüberlagerung wie folgt definiert.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t)\tag{3.30}$$

Bei dieser Form der Signalsynthese bleiben die beiden ursprünglichen Einzelfrequenzen x_1 und x_2 vollständig im Frequenzspektrum des überlagerten Signals x erhalten. Abbildung 3.39 zeigt, diesen Zusammenhang exemplarisch.

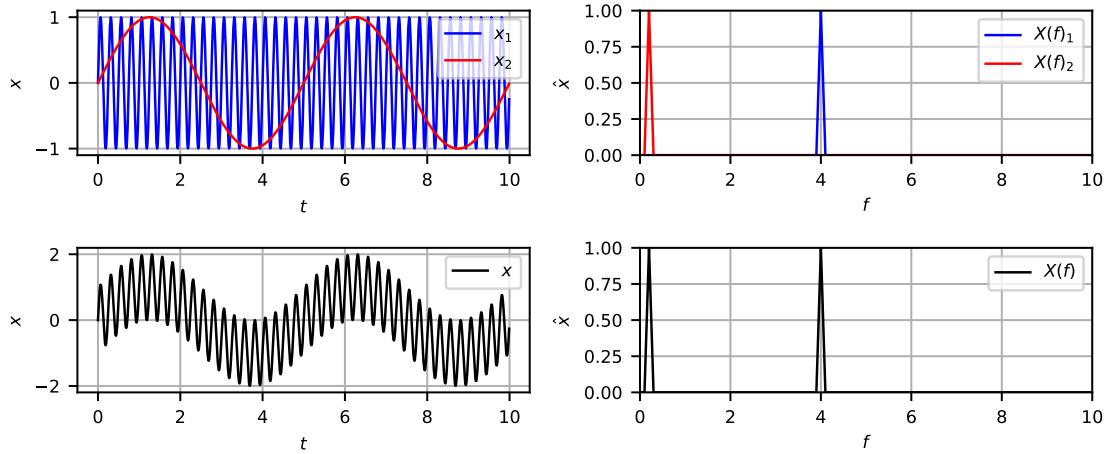


Abbildung 3.39 Additive Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit großem Frequenzunterschied

Liegen die Frequenzen der Eingangssignale nahe beieinander, zeigt das resultierende Signal einen charakteristischen Signalverlauf an, bei dem die Amplituden periodisch zu- und wieder abnehmen. Diesen Effekt nennt man auch Schwebung. Je kürzer das Analysefenster bei einer Frequenzanalyse ist, desto eher zeigt sich dieser Effekt auch im Spektrum. Im nachfolgenden Beispiel ist das Signal lang genug und die Frequenzanalyse kann, genau wie in Abbildung 3.39 zu sehen, beide im überlagerten Signal enthaltenen Frequenzen separat auflösen.

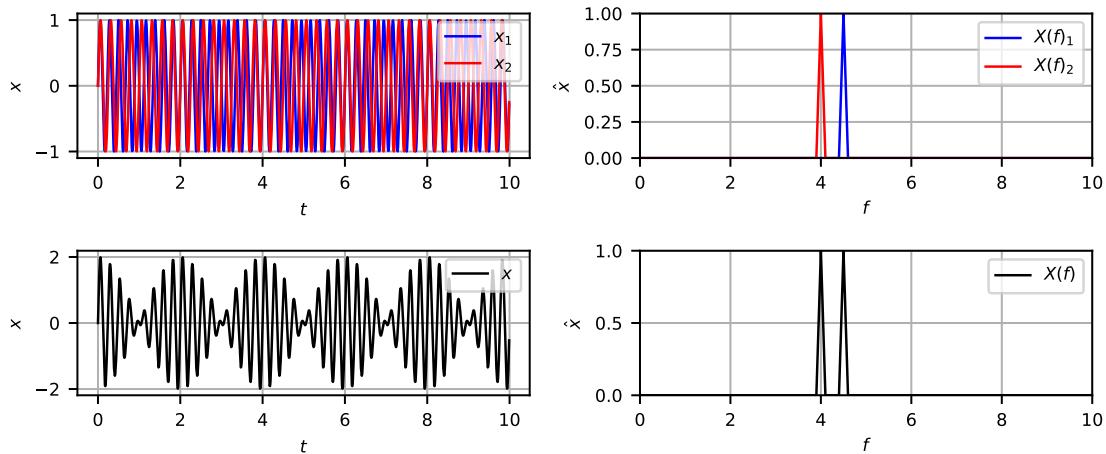


Abbildung 3.40 Additive Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit kleinem Frequenzunterschied führen bei zu geringer Frequenzauflösung zu einer Schwebung (hier nur in der Zeitreihe sichtbar)

Die Frequenz der Überlagerungsschwingung f_R , die beim auszählen der Perioden im Zeitsignal x ermittelt werden kann, ist die mittlere Frequenz der beiden Einzelschwingungen.

$$f_R = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.31)$$

Die Schwebungsfrequenz $f_{Schwebung}$ ist

$$f_{Schwebung} = |f_1 - f_2| \quad (3.32)$$

Die Schwebungsperiode $P_{Schwebung}$ wird von Knoten zu Knoten gemessen und wird umso größer je näher die Einzelfrequenzen beieinander liegen.

$$P_{Schwebung} = \frac{1}{f_{Schwebung}} \quad (3.33)$$

Merke: In Rolle-zu-Rolle Prozessen ist ebenfalls mit Schwebungseffekten zu rechnen, da potentiell viele und dadurch ggf. auch in der Frequenz nahe beieinander liegende Frequenzen auf die Materialbahn übertragen werden.

3.2.3.3 Mischung

Die sogenannte Signalmischung ist eine andere Methodik der Signalsynthese und wird für unterschiedlichste Zwecke in der Kommunikationstechnik genutzt. Beispielsweise werden in der Nachrichtentechnik niederfrequente Basisbandsignale, wie z.B. Sprache, aufgrund technischer und wirtschaftlicher Aspekte in der Regel nicht in ihrer natürlichen Frequenz übertragen, sondern zunächst auf ein höheres Frequenzband gebracht, um dieses dann effizienter übertragen zu können. Je nach Kontext wird dieser Vorgang Frequenzumsetzung, Mischung oder Modulation genannt. Die Frequenzumsetzung von einem niedrigen Frequenzband zu einem höheren Frequenzband nennt man Aufwärtsmischung. Umgekehrt funktioniert die Mischung auch und man spricht von Abwärtsmischung oder Demodulation. Das höherfrequente Signal wird als Trägersignal $x_T(t)$ oder Lokaloszillator bezeichnet und das niederfrequente Signal als Modulationssignal $x_M(t)$. Mit Hilfe des Modulationssignals bzw. Nutzsignals werden ein oder mehrere Parameter (Amplitude, Frequenz oder Phase) des Trägersignals systematisch beeinflusst und es entsteht ein völlig neues Signal. Mathematisch gesehen wird der jeweilige Parameter des Trägersignals praktisch durch das mit einer Konstanten k angepasste Modulationssignal ersetzt. Nachfolgende Beispiele zeigen drei verschiedenen Modulationsarten bzgl. einer multiplikativen Mischung. [18, S.174]

Wird der Frequenzparameter ω verändert, liegt Frequenzmodulation (FM) vor.

$$x_{FM}(t) = \hat{x}_T \cdot \sin \left(k \cdot x_M(t) \cdot t \pm \varphi_T \right) \quad (3.34)$$

Wird der Phasenparameter φ verändert, liegt Phasenmodulation (PM) vor.

$$x_{PM}(t) = \hat{x}_T \cdot \sin \left(\omega_T \cdot t \pm k \cdot x_M(t) \right) \quad (3.35)$$

Wird der Amplitudenparameter \hat{x} verändert, so liegt Amplitudenmodulation (AM) vor.

$$x_{AM}(t) = \underline{k} \cdot x_M(t) \cdot \sin (\omega_T \cdot t \pm \varphi_T) \quad (3.36)$$

Phasen- und Frequenzmodulation bewirken Veränderungen der Winkelangabe des Sinus. Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägers im Rhythmus des Modulationssignals variiert. Abbildung 3.41 zeigt das Prinzip einer Aufwärtsmischung bzgl. einer Amplitudenmodulation exemplarisch.

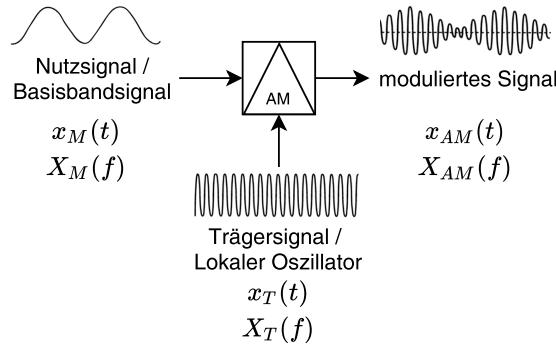


Abbildung 3.41 Amplitudenmodulation eines Trägersignals $x_T(t)$ bzw. $x_1(t)$ mit einem Nutzsignal $x_M(t)$ bzw. $x_2(t)$ erzeugt ein neues Signal $x_{AM}(t)$ bzw. $x(t)$ mit einem ebenso neuen Spektrum $X_{AM}(f)$ bzw. $X(f)$

Theoretisch können alle drei Modulationsarten in realen Schwingungssystemen auftreten, wodurch auch mit modulierten Anteilen bei spektralen Beobachtungen zu rechnen ist. Etwaige Ergebnisspektren können nicht unmittelbar auf Ursachen mit identischem Spektrum zurückgeführt werden, sondern lassen sich nur im Kontext der Signalmischung korrekt interpretieren.

Merke: In Bezug auf Rolle-zu-Rolle Prozesse werden Amplitudenmodulationen als besonders relevant eingeschätzt.

Darüber hinaus existieren zwei grundlegende Mischprinzipien zur Modulation von Signalen. Beide werden nachfolgend im Kontext der Amplitudenmodulation erläutert und ihre Auswirkungen im Zeit- und Frequenzbereich gegenübergestellt.

Multiplikative Mischung (Ideale Mischung) In der *multiplikativen Mischung* [18, S.174-186], werden die Eingangssignale miteinander multipliziert und ggf. noch mit einer Konstanten k skaliert. Bei diesem Mischprinzip kommt es nicht zur Bildung von Intermodulationsprodukten und wird daher auch als *ideale Mischung* bezeichnet und kann mathematisch wie folgt ausgedrückt werden.

$$x(t) = k \cdot \prod_{i=1}^n x_i(t) \quad (3.37)$$

Es folgen zwei Beispiele bei denen deutlich wird, dass zwei völlig neue Spektren entstehen, welche aber systematisch mit den Ursprungsfrequenzen zusammenhängen. Das Trägersignal x_T ist in den nachfolgenden Beispielen immer die hochfrequente Schwingung und wird mit x_1 bezeichnet und ist blau dargestellt. Das niederfrequenteren Modulations- bzw. Nutzsignal x_M wird mit x_2 bezeichnet und wird rot dargestellt.

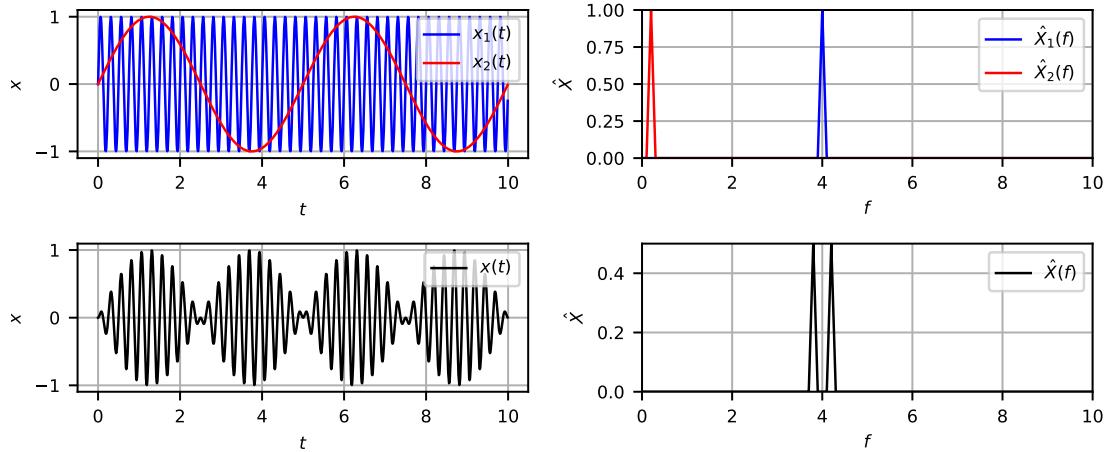


Abbildung 3.42 Multiplikative Mischung mit großem Frequenzunterschied

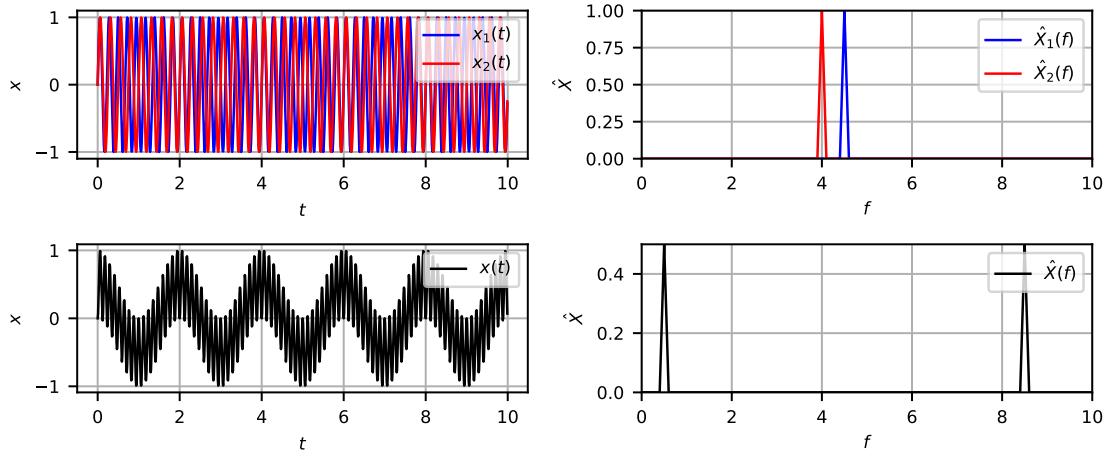


Abbildung 3.43 Multiplikative Mischung mit kleinem Frequenzunterschied

Die Frequenzen des jeweils neuen Signals ergeben sich aus der Differenz und der Summe der Frequenzen von Trägersignal f_T und Modulationssignal f_M .

$$f_{AM} = \begin{cases} f_T - f_M \\ f_T + f_M \end{cases} \quad (3.38)$$

Die neuen Frequenzen ordnen sich links und rechts um die Trägerfrequenz an und werden daher Seitenfrequenzen oder Seitenbänder bei Spektren genannt. Das obere Seitenband (OSB) bleibt in der gleichen Lage wie das Basisband (Regellage). Das untere Seitenband (USB) wird an der Trägerfrequenz gespiegelt (Kehrlage). In Abbildung 3.43 sind die beiden schwarzen Frequenzpeaks im Ergebnisspektrum $\hat{X}(f)$ genau an der blauen Trägerfrequenz $\hat{X}(f)_1$ gespiegelt. Die beiden Peaks in $\hat{X}(f)$ besitzen beide die Frequenzinformation der Modulationsfrequenz $\hat{X}(f)_2$. Aus der Position der beiden Peaks kann aber die Frequenzinformation der ursprünglichen Trägerfrequenz $\hat{X}(f)_1$ rekonstruiert werden.

Durch die Modulation besitzt das AM-Signal nun die doppelte Bandbreite des Basisbandsignals.

$$B_{AM} = 2 \cdot f_{max} \quad (3.39)$$

Abbildung 3.44 veranschaulicht die Begriffe und Zusammenhänge an einem prinzipiellen Spektrum.

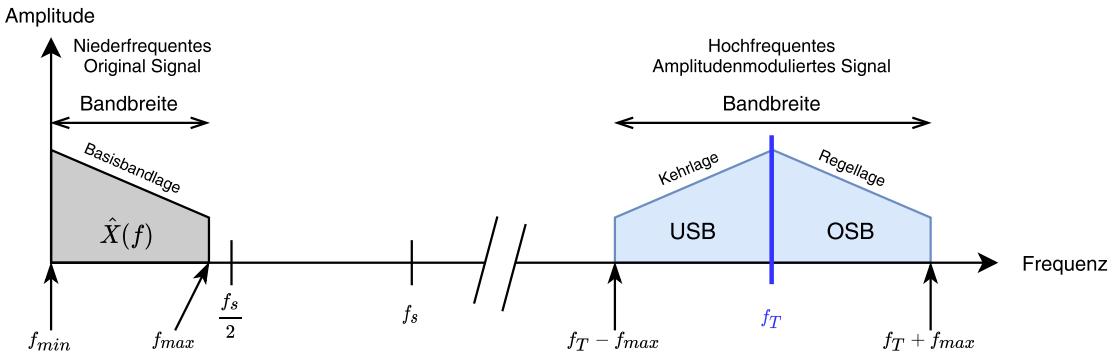


Abbildung 3.44 Ein mit der Trägerfrequenz f_T amplitudenmoduliertes Amplitudenspektrum $\hat{X}(f)$ mit oberem Seitenband (OSB) und unterem Seitenband (USB)

Die Signalstärke (Amplitude) der Seitenbänder ist vom Verhältnis der Amplituden des Modulationssignals \hat{x}_M zum Trägersignal \hat{x}_T abhängig und wird als Modulationsgrad m_{AM} bezeichnet.

$$m_{AM} = \frac{\hat{x}_M}{\hat{x}_T} \quad (3.40)$$

Ist die Amplitude des Modulationssignals größer als die des Trägersignals, liegt Übermodulation vor. In diesem Fall kann das originale Modulationssignal nicht störungsfrei auf der Empfängerseite zurückgewonnen werden.³⁷ ³⁸

Merke: Im Kontext von Rolle-zu-Rolle Prozessen ist damit zu rechnen, dass verschiedene Störungen unterschiedliche Intensitäten besitzen, wodurch es potentiell auch zu unterschiedlicher Ausprägungsstärke von amplitudenmodulierten Signalanteilen kommen kann.

Ob die ursprünglichen Frequenzanteile (Träger- und Nutzsignal) ins AM-Signal mit übertragen werden oder nicht, hängt wiederum von den Gleichanteilen der Ursprungssignale ab: [56]

- Besitzen beide Signale keinen Gleichanteil, sind beide Ursprungsfrequenzen im AM-Signal unterdrückt.
- Besitzen beide Signale einen Gleichanteil, bleiben beide Ursprungsfrequenzen im AM-Signal enthalten.
- Hat nur ein Eingangssignal einen Gleichanteil, verbleibt das jeweils andere Signal im AM-Signal als Träger.

³⁷Der Vorgang der Rekonstruktion auf der Empfängerseite wird auch Demodulation genannt.

³⁸Der Modulationsgrad m_{AM} liegt in der Nachrichtenübertragungstechnik daher in der Regel zwischen 0 und 1. [18, S.175-176]

Merke: Es ist damit zu rechnen, dass unterschiedliche Betriebsbedingungen in Rolle-zu-Rolle Prozessen potentiell Einfluss auf den Gleichanteil bestimmter Störsignale nehmen. Sie können daher potentiell zu Veränderungen in den Übertragungseigenschaften originärer Störfrequenzen führen.

Additive Mischung mit nichtlinearer Verzerrung Zur Erzeugung eines AM-Signals in einer additiven Mischung werden die Eingangssignale im Modulator über ein Übertragungselement mit einer nichtlinearen Kennlinie $g(x)$ bezüglich Eingang und Ausgang verknüpft. Zunächst werden die Eingangssignale additiv überlagert und anschließend durch das Übertragungselement verzerrt. Der Gleichanteil des aufsummierten Signals bestimmt den Arbeitspunkt an der Kennlinie. Mathematisch ist dieses Mischprinzip wie folgt definiert.

$$x(t) = k \cdot g(x(t)) = k \cdot g\left(\sum_{i=1}^n x_i(t)\right) \quad (3.41)$$

In elektronischen Systemen sind die nichtlinearen Übertragungselemente typischerweise Dioden, Röhren oder Transistoren.

Merke: Im Kontext von Rolle-zu-Rolle Prozessen ist damit zu rechnen, dass mechanische Schwingungen an nichtlinearen Übertragungselementen wie Papier, Walzenbezüge oder durch nicht stetige Übertragungskennlinien von Regelungssystemen auf ähnliche Weise verzerrt werden.

Je nach Gleichanteil, Amplitudenverhältnis und Verzerrungskennlinie entstehen unterschiedliche Modulationsprodukte im resultierenden Signal bzw. Spektrum.

Besitzt das Übertragungselement ein stark nichtlineares Übertragungsverhalten, kommt es zu starken Verzerrungen und es entstehen viele neue Modulationsfrequenzen, sogenannte *Intermodulationsprodukte* f_{IM_O} . Sie ergeben sich für N Eingangs frequenzen, die Intermodulationsprodukte jeweils aus der Summe und Differenz von Vielfachen n_i der Eingangs frequenzen f_i nach dem folgenden Schema. [29, S.228] [57]

$$f_{IM_O} = \sum_{i=1}^N n_i \cdot f_i \quad (3.42)$$

Die Ordnungen O bezeichnet die Summe der Vielfachen n_i

$$O = \sum_{i=1}^N |n_i| \quad (3.43)$$

Sämtliche Intermodulationsprodukte bis zur 5. Ordnung bzgl. zwei Eingangsfrequenzen f_1 und f_2 berechnen sich damit wie folgt

1. Ordnung:

$$f_{IM_1} = f_1 \quad (\text{Grundfrequenz})$$

$$\underline{f_{IM_1} = f_2 \quad (\text{Grundfrequenz})}$$

2. Ordnung:

$$f_{IM_2} = 2f_1 \quad (2. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_2} = 2f_2 \quad (2. \text{ Harmonische})$$

$$\underline{f_{IM_2} = f_1 \pm f_2}$$

3. Ordnung:

$$f_{IM_3} = 3f_1 \quad (3. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_3} = 3f_2 \quad (3. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_3} = 2f_1 \pm f_2$$

$$\underline{f_{IM_3} = f_1 \pm 2f_2}$$

4. Ordnung:

$$f_{IM_4} = 4f_1 \quad (4. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_4} = 4f_2 \quad (4. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_4} = 3f_1 \pm f_2$$

$$f_{IM_4} = f_1 \pm 3f_2$$

$$\underline{f_{IM_4} = 2f_1 \pm 2f_2}$$

5. Ordnung:

$$f_{IM_5} = 5f_1 \quad (5. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_5} = 5f_2 \quad (5. \text{ Harmonische})$$

$$f_{IM_5} = 3f_1 \pm 2f_2$$

$$\underline{f_{IM_5} = 2f_1 \pm 3f_2}$$

(...)

(3.44)

Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 3.45 ein prinzipielles Spektrum zweier additiv gemischter, nahe beieinander liegender Ursprungsfrequenzen (schwarz), mit starker nicht-linearer Verzerrung am Übertragungselement gezeigt, wodurch entsprechend der Gleichungen 3.44, Intermodulationsprodukte bis zur 5. Ordnung entstehen.

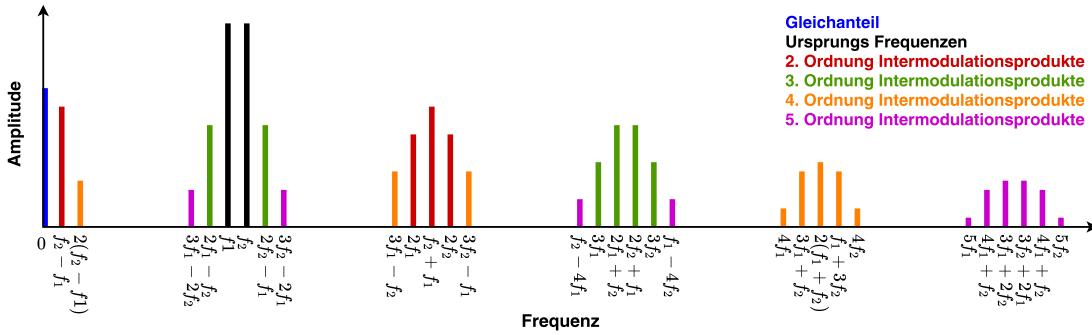


Abbildung 3.45 Beispiel Spektrum mit Intermodulationsprodukten bis 5. Ordnung

Intermodulationsprodukte höherer Ordnungen werden in realen Systemen häufig durch das systemeigene lineare Verzerrungsverhalten stark gedämpft. Dann resultieren häufig nur die Intermodulationsprodukte der 2. und 3. Ordnung. Charakteristisch für Intermodulation generell ist die spektrale Charakteristik mit gehäuften Frequenzbändern in zueinander gleichmäßigen Frequenzabständen. Die Differenzfrequenz zwischen den Peaks entspricht genau der Differenz der ursächlichen Frequenzen. Die Stärke der Intermodulation hängt von der Nichtlinearität der Verzerrung ab.³⁹

Die nichtlinear dämpfende Kennlinie in Abbildung 3.46 wird in den Beispielen und in dieser Arbeit stellvertretend für das allgemeine nichtlineare Übertragungsverhalten von Papier oder anderen Materialien oder Maschinenkomponenten genutzt (siehe Abbildung 3.4 (S.21)).

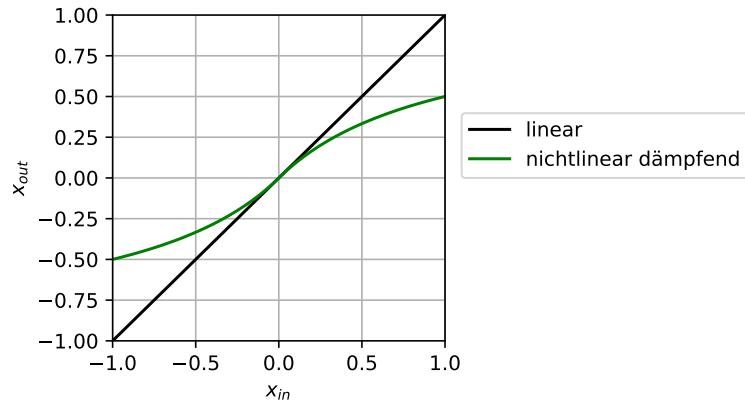


Abbildung 3.46 Prinzipielle nichtlinear dämpfende Übertragungskennlinie $g(x)$

³⁹Sie kann über den Anteil von Obertönen einer Grundschwingung am Gesamtsignal nach der Übertragung als sogenannter Klirrfaktor bestimmt werden. [18]

Die nachfolgenden zwei Beispiele in den Abbildungen 3.47 und 3.48 zeigen die unterschiedlichen Ergebnisspektren der gleichen Ursprungsfrequenzen, bei Verzerrung mit identischer Übertragungskennlinie $g(x)$ aber mit unterschiedlichen Gleichanteilen in den Ursprungsfrequenzen. Es kommt jeweils zu unterschiedlich starker Verzerrung, da über die verschiedenen Gleichanteile ein anderer Arbeitspunkt an der Kennlinie erreicht wird.

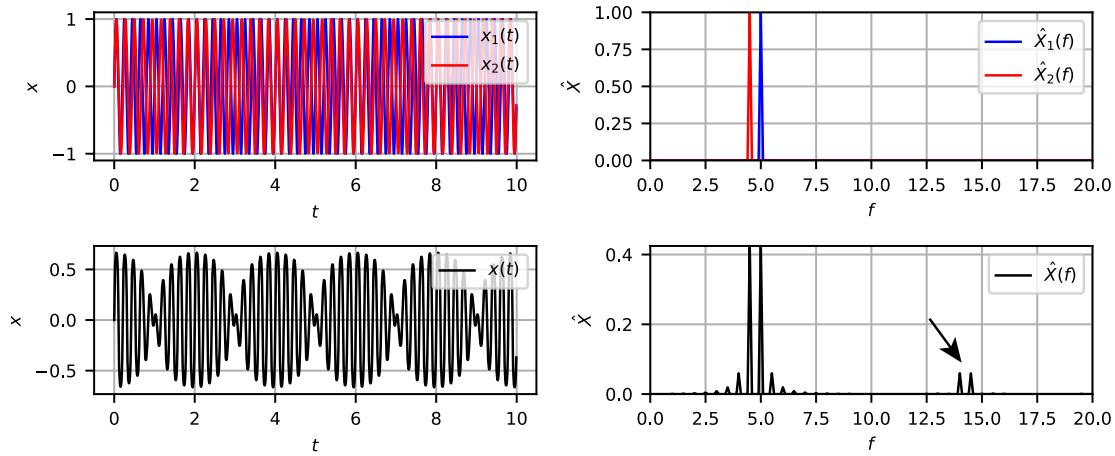


Abbildung 3.47 Intermodulation durch Signaladdition und Verzerrung mit nichtlinear dämpfender Kennlinie ohne Gleichanteil

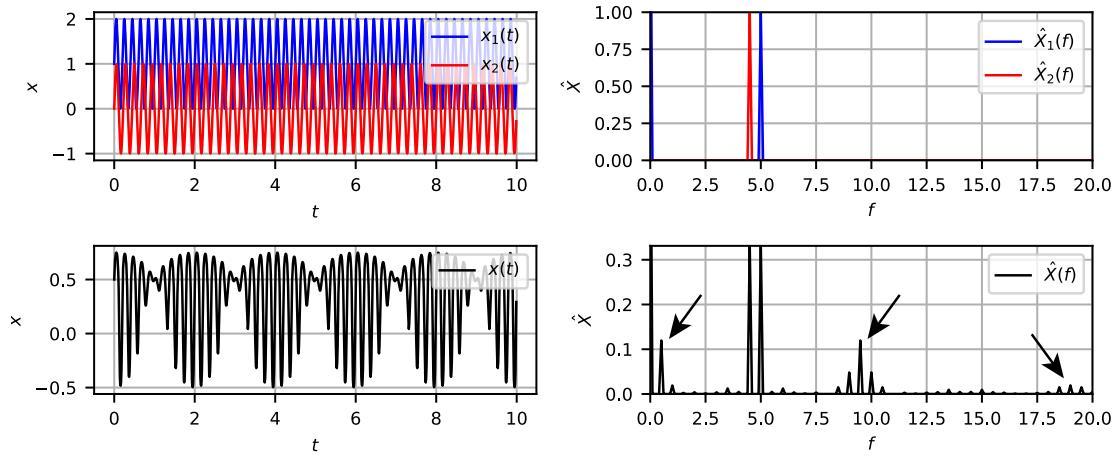


Abbildung 3.48 Intermodulation durch Signaladdition und Verzerrung mit nichtlinear dämpfender Kennlinie und verschobenem Arbeitspunkt durch Gleichanteil

Je nach nichtlinearem Übertragungsverhalten (Kennlinie) und den Gleichanteilen in den Ursprungsfrequenzen f_1 und f_2 können die Intermodulationsprodukte hinsichtlich Frequenz und Amplitude im resultierenden vermischten Spektrum also völlig unterschiedlich ausgeprägt sein, trotz identischer Eingangsfrequenzen.

Merke: In den betrachteten realen mechanischen Systemen kommt es potentiell am ehesten zu einer additiven Überlagerungen von Signalen mit einer anschließenden nichtlinearen Verzerrung am Übertragungselement. Dabei sind jegliche nichtlineare Übertragungsfunktionen möglich. Alle Varianten führen zur Verzerrung des Eingangsspektrums, wodurch ein völlig neues, aber spezifisches Spektrum, am jeweiligen System-Ausgang entstehen kann.

4 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht zu den wichtigsten Anknüpfungspunkten dieser Arbeit zum Stand der Forschung und Technik. Eine unmittelbare Abgrenzung zu den einzelnen Studien oder Industrieansätzen erfolgt in der Regel nicht direkt, da die meisten Arbeiten nicht in unmittelbarer Konkurrenz zu dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz stehen. Eine Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zum dargelegten wissenschaftlichen und industriellen Diskurs bzgl. der Themenbereiche in Kapitel 4.1, 4.2 und 4.3 wird zusammenfassend in Kapitel 4.5 (S.102) separat durchgeführt.

Darüber hinaus werden in 4.4 Einzeluntersuchungen zu den für diese Arbeit relevantesten Prozessstörungen und Phänomenen erläutert. Die Auflistung und die Erläuterungen zu den Arbeiten dienen als allgemeiner Nachweis über die Existenz etwaiger Störungen in der Prozesskette und als konkreter Verweis auf angrenzende bzw. weiterführende Fachliteratur zu den spezifischen Aspekten.

4.1 Digitale Vernetzung der Wertschöpfungskette

Der seit 2011 auf der Hannover Messe öffentlich geprägte Begriff *Industrie 4.0* beschreibt die sogenannte vierte industrielle Revolution auf der Basis cyber-physischer Systeme. Technologische Treiber sind u. a. das Internet der Dinge (IoT), Big Data und Cloud Computing [10]. Sämtliche Industrien arbeiten seitdem an der Realisierung dieses Megatrends, der eine zunehmende Digitalisierung, Vernetzung und Automatisierung von Produktionsprozessen und ganzer Wertschöpfungsketten zum Ziel hat.

In der Druck- und Converting Branche werden derartige Lösungsansätze unter Begriffen wie *Printing 4.0*, *Workflow 4.0*, *Converting 4.0*, *Packaging 4.0* etc. vermarktet. Projekte bzw. Lösungsansätze internationaler und in ihrem Segment marktführende Maschinenhersteller in der Druck und bahnverarbeitenden Industrie sind beispielsweise: [27] [44] [4] [113] [9] [38].

DATTNER und BOHN [12] thematisieren 2018 ein Konzept zur vernetzten Qualitätssicherung in der bahnverarbeitenden Industrie, bei dem ein prozessübergreifender Austausch

von Prozess- und Qualitätsdaten entlang der Wertschöpfungskette skizziert wird. Sie haben dabei u. a. die Schnittstelle zwischen Substratherstellung und der darauf folgenden Druckproduktion hervor. Rollenwicklungsprozesse werden dabei als das hervorstechende verbindende Element entlang der gesamten Prozesskette identifiziert:

„[...] winding or unwinding exists in all process steps and would therefore be an ideal basis for cross-linking all, so far separated and self-sufficient operating, components.“ [12]

Zudem skizzieren Sie konkrete Anwendungen, die den Nutzen für einen entsprechenden Informationsaustausch verdeutlichen, wie z.B.:

„[...] information on the winding quality of the previous winding can be used to operate the winder in the cutting unit according to the communicated conditions to avoid additional waste.“ [12]

Als konkreter Lösungsansatz wird eine digitale Datenkommunikationsschnittstelle vorgeschlagen, bei der die in jedem Teilprozess erfassten Prozess- und Qualitätsdaten beispielsweise über einen an der Rollen-Hülse angebrachten RFID-Chip entlang der Wertschöpfungskette ein- und auslesbar gemacht und laufmetersynchron zugeordnet werden sollen. Die eigentlichen Daten werden auf einem übergeordneten Datensystem, z.B. in einer Cloud, gespeichert. *Ein solcher Ansatz benötigt eine entsprechende Infrastruktur, die erst einmal nicht existiert.*

Ein im Rahmen der Initiative Converting 4.0 entstandenes und auf der K-2019 vorgestelltes Gemeinschaftsprojekt von Windmöller & Hölscher KG, Kampf- Schneid und Wickeltechnik GmbH & Co. KG und der Brückner Group GmbH mit dem Namen „Digitales Rollenprotokoll - (DRP)“ arbeitet an einer Realisierung eines zu [12] ähnlich gearteten Ansatzes [37]. Konkret sollen vom Rohmaterial einer Kunststofffolie bis hin zum verkaufsfertigen Endprodukt alle wichtigen Daten jedes Produktionsschrittes gesammelt und über Maschinen- und Herstellergrenzen hinweg, mittels spezieller Identifikationsnummern, ausgetauscht werden. Die Technologie soll eine Rückverfolgbarkeit im Reklamationsfall, eine vorausschauende automatisierte Maschineneinstellung oder auch die Optimierung von Einstellparametern ermöglichen. Stillstandszeiten, Ausschuss und dadurch Produktionskosten sollen durch diesen Ansatz reduziert werden.

Inzwischen ist das Projekt in der digitalen Datenplattform *R-Cycle* [75] integriert, die durch ein breites Spektrum relevanter Protagonisten der Kunststoffindustrie unterstützt wird. Das Konzept ist dort als „Digitaler Produkt Pass - (DPP)“ realisiert. Über die Dateninfrastruktur können entlang der Wertschöpfungskette Recycling relevante Daten, Produktdaten, aber auch Prozessdaten gespeichert werden und dabei vom Endprodukt bis

zur Substratherstellung zugeordnet werden. Die Datenplattform zielt dabei klar abgegrenzt auf eine Vernetzung der Wertschöpfungskette der Kunststoffindustrie ab. Ein vergleichbar Lösungsansatz im Bereich Faser basierter Materialien existiert nach bestem Wissen des Autors nicht.

Merke: Im Kern geht es in allen zuvor genannten Ansätzen darum, einen prozessübergreifenden Austausch digitaler Produktionsdaten, entlang unterschiedlicher Teilgebiete der Wertschöpfungskette (je nach Geschäftsmodell) zu ermöglichen. Dafür werden unterschiedlichste Daten aus Maschinen und anderen Datensystemen gesammelt und in einer übergeordneten Plattform für unterschiedliche Anwendungen wie die Prozesssteuerung, aber auch für die Rückwirkende Prozessanalyse bereitgestellt. In allen Ansätzen fallen riesige Datenmengen an, die bezüglich ihrer Relevanz für Qualitätsprobleme im Druck mehr oder weniger ungefiltert sind und schließlich ausgewertet werden können bzw. müssen, was zu entsprechenden Herausforderungen führt (siehe 2.3).

KARLOVITZ [42] beschreibt 2017 in einer rezensierenden Studie zum Thema „Big Data in der Druck- und Papierindustrie“ ein Problem, das rein durch sammeln und korrelieren von Prozess- und Qualitätsdaten entlang der Wertschöpfungskette nicht direkt gelöst wird. In der Druck- und Papierherstellungsindustrie bestehe nämlich eine gewisse Unsicherheit darüber, welche Hauptursachen in der Praxis zu übermäßigen Variationen in Farbdrucken führen und damit zu einer unzureichenden Gesamtdruckqualität, Kundenbeschwerden und erheblichen wirtschaftlichen Verlusten führen. Sie resultiert nach seiner Einschätzung aus einem mangelndem umfassenden Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Papier, Druckmaschinen, Tinte und anderen Komponenten des Druckprozesses. Eine Identifizierung wirtschaftlich tragfähiger Methoden zur Optimierung von Papierherstellungs- und Druckprozessen gestalte sich daher oftmals schwierig. Seine Beobachtung trifft im weitesten Sinne auch auf die Problemstellung der vorliegenden Arbeit im Bereich Bahnlauf- und Registerschwankungen im Verpackungstiefdruck zu.

Merke: Trotz oder sogar gerade weil die Industrie einen digitalen Ansatz zur Vernetzung der Prozesskette verfolgt, welcher im besten Fall Korrelationen zwischen den erhobenen Daten zulässt, sind Grundlagenuntersuchungen, die die Wirkzusammenhänge zwischen Auswirkung im Druckprozess und deren Ursachen im Gesamtprozess kausal nachweisen können, äußerst relevant. Für faserbasierter Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungsketten sind keine konkreten Ansätze oder Projekte zur Vernetzung der in der Regel örtlich und wirtschaftlich weit voneinander entfernten Einzelprozesse bekannt, die im Kontext der Forschungsfrage (siehe 2.2) hilfreich wären.

4.2 Materialbahn oder Rolle als materieller analoger Informationsträger

Ähnlich wie DATTNER und BOHN in [12] beschreiben, gibt auch ROISUM [78] 1997 an, dass eine Rolle und die darauf gewickelte Bahn, die voneinander stark abgetrennten Prozesse innerhalb einer Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette miteinander verbindet. Er stellt darüber hinaus jedoch fest, dass nicht nur das Material von einem Prozess in den nächsten gegeben wird, sondern auch die Auswirkungen von Prozessschwankungen, die die Papierbahn oder die Rolle in den einzelnen Subprozessen erfahren hat. Diese *analogen* Informationen sind somit physisch in der Materialbahn bzw. in der Rolle gespeichert, ähnlich wie bei einem Rekorder. Im Wickel zeigen sich die Störungen teilweise als charakteristische geometrische Abweichungen relativ zu einem perfekt zylindrischen Wickel. Als wichtigste Methodik zur Identifikation der Merkmale hebt er die visuelle Betrachtung der fertig gewickelten Rolle hervor. Eine messtechnische Identifizierung der charakteristischen Effekte in ihrer Auswirkung auf den Druckprozess wird nicht thematisiert.

„Web or winder defects often leave a visible record of themselves in the wound roll that can be read much like the rings of a tree. Varying strains in each layer as it is wound will cause changes in geometry that can be observed visually or with simple tools. These cylindricity deviations are a fingerprint of the cause of the defect.[...] Wound rolls record a history of the raw materials they were made of and the machine they were made upon. If we know how to read the record we can troubleshoot the web and winding process.[...] While archaeologists, paleontologists and winder technologists all have specialized tools, visual inspection still remains most important.“ [78]

Er arbeitet seit vielen Jahren an einer Taxonomie für Bahn- und Wickelstörungen [78] 1997 bis [82] 2019.

In [82] geht er u. a. auch auf die Historie in der Wickelstörungsklassifikation ein. In [78] führt er eine Gruppierung von Wickelstörungen ein, die sich auf die Richtung der Abweichung relativ zu einer perfekt zylindrischen Rolle beziehen. Es wird zwischen *radialen*, *lateralen*, *tangentialen* und *diametralen* Störungen des Wickels unterschieden. Die ersten drei Gruppen werden auch in der vorliegenden Arbeit zur Ordnung und Modellierung bekannter rollengeometrischer Wickelphänomene genutzt und im Kontext des methodischen Vorgehens näher erläutert (siehe Kapitel 6.3.3.2).

Außerdem entwickelte er im Laufe der Zeit verschiedene Entscheidungsbäume zur Klassifikation unterschiedlicher rollengeometrischer Wickelphänomene, wie z.B. *Starring*, *Telescoping*, *Rough Roll Edges*, *Loss of Trim*, *Wrinkling and Flatness* (z.B. [82]). Bezuglich

lateraler Abweichungen, die sich insbesondere in der Rollenstirnseite als *Rough Roll Edges* abzeichnen, zeigt er in [104, S.98-102] fünf detaillierte Entscheidungsbäume auf. Sie fragen zum einen den Zeitpunkt im Wickelprozess ab, bei dem die Effekte auftreten (Kern, Außenlagen, Innenlagen oder Zufällig) und zum anderen, was sich bewegt bzw. verändert (Rolle, Bahn bzw. Lage oder Bahnbreite). *In der Bewertungslogik setzen die Entscheidungsbäume voraus, dass der Wickel innerhalb eines Wickelprozesses (Auf- oder Abwicklung) ständig beobachtet wird. Aussagen zu Auswirkungen auf den Bahnlauf z.B. in einer Druckmaschine liefern seine Entscheidungsbäume nicht.*

SMITH bündelt seit 2013 in [104] das jahrzehntelang aufgebaute theoretische und praktische Fachwissen zum Thema Bahnlauf und Wickeldefekte, einiger besonders aktiver Persönlichkeiten im Bereich Web-Handling, Winding und Converting. Er fasst weit über 100 verschiedene Bahnlauf- und Wickelphänomene zu einem Katalog zusammen. Ziel des Katalogs ist u. a. eine über verschiedene Industrien hinweg einheitliche Sprache für die Vielzahl von Bahn- und Rollendefekten zu etablieren. Jedes Phänomen wird dafür in Form eines Steckbriefes kurz beschrieben und es werden potentielle Ursachen und Fehlerbehebungsstrategien aufgeführt. Zu jedem Phänomen wird auf entsprechende Primärquellen verwiesen, die den Effekt jeweils im Detail behandelt haben. Tabelle 4.1 listet eine Auswahl der für die vorliegende Arbeit besonders relevanten Phänomene auf. Neben der in [104] verwendeten ID und der englischen Bezeichnung des Phänomens, wird das (meist) *visuelle* Merkmal in der Rolle oder in der Bahn *sehr verkürzt* aufgeführt. Zudem wird jeder Defekt in die Ordnungsstruktur nach Richtung der Abweichung eingeordnet. Jeder Effekt besitzt durch seine Komplexität in seiner Entstehung eine eigene und teils weit verzweigte Historie an Forschungsarbeiten. Durch die Breite der in dieser Arbeit betrachteten Phänomene kann diese Historie nicht für jeden Effekt im Detail erläutert werden. Die Tabelle dient aus diesem Grund als kompakter Verweis auf den in der Literatur bereits festgehaltenen Stand der Forschung bezüglich dieser konkreten Bahn- und Wickelphänomene.

ID	Name	Merkmal in Rolle oder Bahn	Ursachen	Quellen	Gruppe
RD-10	Core - Eccentric	Hülse nicht zentriert in Rolle	4	0	R
RD-16	Roll - Edge Cracks	Lokale Risse oder Kerben an Rollenstirnseite	9	0	L
RD-17	Roll - Out of Round	Unrunder Wickel, besonders Außenlagen (siehe RD-10)	6	5	R
RD-20	Splice - Offset	CD Offset bei Splice innerhalb einer Fertigrolle	7	3	L
RD-29	Roll - Slack Winding	Radial leicht deformierbarer Wickel (siehe RD-17)	10	0	R
RD-34	Roll - Vibration	Undifferenziert Unregelmäßige Rollenstirnseite	4	3	L, T, R
RD-37	Profile Variation	Ungleichförmige Materialeigenschaften in CD (Flächengewicht, Dicke, Dichte, Spannung, Temperatur, Feuchtigkeit etc.)	2	2	L, D
RD-48	Roll Edge - Slitter Flutter	Undifferenzierte Unregelmäßige Rollenstirnseite	4	1	L
RD-49	Roll Edge - Web Flutter	Konzentrische Ringmuster auf Rollenstirnseite (enger werdend mit ansteigendem Radius)	3	1	L
RD-50	Roll Edge - Slitter Rings	Konzentrische Ringmuster auf Rollenstirnseite (gleichabständig) (siehe SD-1)	5	5	L
RD-53	Edge Offset - Corduroy Edge	Unregelmäßig gerippte Stirnseite	5	4	L
RD-56	Edge Offset - Accel/Decel or Tension Change	Plötzlicher aber glatter CD Offset Ring (häufig in eine bevorzugte CD Richtung)	5	1	L
RD-66	Buckles	Unrunder Wickel im Wickelinneren	10	1	R
WD-6	Baggy Lane	Durchhängender Streifen in MD Richtung auf Bahn (CD Profil)	3	2	T, D
WD-11	Baggy Paper	Nicht gleichmäßiger Bahnzug über die Bahnbreite	5	6	T, D
WD-24	Gauge Bands	CD Profil in Substratdicke oder Feuchtigkeit	6	2	L, D
WD-38	Variable Tensile Modulus	CD/MD Variation des Zugmoduls führt zu unruhigem Bahnlauft in CD/MD	4	0	L
WHD-6	Tension Variations - Too High	Verstärkung von MD und CD Bahnlauftproblemen (und Registerproblemen)	7	0	T
WHD-8	Tension Variations - Oscillating	Periodische Variation der Bahnspannung	6	3	R, T
WHD-11	Web Wander or Offset	Laterale Bahnlauftvariationen in Druckmaschine	5	0	L
SD-1	Cambered Edge	Sinusförmige Abweichung in Bahnkante (siehe SD-12)	5	1	L
SD-8	Scalloped Edge	Unregelmäßige Rollenstirnseite	3	1	L
SD-11	Slitter Picks	Regelmäßig sich wiederholende Einkerbungen in Bahnkante über kompletten Wickel verteilt	2	0	L
SD-12	Slitter Rings	Sinusförmige Bahnkante die sich als konzentrisches Ringmuster auf Rollenstirnseite zeigen (siehe SD-1)	4	3	L

Abbildung 4.1 Ausschnitt einiger für diese Arbeit mehr oder weniger relevanter und in [104] beschriebener Wickelphänomene bzw. Bahnlauftdefekte inkl. Gruppierung nach der Richtung der Abweichung in der Fertigrolle in Anlehnung an [78] (L = Lateral, R = Radial, T = Tangential, D = Diametral)

Merke: Die Substratherstellung, Wicklungsprozesse, Lagerung, Transport und die Bahnlauftdynamik kann zu einer Vielzahl an rollengeometrischen Wickelphänomenen führen, die je nach Art der Abweichung⁴⁰ zu charakteristischen Merkmalen in der Rolle und/oder der Bahn führen. Diese Störungen/Informationen können in nachfolgende Prozesse wie z.B. dem Druckprozess übertragen werden und diesen auf charakteristische Weise stören. Viele der Phänomene

⁴⁰hier nach Richtung der Abweichung gruppiert

sind bzgl. ihrer Merkmale in der Fertigrolle oder in der Bahn und bzgl. ihrer potenziellen Ursachen mehr oder weniger detailliert in der Literatur beschrieben. In der Regel ist die Verursachung komplex und besitzt mehrere potentielle Grundursachen im Prozess, wodurch dementsprechend vielfältige Strategien zur Vermeidung in Frage kommen. Die Merkmale der Störungen sind häufig nur über ihre visuelle Charakteristik in der Fertigrolle dokumentiert. Die Auswirkungen auf den Druckprozess ist für viele der Wickelphänomene nicht systematisch untersucht.

4.3 Zeit-Frequenzanalyse zur Überwachung von Prozessstörungen im Druck

Einige der in Kapitel 4.4 vorgestellten Arbeiten untersuchen Prozessschwankungen im Druck zwar teilweise im Frequenzbereich aber berücksichtigen nicht, dass sich die Schwankungen über die Zeit potentiell auch verändern können. Zeit-Frequenz basierte Prozessdatenanalysen sind in anderen Industrien seit vielen Jahren etabliert. [1][121][85][3, S.747-963]

Im Bereich von Rolle-zu-Rolle Druckprozessen und insbesondere im weiter gefassten Umfeld der Fragestellung dieser Arbeit existieren in der Fachliteratur sehr wenige Nachweise über eine Verwendung der Zeit-Frequenzanalyse. Einige wenige Arbeiten, die eine Form der Zeit-Frequenzanalyse nutzen und der Fragestellung am nächsten kommen, sind nachfolgend aufgeführt.

GAO nutzt 2001 [22] im Rahmen seiner Dissertation zum Thema Schwingungen in Offsetdruckmaschinen Wavelet Transformationen zur Bewertung von Maschinenschwingungen, die beispielsweise an einem Schmitzring eines Plattenzyinders mit Hilfe eines Lasertrianulationssensors erfasst werden.

WANG et al. nutzt 2004 [112] ebenfalls Wavelet Transformationen zur Identifikation von Dublier Ursachen in einer Bogenoffset Maschine direkt an Getriebezahnräder mittels magnetischer Tonabnehmer.

MESSER demonstriert 2015 [55] im Rahmen eines Fachbeitrages im VDD (Verein Deutscher Druckingenieure) die Methodik der Zeit-Frequenzanalyse am Beispiel von Schallmessungen an einem Klavier. Er nutzt die Methodik u. a. in der Lehre. In seinem Aufsatz wird zwar die Wichtigkeit von Schallmessungen im Kontext der Optimierung von Druckmaschinen angesprochen, eine eigene Anwendung der Zeit-Frequenzanalyse im Kontext Druck wird aber nicht aufgezeigt.

ZHANG et al. führen 2021 [119] Untersuchungen von Lagerschäden an einer Bogenoffset Druckmaschine mit Hilfe von Beschleunigungssensoren und Analysen mittels empirischer Wavelet-Transformationen durch.

XU [116] et al. stellen 2022 ein System zur Zustandsüberwachung von Lager in Rolle-zu-Rolle Druckprozessen vor. Die Messsignale von Beschleunigungssensoren werden mittels Wavelet-Transformationen in eine Zeit-Frequenz Repräsentation überführt und können dadurch charakteristische Störungsmerkmale in unterschiedlichen Skalierungsfaktoren als Bild herausarbeiten. Die Interpretation wird schließlich durch ein auf wenige Beispiele trainiertes neuronales Netz automatisiert durchgeführt.

Merke: Es sind keine Arbeiten bekannt, die eine Variante⁴¹ der Zeit-Frequenzanalyse zur Untersuchung des Bahnlaufs und den damit einhergehenden Registerschwankungen in einem Rolle-zu-Rolle Druckverfahren im Sinne der Fragestellung dieser Arbeit nutzt. Dementsprechend sind auch die darin enthaltenen Merkmale, Muster bzw. Informationen bisher nicht bekannt.

4.4 Einzeluntersuchungen relevanter Prozessstörungen

Ergänzend zu den in Kapitel 4.2 erläuterten Bemühungen einer Strukturierung von Bahnlaufstörungen und rollengeometrischen Wickelphänomenen existiert eine große Vielzahl an Einzeluntersuchungen zu spezifischen Aspekten verschiedenster Prozessstörungen entlang der gesamten Prozesskette⁴², die so oder so ähnlich potentiell auch auf die hier betrachtete Rolle-zu-Rolle Prozesskette zutreffen könnten. Diese enorme Vielfalt kann an dieser Stelle keinesfalls abgebildet werden. Genau dieses Dilemma bzgl. der Unklarheit über die Relevanz der einzelnen Prozessstörungen in den Teilprozessen für den Druckprozess, ist bereits einleitend in Kapitel 2.3 beschrieben⁴³ und soll mit dieser Arbeit schließlich (auch) adressiert werden. Nachfolgend werden daher exemplarische Untersuchungen aufgeführt, die Aspekte aufgreifen, welche sich im Laufe der Arbeit als besonders relevant in Bezug auf die konkrete Fallstudie herausgestellt haben. Die Literaturverweise dienen damit zum einen als allgemeiner Nachweis über die potentielle Existenz einzelner Phänomene in den jeweiligen Prozessschritten und zum anderen als konkreter Verweis auf tiefergehende Erklärungen zu den Grundursachen oder zugrundeliegenden Mechanismen an sich. Dies

⁴¹Auch nicht die abgewandelte Form als Orts-Frequenzanalyse, die in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagen wird.

⁴²An dieser Stelle sei auf die Internetbibliothek [80] verwiesen, mit über 4000 Fachartikeln zu Themen aus dem Bereich Web-Handling, Winding, Converting und artverwandten Bereichen, sowie auf die Fachbücher [84] und [23].

⁴³insbesondere Herausforderung 2 und 4

kann in der Tiefe nicht für jede einzelne identifizierte Bahnlauf- bzw. Registerstörung im Druck geleistet werden und ist mit der vorliegenden Arbeit auch nicht beabsichtigt (siehe Zielsetzung 2.4).⁴⁴

4.4.1 Bahnkantenvariationen durch Störungen in der Schneidpartie

Das Zusammenspiel und die verschiedenen Wechselwirkungen der Einflüsse im Schneidprozess allgemein werden beispielsweise durch SCHABLE in 2003 [90], WOOD in 2007 [114] und CRAIG in 2015 [11] beschrieben. Bei nicht idealer Einrichtung der Messer oder etwaigen Störungen im Schneidprozess kann die Schnittqualität erheblich beeinflusst werden.

SCHABLE geht 1992 [88] im Detail auf den Einfluss der Seitenkraft der Messer auf die Schnittqualität ein. In [86] beschreibt er den Zusammenhang zwischen radialer und axialer Messervibration und der damit einhergehenden Messerabnutzung. Untermesservibrationen mit axialem Spiel seien die häufigsten Ursache für äquidistante konzentrische Ringmuster auf der Rollenstirnseite (RD-50) und weisen auf einen schlechten Zustand bzgl. der Messerhalterung und/oder auf Probleme mit Grundeinstellungen oder Abnutzung des Messers hin. Radiale Abweichungen der Messer beeinflussen zudem die Überlappung und damit auch den Schnittpunkt in MD. Probleme durch Vibrationen an Messer oder Messerhalter werden konstruktionsseitig durch entsprechende Messerhalterungen adressiert [90].

Der Einfluss der Messergeschwindigkeit relativ zur Bahngeschwindigkeit wird ausführlich durch SCHABLE 1992 in [87] und von CRAIG 2015 in [11] erörtert. Beide weisen darauf hin, dass eine exakte Steuerung des Geschwindigkeitsprofils der Messerrotation im Wicklungsprozess einer Rolle im Verhältnis zur Bahngeschwindigkeit (Overspeed) sehr wichtig ist. Insbesondere wenn sich Bahn- und Messergeschwindigkeit annähern, kommt es vermehrt zu BahnrisSEN und anderen Problemen mit der Schnittqualität (siehe Abbildung 3.8 (S.26)). In [87] zeigt SCHABLE passend dazu eine trigonometrische Methode zur Berechnung des erforderlichen Overspeeds.

Einige Grundursachen, die zur Bildung diverser Ringmuster (ID-50, RD-49, SD-1, SD-12) auf der Rollenstirnseite durch verschiedene geartete Störungen im Rollenwickler führen, erläutert SCHABLE 1993 in [89]. Neben typischen Vibrationen an Messer oder Messerhalterungen als Hauptursache für äquidistante konzentrische Ringmuster (SD-12 bzw. RD-50), geht er auch auf den Einfluss von Breitstreckwalzen in Maschinenrollen in Kombination mit einlaufenden Bahnspannungsvariationen ein, die ganz verschiedene Ursachen haben

⁴⁴Es geht in der vorliegenden Arbeit nicht um die Untersuchung der Grundursachen selbst, sondern um den rückwirkenden Nachweis darüber, welche und auf welche Weise sich einige Prozessstörungen bis in den Druck übertragen und auswirken.

können. Diese Bahnlauftypen führen typischerweise zu Phänomenen wie RD-48 und RD-49. Abbildung 4.2 zeigt den Rollenwicklungsprozess inkl. Schneidpartie und Breitstreckwalze von oben mit typischen Prozessvariationen, die zu lateralen Wickelphänomenen führen können.

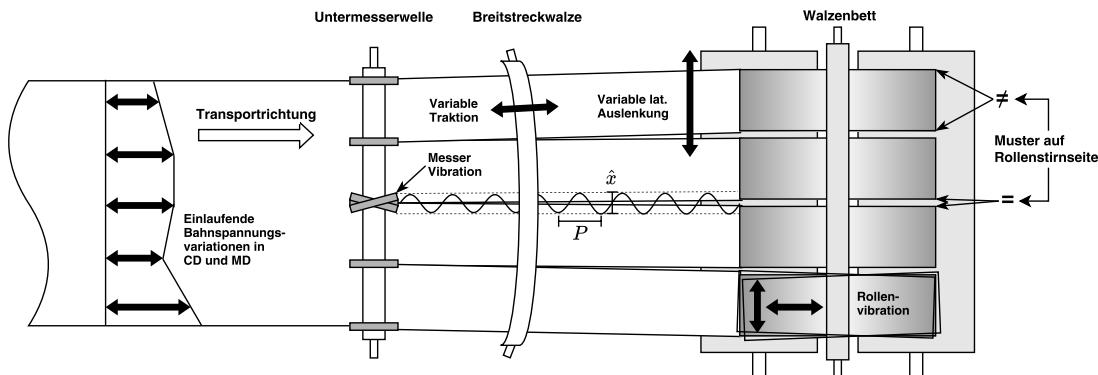


Abbildung 4.2 Entstehung von lateralen Abweichungen im Rollenwickler in Anlehnung an [89]

Insbesondere Untermesservibrationen erzeugen charakteristische sinusförmige Bahnkanten, wobei die Amplitude (\hat{x}) von der axialen Abweichung abhängt und die Periodenlänge (P) vom Messerdurchmesser und dem Overspeed. Variationen in der einlaufenden Bahnspannung können die Schnittlinie durch die am Breitstreckelement induzierte variierende Seitenbewegung der Einzelbahnen charakteristisch abweichen lassen. Die Einzelbahnen werden dann im Rhythmus der Bahnspannungsvariation leicht gekrümmmt geschnitten (SD-1). Dieser Effekt tritt insbesondere bei einfachen Breitstreckwalzen auf. Im Gegensatz zu den Untermesservibrationen, die in den gegenüberliegenden Rollenstirnseiten zu identisch gespiegelte Ringmustern führen, werden durch periodische Bahnspannungsschwankungen mehr oder weniger alle Einzelbahnen beeinflusst. Außenrollen werden in der Tendenz jedoch stärker abgelenkt als die innen liegenden Rollen. Die so erzeugten Ringmuster treten in der Tendenz also an Außenrollen häufiger bzw. stärker auf. Beispielhafte Ursachen für periodisch einlaufende Bahnspannungsvariationen sind z.B. unrunde Rollen im Abwickler (RD-10, RD-17, RD-49) oder MD und ggf. CD variable Materialeigenschaften (WD-6, WHD-8, WD-38, RD-48).

In der Literatur werden häufig nur die Einflüsse der Schneidpartie selbst auf die Bahn untersucht. In wieweit sich Prozessschwankungen vor oder nach der Schneidpartie auf diese auswirken hängt von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise Bahngeschwindigkeit, Bahnspannung, Friction, Umschlingungswinkel, Walzenabstände oder Art der Breitstreckwalze. Die Phänomene RD-48 und RD-49 umfassen genau solche Effekte. Die eigentliche Ursache

für Bahnkantenvariationen liegt in diesen Fällen nicht an einer gestörten Schneidpartie selbst, sondern sind die Folge eines nicht idealen Bahnlaufs durch die Schneidpartie.

Ergänzend zu den in [89] aufgeführten Ursachen und Zusammenhängen wird in Abbildung 4.2 daher zusätzlich auch die Vibration einer Fertigrolle im Walzenbett (siehe 4.4.2) als potentielle Wickelprozessstörung aufgeführt, die ebenfalls zur Ablenkung der Einzelbahnen führen kann und demzufolge auch Bahnspannungsvariationen induziert. Diese können dann potentiell auch entgegen der Transportrichtung wirken. Möglicherweise sogar bis zurück zur Schneidpartie. Konkrete Untersuchungen zu dieser Wechselwirkung existieren in der Literatur nicht.⁴⁵

PFEIFFER berechnet 1989 [72] mithilfe eines finiten Wickelmodells die charakteristischen Ringstrukturen in gewickelten Rollen bzgl. periodischer Abweichungen in Bahnkanten. Er zeigt damit, dass über die Struktur der Ringmuster wertvolle Informationen, wie die Periodizität der Störursache, die Lagendicke im Wickel oder die Richtung der Wicklung rekonstruiert werden kann. *Er berechnet die laterale Struktur der Rollenstirnseite lediglich für einzelne Winkel.*⁴⁶

ROISUM ordnet in [104, S.93-97] die Bedeutung lateraler Abweichungen, die zu charakteristischen Muster auf der Rollenstirnseite führen, für nachfolgende Prozesse wie dem Druckprozess ein. Die Abweichungen auf der Rollenstirnseite seien zwar auf den ersten Blick nur kosmetischer Natur, sind aber in Wirklichkeit für einige Druckanwendungen durchaus kritisch. Insbesondere dann, wenn das Druckbild zur Bahnkante ausgerichtet wird (z.B. Zigarettenenschachtel Produktion). Allgemein sei es sehr schwer eine Bahn mit ungeraden Bahnkanten durch mehrere Prozesse akkurat zu steuern. Je nach Schnelligkeit, Stärke und Häufigkeit habe ein schlechter seitlicher Bahnlauf, der auch durch nicht ideale Bahnkanten definiert oder induziert werden könne, zur Folge, dass die Prozessgeschwindigkeit reduziert werden muss, sodass Bahnlauf- bzw. Registerregelungssysteme diese ausreichend gut ausregeln können. Eine Reduzierung der Verarbeitungsgeschwindigkeit aufgrund zu großer Variationen in den Bahnkanten sei insgesamt ein nicht hinzunehmender Qualitätsmangel einer Rolle. *Zum einen passt sein angesprochener Anwendungsfall (Zigarettenenschachtel Produktion) exakt auf das betrachtete Fallbeispiel dieser Arbeit und zum anderen bestätigt seine Einordnung die Relevanz einer gewissen Bahnkantenqualität im Zusammenhang mit einer zufriedenstellenden Passlage des Druckbildes.*⁴⁷

⁴⁵Dieser Aspekt wird in der vorliegenden Arbeit im Anhang A.3 an einem Klinikroller experimentell nachgewiesen.

⁴⁶Das in der vorliegenden Arbeit aufgestellte finite Wickelmodell, visualisiert die Stirnseite des kompletten Wickels, siehe Kapitel 6.3.3.1 (S.148)

⁴⁷Dieser Aspekt wird in Kapitel 8.4.1.1 im Kontext einiger identifizierter Bahnkantenstörungen aufgegriffen.

WALKER führt in [104] (WHD-11) laterale Variationen in der Bahnkante als eine von fünf Kernursachen für seitliche Bahnlauftörungen in Druckmaschinen auf, die dadurch potentiell auch relevant für Registerstörungen sind (siehe S.97).

Merke: Die Bahngeometrie kann durch vielfältige Variationen im Bahnlauft des Rollenwicklers sowohl vor, als auch nach der Schneidpartie oder durch Störungen in der Schneidpartie selbst beeinflusst werden.

4.4.2 Vibrationen der Fertigrolle im Tragwalzenroller

GOOD [23, S.283-287] und SMITH [104, RD-34] beschreiben, unterschiedliche Effekte, die zu starken Vibrationen während des Wickelprozesses in Doppeltragwalzenrollern führen können. Die Ursachen für die Vibrationen im Tragwalzenroller sind meist komplex und hängen i.d.R. miteinander zusammen. Wichtig für diese Arbeit ist, dass Vibrationen im Walzenbett zu radialen Deformationen des Wickels während des Wickelprozesses führen, die potentiell Bahnspannungsschwankungen im Maschinenroller induzieren (siehe Andeutung in Abbildung 4.2). Im schlimmsten Fall führen die Rollenvibrationen zum Aufschaukeln und Verkanten der Rolle mit benachbarten Rollen und schließlich zum Auswurf aus dem Walzenbett.

Das Phänomen des Rollenschlags im Walzenbett beschreibt OLSHANSKY 1996 in [60] im Detail. Häufig wird der Rollenschlag durch eine initiale kleine Unrundheit des Wickels im Walzenbett induziert. Die Neigung zur dauerhaften Deformation der Rolle ist dabei stark von den Frictionseigenschaften des Papiers abhängig. Je größer die Friction der Papierlagen, desto weniger gut können die Lagen gegeneinander gleiten, und die Deformation kann sich schlechter durch die inneren Kräfte im Wickel zurückbilden. Rau Papiere neigen daher in der Tendenz stärker zu Vibrationsanregung als glatte, siehe Abbildung 4.3.

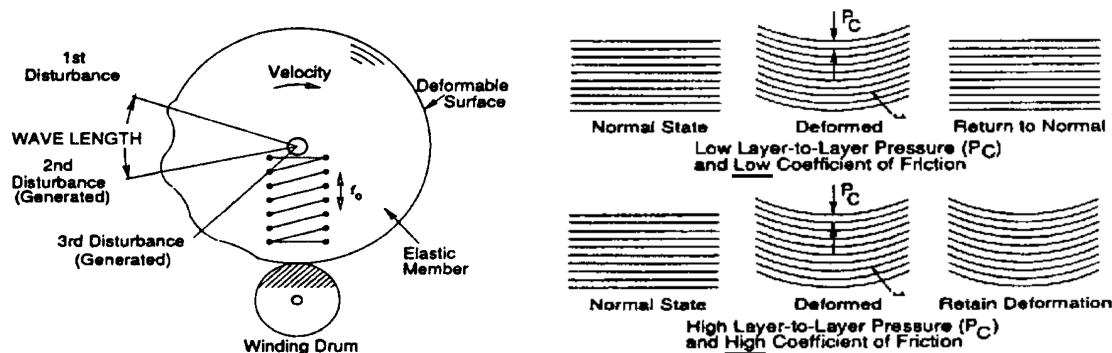


Abbildung 4.3 Mechanismus der Rollendeformation im Tragwalzenroller [60]

JORKAMA widmete sich in einer Reihe von Arbeiten [34] 1997 [35] 2003 und [36] 2005, mit Hilfe von Simulationen, ebenfalls dem Phänomen von Vibrationen in Doppeltragwalzenrollern. Darüber hinaus diskutiert er 2011 in [33] einige praktische Vorschläge zur Vermeidung von Vibrationen. Ein besonders kritischer Aspekt für die Entstehung der Vibrationen ist die Tatsache, dass die Rotationsfrequenzen des Wickels (Anregungsfrequenzen) und die Eigenfrequenzen der Systemkomponenten, insbesondere die der Tragwalzen, sich innerhalb eines Rollenwicklungszyklus irgendwann stets kreuzen und es so zu Resonanz kommen kann. Abbildung 4.4 zeigt die Entstehung von Resonanz zwischen den Tragwalzen und der 3. Harmonischen der Rollendrehfrequenz gegen Ende des Rollenwicklungszyklus.

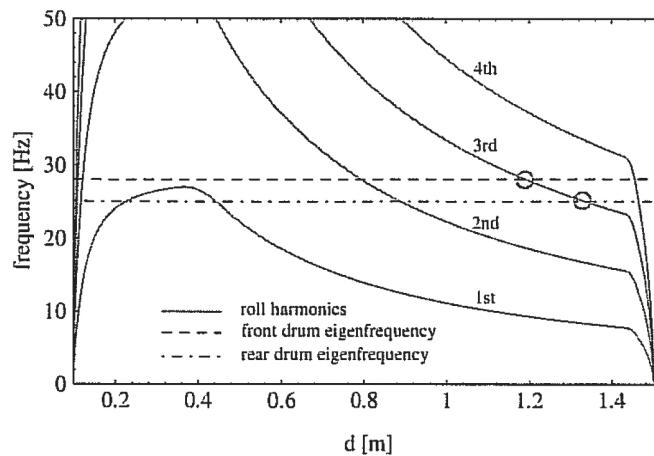


Abbildung 4.4 Resonanzfall (Kreise) durch Überkreuzung von Rollendrehfrequenz Harmonischen und konstante Eigenfrequenzen der beiden Tragwalzen [34]

Die Obertöne der Rollendrehfrequenz hängen direkt mit der Anzahl an Seiten auf dem Umfang bzw. der Häufigkeit des Hüpfens der Rolle pro Umdrehung zusammen. Außerdem treten Resonanzfälle in seiner Studie typischerweise bei Rollendurchmesser $> 1\text{ m}$ auf, da die Rolle dann eine entsprechend große Masse besitzt und das System besonders stark anregen kann. In [34] zeigt er außerdem, dass sich die Federeigenschaften des Wickels, durch die sich ändernde Geometrie und Kraft im Nip über den Rollenzyklus, signifikant verändert.

In den Studien [34] und [33] diskutiert er zwei typische Vermeidungsstrategien zur Reduzierung von derartigen Resonanzfällen, die im wesentlichen auf eine temporäre Veränderung der Maschinengeschwindigkeit und/oder einer temporären Veränderung der Lagersteifigkeit beruht. Beide Strategien zielen auf eine Minimierung der Zeitspanne, in der Anregungsfrequenzen und Eigenfrequenzen der Systemkomponenten identisch sind, was schließlich zur Reduzierung von Resonanzfällen beiträgt. *Gänzlich vermeiden lassen sich die Störungen in der Praxis allerdings nicht immer.*

ROISUM veröffentlicht 2015 [81] erneut, bereits ältere aber didaktisch sehr gut aufbereitete Animationen, die typische Vibrationsmoden der Rolle und der wichtigsten Komponenten im Doppeltragwalzenroller zeigen. Typische Moden sind das Vor- und Zurückhüpfen der Rolle zwischen den beiden Tragwalzen symmetrisch und/oder wechselseitig, wodurch im letzteren Fall potentiell auch Seitenbewegungen in den Bahnlauf verursacht werden. Diese Moden werden auch von GOOD [S.283-287][23] und OLSHANSKY [60] beschrieben.⁴⁸

ROISUM hebt 2009 in [79] hervor, dass die Eigenschaften des Wickels selbst häufig im Zentrum der Vibrationsprobleme stehen und nicht einfach zu Gunsten einer Vibrationsverminderung änderbar sind. Die Eigenfrequenzen von Maschinenteilen, Gestell und Fundamenten bleiben während des Wickelprozesses in der Regel konstant und stehen als Prozessparameter zur Vermeidung von Schwingungen also nicht zur Verfügung. Die Eigenschaften der Rolle selbst verändern sich während eines Wicklungszyklus dagegen stark und stellen eine besondere Herausforderung bzgl. Vibrationsanregung dar. Versuche Resonanzfälle zu vermeiden sind insbesondere deshalb schwierig, da die Rolle ein sehr breites Frequenzspektrum durchläuft, was darüber hinaus durch die Möglichkeit zur Ausbildung von Obertönen durch Deformationen enorm erweitert wird.

„What makes this problem so difficult, i.e. nearly impossible to do much with, is that the things that make the most difference are outside of practical control. The driving force is wound roll. The mass in motion is the wound roll. The most flexible relevant spring in the system is the spring rate of the wound roll against the drum. None of these are easily changed. Also, avoiding resonance is usually futile because, as we saw, it changes frequency. Furthermore, even if you could avoid a 1x frequency, the roll is free to form 2 bumps (oval shaped), 3 bumps and so on.“ [79]

Er gibt damit eine klare Bewertung darüber ab, dass diese Störungen trotz diverser Gegenmaßnahmen in der Praxis immer auftreten können. Fertigrollenvibrationen im Walzenbett stellen für diese Arbeit daher eine potentiell relevante Störursache dar.

ZWART entwickelt 2009 in einer Fallstudie [123] Problemlösungsstrategien auf Basis von Vibrationsmodellierungen. Dabei kommen auch Zeit-Frequenzanalysen zur Darstellung der variablen Frequenzverläufe im Rollenwickler zum Einsatz. In einigen Fällen werden die Vibratoren durch Resonanzfälle zwischen bestimmten Walzen im Rollenschneider und der Drehfrequenzen des Wickels ausgelöst. Häufig kann dieses Problem durch Reduzierung der Geschwindigkeit aufgelöst werden. Bei einem Fall konnte nachgewiesen werden, dass eine nicht ideale Kalanderwalze zu periodischen Dickenschwankungen in der Bahn führt

⁴⁸Dieser Aspekt wird in der vorliegenden Arbeit im Anhang A.3 an einem Klinikroller exemplarisch untersucht.

und es in Folge dessen immer dann zu einer Exzentrizität im Wickel kommt, wenn dieser mit dem Durchmesser der Kalanderwalze übereinstimmt.⁴⁹ In einer weiteren Studie in 2003 [124] beschreibt er dies im Detail und geht auch darauf ein, wie sich die Vibrat ionen auf die verschiedenen Rollen in einem Rollenset auswirken. In einer Fallstudie aus 2020 [122] konnte er mit Hilfe von Vibrationsmessungen direkt an den Walzen und Zeit-Frequenzanalysen eine hintere Tragwalze als Hauptursache für Schwingungsprobleme im Walzenbett identifizieren. *Mit seinen Untersuchungen zeigt er wie die Störungen in einer Zeit-Frequenzdarstellung aussehen und kann sie aufgrund ihrer Charakteristik teilweise auf konkrete Maschinenteile zurückführen.*

VIRTANEN beschäftigte sich in seiner Dissertation 2006 [109] mit einer auf Maschinen-daten basierten Diagnose von Wickelstörungen, die durch Vibrat ionen im Wickelprozess verursacht werden und stellt darüber hinaus verschiedene Dämpfungsmaßnahmen zur Reduzierung von Schwingungen vor.

Hersteller von Tragwalzenrollern bieten inzwischen eigene IoT basierte Fehlerdiagnosesysteme an, auch in Bezug auf Vibrat ionen, wie beispielsweise [108]. Hardwareseitig wird das Problem von Rollenvibrat ionen durch verschiedene Maßnahmen wie ein entsprechendes schwingungssarmes Konstruktionsdesign, vibrationsdämpfende Maßnahmen an Druckwalzen und Hülsenführungsköpfen und adaptierbare Lagersteifigkeit adressiert. Außerdem werden Tragwalzen typischerweise mit schwingungsdämpfenden Walzenbezügen ausgestattet um den Rollenschlag im Walzenbett zu verringern. [110] *Gänzlich verschwunden ist die Vibrationsproblematik in der Praxis deswegen allerdings nicht.*

Merke: Trotz allgemeiner Bekanntheit und zahlreichen Gegenmaßnahmen sind Vibrat ionen der Rolle im Walzenbett ein nicht vollständig gelöstes Phänomen und treten daher in der Praxis immer wieder auf. Die Vibrat ionen wirken sich nicht nur auf die Komponenten im Tragwalzenroller und den Wickel selbst aus (RD-34, RD-53), sondern auch auf den Wickelprozess insgesamt. Eine Auswirkung der Vibrat ionen auf den Bahnlauf entgegen der Laufrichtung, z.B. bis zurück auf die Schneidpartie, kann nicht ausgeschlossen werden.⁵⁰

4.4.3 Unrundheit des Rollenwickels

Radiale Unrundheit der Rollenwickel ist nicht nur ein zentrales Problem bei der Anregung von Vibrat ionen im Walzenbett (siehe Kapitel 4.4.2), sondern stellt auch für nachgelagerte

⁴⁹Dieser Aspekt wird in den modellierten Wickelstörungen in Kapitel 7.1.3 (S.160) aufgegriffen.

⁵⁰Rollenvibrat ionen im Walzenbett werden daher als potentielle Ursache für Probleme im Schneidprozess in Abbildung 4.2 (S.84) mit aufgeführt und sind daher potentiell auch für die Bahnkantenqualität relevant.

Prozesse wie der Druckproduktion eine Herausforderung dar. In Druckprozessen regen sie periodische Bahnspannungsschwankungen (WHD-8) an, also Störungen in MD. Bei nicht idealer Kompensation durch Tänzersysteme und seitlicher Bahnlaufregelung (WGS) kann dies zu Auswirkungen in der Registerqualität führen. Bei seitlicher Ablenkung der Bahn durch ein CD-Profil im Material oder Nichtparallelität von Walzen etc. kann es zusätzlich auch zu CD-Störungen im Bahnlauf und entsprechend zu CD-Registerstörungen kommen.

Die Ursachen für Rollenunrundheit sind vielfältig. ZWART zeigt in [123] und [124], dass z.B. periodische Materialdickenschwankungen in der Bahn bei Übereinstimmung mit dem Rollenumfang zu exzentrischen Rollen führen (RD-10).

SMITH beschreibt in [104, RD-10] den Mechanismus von nicht ideal rotierenden Hülsenführungsköpfen, die in ihrer Drehzahl fest mit der Rollendrehzahl gekoppelt sind und den Wickel im Walzenbett im Rythmus der Rollendrehfrequenz ablenken, wodurch ebenfalls exzentrische Rollen entstehen können. Insbesondere Randrollen seien davon besonders betroffen, da die Führungsköpfe nur dort angreifen.

ROISUM führt 1997 in [78] einige Ursachen für nachträgliche radiale Deformationen des Wickels durch Lagerungs- oder Transportprozesse auf (RD-17) und geht dabei auch auf Strategien zur Vermeidung derartiger Deformationen ein. Sehr schwere Mutterrollen, die vollständig auf der Stahlachse gelagert werden, deformieren sich beispielsweise schon allein durch den Einfluss der Gravitation. Langsames Rotieren der Mutterrolle vergleichmäßigt die Krafteinwirkung. Beim Transport von Fertigrollen helfen spezielle Klemmgabeln bei Gabelstaplern zur Reduzierung der radialen Klemmkräfte. Das Absetzen eines Wickels auf dem Umfang ist in vielen Fällen besonders problematisch. Die Stärke einer Krafteinwirkung zu reduzieren sei i.d.R. besser als die Dauer der Krafteinwirkung. Die Form der Deformation sei zudem eine Art Fingerabdruck der Ursache, die es ermöglicht entsprechende Lösungsstrategien zur Vermeidung der Deformation zu finden. Einer der besten Strategien zur Vermeidung radialer Deformierung sei es, Rollen möglichst hart zu wickeln, wodurch die Rolle robust gegenüber äußerer Krafteinwirkungen wird.⁵¹

MC DONALD modelliert und testet in diesem Kontext 2005 in [53] das *nichtlineare Kraft-Verformungsverhalten von Rollenwickel in radialer Richtung*, um zu untersuchen, welche Wickelhärte eine Rolle besitzen sollte, um sie möglichst robust gegenüber dauerhafter Deformation durch radiale Krafteinwirkung in nachgelagerten Prozessen wie dem Transport, der Lagerung und dem Rollenhandling in Druckereien oder Verarbeitern zu machen.

⁵¹Gegenteilig zu RD-29

LEE zeigt 1991 [46], dass bei zu strammer Wicklung auch die Radialspannungen zu groß werden können, und das Material nicht mehr nur über den Wickel gedehnt wird, sondern es bei inneren Lagen durch die hohe Radialkraft dazu kommt, dass die Lagen in tangentialer Richtung gestaucht werden, was zu einer Sternbildung (RD-46) im gesamten Wickel führt. Auch das Eindrücken der Hülse (RD-9) kann aufgrund zu hoher Wickelspannung hervorgerufen werden. Beide Effekte führen zu einer starken Unrundheit der Rolle. In der Regel können solche Rollen in einer Druckmaschine nicht weiterverarbeitet werden, weshalb diese Effekte in der Fallstudie der vorliegenden Arbeit nicht zu erwarten sind.

Werden zunächst einige Lagen mit geringer Wickelspannung gewickelt (RD-29) und danach die Wickelspannung erhöht, wirkt die Wickelspannung von den Außenlagen besonders stark auf die inneren Lagen. Zum einen können sich die Lagen einfacher gegeneinander verschieben und zum anderen begünstigt es eine wellenförmige radiale Unrundheit der inneren Wickellagen, die dann auch die äußeren Lagen radial deformieren. Derartige Effekte (RD-66) können in der Regel durch einen geeigneten Wickelspannungsaufbau (siehe Abbildung 3.10) vermieden werden, sagt z.B. ROISUM in [78].

Merke: Je nach Stärke der Rollenunrundheit, und Erfolg der Bahnspannungsregelung etwaige Störungen aus der Abwicklung zu kompensieren, können diese sich mehr oder weniger stark bis auf den Druckprozess auswirken und insbesondere für Störungen im Längsregister (MD) sorgen. Bei Nichtparallelität von Walzen oder einem CD-Profil im Material können sich die Spannungsschwankungen schnell auch im lateralen Bahnlauft auswirken.⁵²

4.4.4 Bahnlauftörungen

Durch nicht ideale Wickel oder Walzen SHIN entwickelt 2003 in [100] eine Methode zur Bestimmung der spezifischen Exzentrizität einer Rolle auf Basis einer Umfangsgeschwindigkeitsmessung und der Winkelpositionsermittlung der Rolle. Seine simulierte Rollenexzentrizität kann dazu genutzt werden um die Drehmomente in der Abwicklung so anzupassen, dass der Bahnlauft nach der Abwicklung signifikant beruhigt wird.

PAGILLA et al. untersuchen 2003 [62] die Rolle aktiver Tänzer in Bahnprozessen zur Abschwächung periodischer Störungen der Bahnspannung und entwickeln dafür ein mathematisches Modell.

⁵²siehe Kapitel 3.1.3.6

RAUL et al. entwickeln 2015 [76] einen Feedforward Ansatz, der Rollen-Unrundheiten identifiziert und die dadurch verursachten periodischen Bahnspannungsvariationen kompensiert.

BRANCA, PAGILLA und REID bilden 2009 [6] [5] bzw. 2013 [8] den Zusammenhang zwischen Unrundheit einer Rolle und der in einer Abwicklungssituation entstandenen Bahnspannungsvariation auf den Bahnlauf in einem Modell ab. In [7] stellen sie außerdem einen adaptiven Bahnspannungsregler vor, der Bahnspannungsvariationen, die von einem unregelmäßig geformten Wickel in der Abwicklung ausgehen, per Vorsteuerung kompensieren kann.

SEKI et al. stellen 2020 [93] einen modellbasierten Spannungsregelungsansatz vor, um periodische Bahnspannungsschwankungen zu unterdrücken, die durch Walzen oder Papierrollen im Abwicklungsprozess verursacht werden. Sie berücksichtigen insbesondere das viskoelastische Materialverhalten der Bahn und nutzten Frequenzanalysen zur Bewertung der Ergebnisse.

Inzwischen existieren auch kommerzielle Lösungen, die wiederkehrende Bahnspannungsvariationen durch Periodische Störungen durch Walzen oder unrunde Wickel im Abrollungs- oder Aufrollungsprozess einer Druckmaschine lernbasiert und mit Hilfe von Vorsteuerungsmethoden kompensieren können [102]. Derart „intelligente“ Systeme sind in der Praxis jedoch in der Regel noch nicht weit verbreitet.

Merke: Nicht ideale Walzen oder unrunde Fertigrollen führen in der Druckmaschine zu periodischen Bahnzugstörungen. Sobald eine Nichtparallelität von Walzen oder ein CD-Profil im Substrat existiert, können diese Effekte auch zu CD-Bahnlaufstörungen führen.⁵³ In vielen Forschungsarbeiten geht es um die Entwicklung entsprechender Gegenmaßnahmen zumeist mit Bezug auf die Bahnspannungsregelung, aber nicht auf die konkreten Auswirkungen auf die Registerqualität.

Durch nicht ideale Materialbahnen SIEVERS erklärt 1988 in [103] mit Hilfe eines Timoschenko-Balken-Modells, welches auch Scherkräfte berücksichtigt, erstmalig das sogenannte *weave regeneration* Phänomen. Es beschreibt den Effekt, dass am Messpunkt direkt hinter der Bahnlaufregelung (WGS) etwaige seitliche Bahnlauffehler vollständig ausgeregelt werden können, sich diese unter Umständen an nachfolgenden Leitwalzen aber wieder sukzessive „regenerieren“. Der Effekt sei insbesondere bei kurzen und breiten freien Zügen

⁵³siehe Kapitel 3.1.3.6

zu erwarten, bei denen neben den lateralen Bahnpositionsfehlern im besonderen Maße auch Scherkräfte übertragen werden.

BENSON überprüft 2002 [2] die Auswirkungen von einlaufenden geometrischen Abweichungen in der Bahn, wie z.B. durch Splices (RD-20) oder eine sinusförmige Krümmung der Bahn (SD-1) auf den lateralen Bahnlauf in einem Zweiwalzenmodell. Er zeigt, dass sich der geometrische Bahnfehler, der an der ersten Walze vollständig eliminiert ist, sich an der nachfolgenden zweiten und dazu parallelen Walze, in der Amplitude signifikant verstärkt. Die Studie beweist damit das *weave regeneration* Phänomen für den Spezialfall des *Splice* in einem Modell.

SWANSON fasst 2009 [105] die wichtigsten Arbeiten zu gekrümmten Bahnen und den daraus resultierenden lateralen Bahnlaufstörungen zusammen. Er zeigt wie in zahlreichen Theorien über die Jahre bzgl. Amplitude und Richtung der seitlichen Ablenkung diskutiert wurde. Seinen eigenen Untersuchungen zur Folge verlaufen gekrümmte Bahnen zwischen zwei parallelen Walzen mit hoher Haftung, bei straffem, von Falten freiem Bahnzug und ohne Losen, nur leicht zu der Bahnseite, die eine geringeren Bahnspannung bzw. längere Bahnkante aufweist. Diese Beschreibung entspricht auch der verallgemeinerten Übersicht in Abbildung 3.21 (S.41).

SHI et. al untersuchen 2019 [96] ebenfalls, wie sich ein gekrümmter endloser Riemen auf einem parallelen Zweiwalzensystem bzgl. des seitlichen Bahnlaufs verhält. Er bestätigt SWANSONS Beobachtungen, dass sich gekrümmte geschnittene Bahnen (SD-1) stets in Richtung der längeren Bahnkante bewegen. Er weist daraufhin, dass es im Bahnlauf schnell zu losen Bahnen und Faltenbildung kommen kann. Wichtig sei es, dass derartig gekrümmte Bahnen im seitlichen Bahnlauf stets geregelt werden, damit es nicht zu Problemen im Register kommt.

YANG und MÜFTÜ untersuchen 2013 [118] den lateralen Bahnlauf unter Einfluss von Materialinhomogenitäten erstmals in einem Rolle-zu-Rolle System mit mehreren Leitwalzen. Die Untersuchungen bewegen sich im Kontext der Bahnführung von Speicherbändern, wo es in ganz besonderem Maße auf eine präzise Bahnführung ankommt.⁵⁴ Sie nutzen ein auf der Euler-Bernoulli Balkentheorie aufbauendes Bahnlaufmodell, welches den lateralen Bahnlauf für verschiedene Unregelmäßigkeiten in der Bahn selbst, unter strenger Berücksichtigung des Normal-Entry-Law, aber unter Vernachlässigung von Schlupf, simuliert. In den Simulationen wird eine sinusförmige Inhomogenität in der Bahn durch ein Rolle-zu-Rolle System mit vier parallelen Walzen befördert. Die Ergebnisse zeigen, dass derartige materialbedingte Störungen am Ende der Bahnstrecke zu einer unsauberen Aufwicklung führt. Die Bahn wird in den Untersuchungen an der Abrollung vollständig gerade geführt.

⁵⁴Bahnführung findet in diesem Kontext im Bereich von Nanometern statt, siehe YANG [117]

Entlang des Walzensystems nehmen die materialinduzierten lateralen Abweichungen dann aber sukzessive zu. Darüber hinaus wird gezeigt, dass bei einer Auslenkung der Leitwalzen, die Bahn einen generell anderen Weg durch das Walzensystem nimmt. Die materialinduzierten seitlichen Bahnlaufvariationen bleiben davon im Grunde aber unberührt und addieren sich zur generellen Bahnauslenkung. Abbildung 4.5 zeigt die Untersuchungsergebnisse, die anhand eines Modells, eine Amplitudenverstärkung von materialinduzierten Störungen im lateralen Bahnlauf entlang eines Walzensystems mit mehreren Bahnführungselementen im Kontext von Speicherbändern, beweisen.⁵⁵

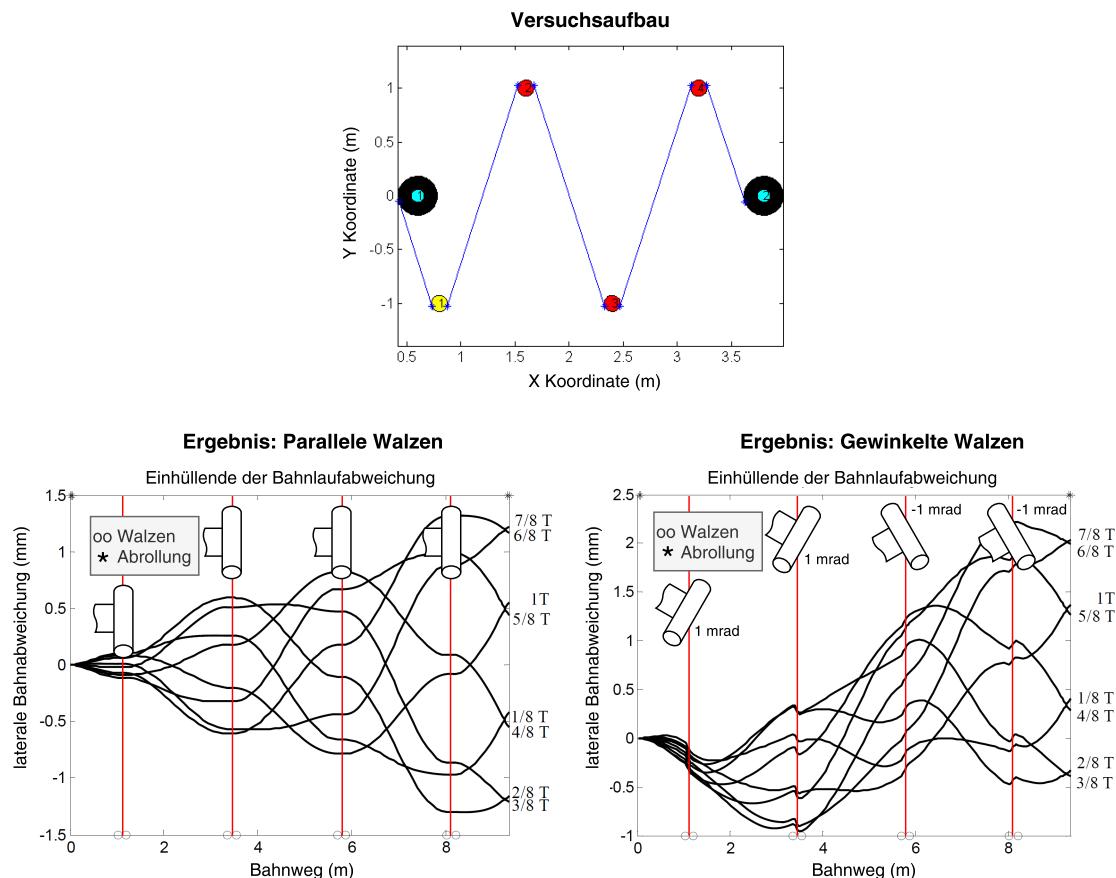


Abbildung 4.5 Nachweis des Amplitudenverstärkungseffektes für sinusförmige Materialinhomogenität über eine komplette Periode P der Störung über mehrere Walzen [118]

YANG erweitert sein Modell 2015 [117] durch einen Term, der die Interaktionen zwischen Material und Walzenoberfläche wie Schlupf berücksichtigt. So können auch Zwischenzustände bis zum Erreichen des stationären Bahnlaufs numerisch berechnet werden.

⁵⁵Die Visualisierung der Walzen wurde zum besseren Verständnis der Grafiken ergänzt

Das Modell wird lediglich auf ein Zweiwalzensystem angewendet. Eine Untersuchung des Übertragungsverhaltens über mehrere Walzen wird nicht durchgeführt.

PARENT et al. veröffentlichte 2011 [63], 2013 [64] und 2022 [65] eine Reihe von Fallstudien, bei denen der Zusammenhang von Bahninhomogenität und Bahninstabilität in CD und MD untersucht wurde. Die Untersuchungen zeigen, dass materialbedingte Schwingungen besonders problematisch im Bezug auf Registerschwankungen sind. Er erfasst die laterale Instabilität von Papierbahnen mit Hilfe von zwei gegenüberliegenden Bahnkantensensoren und misst die Bahnspannung über eine spezielle Vorrichtung über die gesamte Bahnbreite. In den Fallstudien werden die Seitenbewegungen von unterschiedlichen Papiersorten auf verschiedenen Druckmaschinen erfasst. Die Bahnlaufdaten werden dabei mit Daten aus der Papierherstellung verglichen. In [65] kann er mit Hilfe von Frequenzanalysen des Faserorientierungswechsels zeigen, dass die seitliche Bahninstabilität primär durch Druckschwankungen in der Headbox im Stoffauflauf verursacht werden. Außerdem werden die CD-Bahnspannungsprofile von Rollen unterschiedlicher CD-Positionen miteinander verglichen. Der Zusammenhang der seitlichen Bahninstabilität mit den CD-Registerschwankungen wird dabei anhand von wenigen (6) Datenpunkten aufgezeigt. In [64] wird das CD-Feuchtigkeitsprofil in den Bahnen als primäre Ursache für die CD-Bahnspannungsprofile identifiziert. Abbildung 4.6 zeigt ein Schema aus [65], wie die Überlagerung von Inhomogenitäten in den Materialeigenschaften⁵⁶ in CD und MD, zu lateraleren Bahnlaufstörungen im Druckprozess führen. *Interessanterweise deutet er eine lineare Amplitudenverstärkung bzgl. dieser Ursachen an, obwohl in seinen Studien auf den Effekt der Fortpflanzung bzw. Übertragung der Bahnlaufstörungen entlang mehrerer Walzen nicht weiter eingegangen wird.*

⁵⁶Basisgewicht (BW), Feuchtigkeit (Moisture), CD-Bahnspannungsprofil (CD-Tension) oder Faserorientierung (TSO) etc.

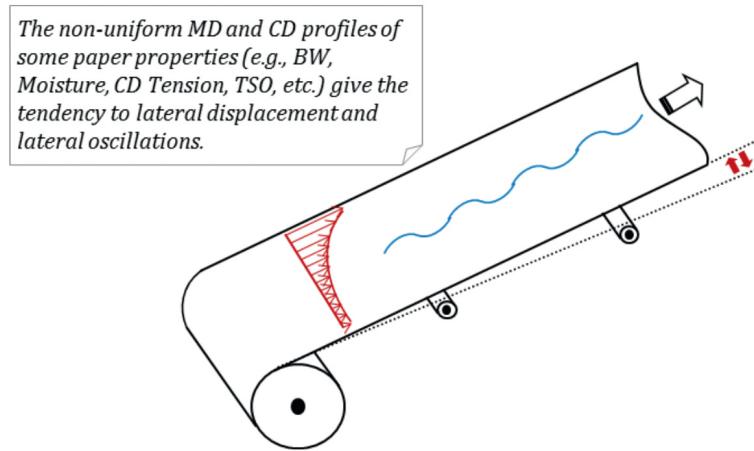


Abbildung 4.6 Schematische Darstellung von seitlichen Bahnlaufstörungen, die durch inhomogene Materialeigenschaften in einer Papierbahn induziert werden [65]

In [65] stellt PARENT außerdem ein Bernoulli-Euler Balkenmodell vor, dass den Spezialfall einer einlaufenden linearen Variation der Bahnspannung oder Bahndicke über die gesamte Bahnbreite für einen freien Bahnzug zwischen zwei geklemmten Walzenpaaren simuliert. Simulationsergebnisse werden jedoch nicht präsentiert. PARENT nutzt in seinen Studien [65] und [64] die Frequenzanalyse als Hauptinstrument, um Störungen der seitlichen Bahnbewegung mit Messdaten aus der Papierherstellung zu vergleichen. Um die Untersuchungen auf das Substrat zu beziehen und unabhängig von der Bahngeschwindigkeit zu machen, drückt er die Frequenzachse bewusst in Wellenlänge (Ortsbezug) aus und nicht als Frequenz (Zeitbezug).

Andere Untersuchungen im Bereich des Offsetdrucks finden ebenfalls heraus, dass Schwanungen in der Faserorientierung eine der wichtigsten Grundursache für laterale Bahnlaufstörungen und etwaigen CD-Registerstörungen ist. [99] [97] [98] [61] [101]

PAROLA et al. veröffentlichen zwischen 2000 und 2001 eine Reihe an Untersuchungen [70] [68] [66] [71] [50] zum Thema CD-Bahnspannungsprofile, die eine typische Grundursache für die grundlegende seitliche Bahnauslenkung durch die Maschine darstellen. Das Bahnspannungsprofil über CD wird in diesen Studien mit einer speziellen Vorrichtung innerhalb verschiedener Rolle-zu-Rolle Prozesse gemessen und ist ohne diese nicht möglich.

Merke: In nicht idealen Materialbahnen ist das Potential für Bahnlaufstörungen in CD und MD ortsfest in der Materialbahn gespeichert. Die Materialbahnstörungen entfalten ihre Wirkung an jedem Bahnführungelement erneut. In verschiedenen Studien konnte eine Amplitudenverstärkung bzw. Regeneration

von materialspezifischen Bahnlaufstörungen entlang mehrerer Walzen beobachtet werden, auch wenn die Bahn zu Beginn eines Walzensystems vollkommen ruhig transportiert wird.

Durch Hygroexpansion In 2003 [67] und 2004 [69] veröffentlicht PAROLA einige Ergebnisse aus einer größeren Fallstudie, die den Effekt der Bahnverbreiterung und des seitlichen Bahnverlaufens (hier als *Fan-out* bezeichnet) in einer Coldset-Rollendruckmaschine (Zeitungsdruck) über 800 Rollen empirisch untersucht. In diesem Fall zeigt sich, dass die Papierrauigkeit aufgrund der Eignung zur Feuchtigkeitsaufnahme in den Druckwerken direkt mit der Papierverbreiterung zusammenhängt. Außerdem zeigt sich eine starke Abhängigkeit der CD-Rollenposition auf die Bahnspannung. TSO Messungen zeigen zudem einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Faserorientierung und der seitlichen Bahnablenkung.

Den Aspekt des Einflusses von Feuchtigkeitsaufnahme des Papiers auf den Bahnlauf im Rollenoffset untersucht auch UNGH et al. 2007 [106] mit Hilfe von Bahnkantenmessungen vor und nach den Druckwerken. Die Arbeit bestätigt, dass die Papierbahn sich umso mehr verbreitert, je größer die Abstände zwischen den Druckwerken sind, da das Papier länger Zeit hat Feuchtigkeit aufzunehmen, die über die Druckwerke appliziert werden. Dieser Effekt ist typisch für den (nassen) Rollenoffsetdruck und führt insbesondere bei rauen Papiersorten zu Problemen in der Registerqualität.

Merke: Bahnlaufprobleme, die mit der Feuchtigkeitsaufnahme im Zusammenhang stehen, scheinen primär ein Problem bei dünnen, ungestrichenen Materialien zu sein, die entsprechend saugfähig sind und dadurch die mechanischen Eigenschaften der Bahn verändern. Die Feuchtigkeitsaufnahme durch Wasser oder Farbe im Druckprozess selbst, wird für die Fallstudie der vorliegenden Arbeit als nicht relevant eingeschätzt, da zum einen hauptsächlich gestrichene und deutlich dickere Materialien verdrückt werden (siehe Tabelle 6.3 (S.121)) und es sich zum anderen um einen Tiefdruckprozess mit Zwischentrocknung handelt.

Zusammenfassung Lateraler Bahnlaufstörungen WALKER versucht mit einer Auflistung in [104, S.391] (WHD-11) sämtliche Arten lateraler Bahnlaufstörungen, die in Rolle-zu-Rolle Prozessen auftreten können, in 5 Gruppen zusammenzufassen:

1. „Initial positioning or input errors, including shifted layers or width variations in the unwinding roll and errors in web position on rollers during machine threading.“

2. „Web tracking errors resulting from interaction between the web and one or more rollers, including the web’s response to roller diameter variations, misaligned rollers, web bagginess, and other external forces such as air flow.“
3. „Guiding errors in which an automatic web guide performs poorly or worsens web wander or offset, including poor control factors (sensor deadband, poor control-loop tuning, incorrect sensor position, and loss of traction), poor web-guide geometry factors (such as steering rollers with incorrect pivot or wrap angles), and sequential web guides with conflicting target positions. (Note: Even if a web guide is set up perfectly, all automatic guides will have range and speed limits).“
4. „Shifts in winding layers because of core shifting, cinching, air lubrication, viscoelastic forces, or external forces imposed by poor roll handling.“
5. „Edge-slitting errors from lateral runout of shear or score knives or wobble in blade holders.“

WALKER unterscheidet also, ob eine laterale Bahnlaufstörung 1. initial vorliegt, 2. erst durch eine Interaktion in der Druckmaschine hervorgerufen wird, 3. durch Bahnpositionierungssysteme unzureichend korrigiert oder gar induziert wird, 4. durch den Abwicklungsprozess verursacht wird, oder 5. durch eine geometrische Variation in der Bahnkante definiert ist. An dieser Stelle sei anzumerken, dass sich die Gruppen etwas durchmischen. Initiale Breitenvariationen der Bahn (1.) sind streng genommen durch die einzelnen Bahnkantenvariationen definiert (5.). Außerdem rufen etwaige Lagenverschiebungen aus der Abwicklung (4.) für den Bahnlauf innerhalb der Maschine zu jedem Zeitpunkt initiale Abweichungen (1.) hervor, die dann in den Prozess einlaufen. Schließlich umfasst (2.) sowohl materialspezifische als auch maschinenspezifische und externe Ursachen, wie z.B. Luftströmungen. In (3.) werden Störungen aufgrund einer schlechten Regelungsperformance zusammengefasst, die auch von der Bahnkantenqualität abhängen (4.), da die WGS auf diese regelt.

Merke: Der Bahnlauf einer Fertigrolle in einem Rolle-zu-Rolle Prozess unterliegt in der Regel auch innerhalb eines stationären Betriebszustandes stets dynamischen Bahnlaufschwankungen. Ein gewisser Anteil dieser Bahnlaufinstabilität geht dabei auf die ortsfeste Inhomogenität der Papierbahn in CD und MD (WD-38), oder auf Variationen in der Bahngeometrie (SD-1, WD-6, WD-11) zurück. Maschinenbedingte Störungen, wie z.B. nicht ideale Walzen oder ein nicht idealer Abwicklungsprozess, können den Bahnlauf ebenfalls seitlich ablenken. Materialspezifische Ablenkungen verstärken sich dabei sukzessive über mehrere Walzen bzgl. der Amplitude. Initial einlaufende seitliche

Bahnfehler werden aufgrund des fundamentalen NEL in der Amplitude dagegen abgeschwächt.

4.4.5 Registerschwankungen

GALLE modelliert in seiner Dissertation 2007 [21] eine komplette Rollendruckmaschine um regelungstechnische Untersuchungen im Bezug auf den Bahntransport durchzuführen. Es werden drei Gruppen für Förderstörungen der Bahn in MD-Richtung genannt, die sich mehr oder weniger nach ihrer zeitlichen Charakteristik unterscheiden.

1. *Periodische Störungen*, die typischerweise durch Förderorgane wie Walzen hervorgerufen werden
2. *Transiente Störungen*, die typischerweise durch einen Rollenwechsel hervorgerufen werden
3. *Stochastische Störungen*, die typischerweise im Bahnzug und im Register zu beobachten sind

Interessant ist, dass er in (3.) die Registerschwankungen zwar sehr verallgemeinert, aber im Bezug auf die Zeit- und Frequenzcharakteristik, sehr spezifisch beschreibt. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass es zu den stochastischen Registerstörungen kaum Veröffentlichungen gibt.

„Für stochastische Störungen, wie sie die Passer- und Zugstörungen aufweisen, gibt es ebenfalls kaum druckspezifische Veröffentlichungen. [...] es besteht weiterhin Bedarf nach entsprechenden Untersuchungen.“ [21, S.44]

SCHNABEL entwickelt 2009 in seiner Dissertation [91] einige Methoden zur Registerregelung bei Rollentiefdruckmaschinen in Abhängigkeit der Bahnzugkraft. Laterale Bahnlaufstörungen und damit verbundene Seitenregisterschwankungen werden nicht thematisiert.

GALLE und SCHNABEL haben primär eine Optimierung der regelungstechnischen Möglichkeiten bzgl. des Bahntransports (in MD) im Blick. Sie arbeiten ohne ortsabhängige CD- und MD-Variationen in den Materialeigenschaften, wie sie in realen Bahnen typischerweise vorkommen. Die Bahngeometrie wird ebenfalls als Konstant angenommen. Entsprechende Amplitudenverstärkungseffekte wie in SIEVERS [103], BENSON [2] oder YANG und MÜFTY [118] werden nicht untersucht.

HARS überführt 2008 in [26] die Erkenntnisse aus mehrjährigen Überlegungen zum stationären und instationären Bahnlauf in Rollendruckmaschinen auf die Bedeutung für Längsregister Schwankungen. Er schlussfolgerte, dass instationäre Bahnlaufstörungen bei mehrfarbigen Rollendruckmaschinen in Ständerbauweise *relativ langsam abklingen*, wobei *insbesondere niedrfrequente Bahnlaufstörungen mit großer Amplitude besonders problematisch für das Register seien*.

KANG et al. entwickeln 2010 [39] ein vorausschauendes Seitenregisterregelungsmodell, welches die lateralen Bahnbewegungen an einem Druckwerk und die Stellbewegungen des jeweils vorherigen Druckwerkes berücksichtigt, wodurch vorhersehbare Abweichungen im Bahnlauf erfolgreich kompensiert werden können. In nachfolgenden Arbeiten in 2011 [41] [40], werden für die Regelung nicht nur Seitenregisterfehler, sondern auch die Korrelation aus CD- und MD-Registerfehlern berücksichtigt.

SESHADRI et al. entwickeln 2013 [94] ein Modell zur Berechnung des MD-Registerfehlers für eine reale mehrfarbige Tiefdruckmaschine mit mechanischer Antriebsachse. Sie untersuchen die Aus- und Wechselwirkungen zwischen benachbarten Druckwerken aufgrund von Variationen in der Materialdehnung, der Maschinendynamik und der Reibung an unterschiedlichen Maschinenelementen. Beispielsweise wird näher auf den Einfluss der seitlichen Raketoszillation eingegangen, die als eine Ursache für entsprechende MD-Registerschwankungen identifiziert werden.

LUNDSTRÖM et al. stellen 2013 [51] ein System vor, dass auf Basis einer Random Forest Modellierung eine Bewertung und Vorhersage von Druckqualitätsmerkmalen im Rollenoffset vornimmt. Das System quantifiziert den Einfluss verschiedener Papier- und Druckparameter auf die Druckqualität. Die Registerqualität ist dabei ein zentrales Merkmal. Auch in dieser Untersuchung war die Faserorientierung das wichtigste papiertechnische Merkmal im Bezug auf die beobachteten Registerschwankungen.

LEE et al. untersuchen 2015 [49] mit Hilfe von Frequenzanalysen MD-Registerfehler für Kunststoffsubstrate im Anwendungsbereich gedruckter Elektronik. Sie finden heraus, dass insbesondere Temperaturvariationen in den Trocknern zu Dehnungsvariationen in der Bahn führen, die in ihrer Studie zu den dominantesten Längsregisterfehlern führten. In 2020 [47] gibt er einen Überblick über Theorien und Technologien zur Bahnführung in Rolle-zu-Rolle-Herstellungsprozessen bzgl. MD und CD. Er geht auch auf Konzepte zur Steuerung der Wickelspannung in Fertigrollen und der Register-Steuerung ein. Darüber hinaus wird auch der Einfluss der Registermarkenqualität und deren sensorische Erfassung erläutert, die potentiell als irreführende Messabweichung in den Registerregelkreis eingehen kann. Dieser Aspekt wird 2016 im Detail in [48] untersucht.

Merke: Registerfehler werden in aller Regel sehr individuell untersucht. Meist gibt es eine Vorahnung, wodurch die Registerfehler verursacht werden. Eine universelle Herangehensweise zur systematischen Interpretation und differenzierten Zuordnung zu potentiellen Ursachen existiert augenscheinlich nicht.

4.5 Abgrenzung

Zusammenfassend wird in Abbildung 4.7 die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit zwischen den verschiedenen angrenzenden Themenblöcke im Stand der Forschung und Technik verortet. Die Übersicht veranschaulicht damit den in dieser Arbeit aufgespannten Forschungsraum.

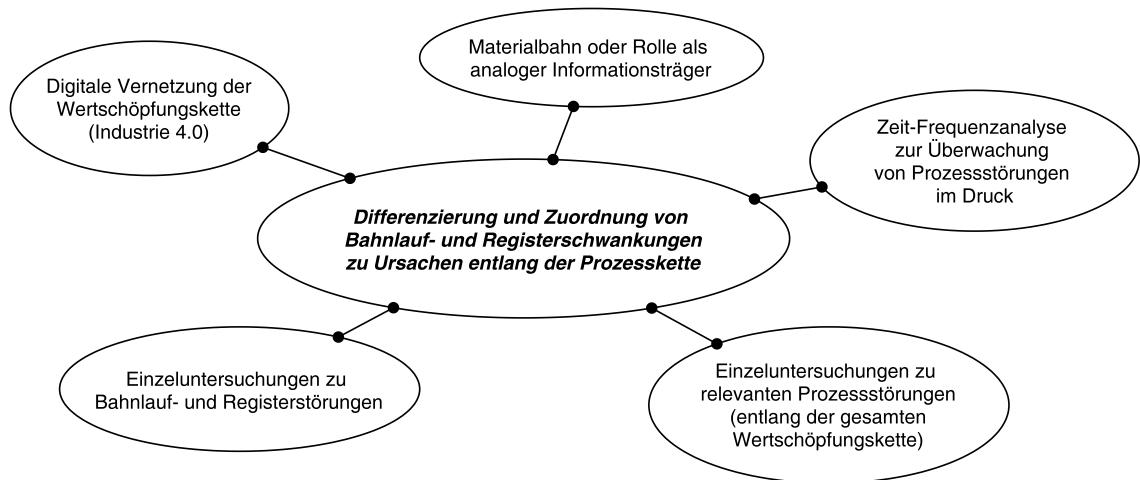


Abbildung 4.7 Die wichtigsten Anknüpfungspunkte der vorliegenden Arbeit zum Stand der Forschung

In den einzelnen Themenblöcken werden in Bezug auf die zentrale Fragestellung dieser Arbeit, grundlegende Lücken bzw. Schwächen in den aufgeführten Forschungsarbeiten identifiziert, die diese grundsätzlich zur vorliegenden Arbeit abgrenzen. Sie werden nachfolgend thematisch gegliedert und zusammengefasst erläutert:

Digitale Vernetzung der Wertschöpfungskette Die bahnverarbeitende Industrie arbeitet ganz allgemein an digitalen Lösungen zur Vernetzung der Wertschöpfungskette. Für Kunststoffmaterialien gibt es bereits Ansätze. Zur Automatisierung und Optimierung dieser Prozesse werden alle möglichen Daten aus allen Bereichen der Produktion gesammelt. Hierbei sind auch Korrelationen von Prozess- und Qualitätsdaten umfänglich möglich. Inwieweit Daten aus unterschiedlichen Teilprozessen aber tatsächlich kausal miteinander zusammenhängen wird hierbei nicht automatisch mit beantwortet. Es herrscht weiterhin ein großer Bedarf an Grundlagenuntersuchungen, die die komplexen Wirkzusammenhänge von Ursachen innerhalb der verschiedenen Teilprozesse auf die Auswirkungen in realen Druckprozessen kausal erklären. Im Bereich faserbasierter Materialien existieren solche prozessübergreifenden Ansätze überhaupt nicht.

Materialbahn oder Rolle als analoger materieller Informationsträger In der Literatur ist eine breite Vielfalt unterschiedlicher Bahnlauf- und Wickeldefekten bekannt, die in der Fachliteratur mehr oder weniger umfangreich beschrieben und katalogisiert sind. Die Phänomene werden mit ihren charakteristischen Merkmalen vor allem im Bezug auf eine fertig gewickelte Rolle beschrieben. Zur Rekonstruktion von Ringmustern auf der Rollenstirnseite wurde beispielsweise auch ein finites Wickelmodell entwickelt. Eine direkte Überführung der Merkmale auf ihre Auswirkungen im Bahnlauf- und in der Registerqualität in Rolle-zu-Rolle Druckprozessen existiert nicht. Die oftmals rein auf visuelle Begutachtung basierende Identifikation von Rollendefekten ist bei schwach ausgeprägten Effekten oder bei Überlagerung mehrerer unterschiedlicher Effekte potentiell fehleranfällig oder gar nicht mehr möglich.

Zeit-Frequenzanalyse zur Überwachung von Prozessstörungen im Druck Die meisten Arbeiten in diesem Themenblock fassen die in realen Maschinen oder Simulationen erhobenen Daten entweder zu statistischen Kennzahlen zusammen oder vernachlässigen bei Anwendung von Frequenzanalysen gänzlich die zeitliche Dynamik der Störungen über einen längeren Zeitraum, wie z.B. über einen Rollenzyklus. Im Bereich Rolle-zu-Rolle Druckprozesse existieren keine Arbeiten, die eine Visualisierung der dynamischen Vorgänge von Bahnlauf- und Registerschwankungen thematisieren. Insbesondere nicht bzgl. des Zeit- und Frequenzverhaltens.⁵⁷

Einzeluntersuchungen relevanter Prozessstörungen entlang der Prozesskette Es existiert eine große Vielzahl an Einzeluntersuchungen zu verschiedensten Prozessstörungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. In der Regel ist unklar welche der unzähligen potentiellen Einflüsse am Ende überhaupt relevant für Druckprozesse sind, und wie genau? Es existieren keine Untersuchungen dazu, wie die einzelnen Prozessstörungen entlang der Prozesskette sich auf den Druckprozess auswirken bzw. übertragen.

Einzeluntersuchungen zu Bahnlauf- und Registerstörungen Es existiert ein großer Umfang an Forschungsarbeiten bzgl. unterschiedlichster Aspekte in der Bahnlaufdynamik in Rolle-zu-Rolle Prozessen. Das Normal-Entry-Law (NEL) ist ein fundamentales Gesetz, und damit ein Grundprinzip dass hinter den dynamischen Vorgängen im seitlichen Bahnlauf steckt. Einige Untersuchungen weisen nach, dass das Übertragungsverhalten von Bahnlaufstörungen bzgl. ihrer linearen Verzerrung entlang der Druckmaschine, je nach

⁵⁷Dies schließt auch die in dieser Arbeit vorgestellte spezielle Form, als Orts-Frequenzanalyse ein, die sich auf die Laufmeter der Bahn bezieht, anstatt auf die Zeit.

Ursache, grundsätzlich verschieden ist. Eine Evaluierung des ursachenabhängigen Übertragungsverhaltens in einer realen Rollendruckmaschine bzgl. verschiedener realer Stör effekte existiert nicht. Es gibt zwar einige wenige Arbeiten, die Bahnlaufeigenschaften und/oder Registerqualität in empirischen Fallstudien auch innerhalb von Produktions- und produktionsähnlichen Umgebungen durchführen. In keiner der Studien werden jedoch hochaufgelöste Forschungsdaten bzgl. Bahnlauf- und Registerschwankungen mitveröffent licht.

Merke: Aus der Literaturrecherche wird abgeleitet, dass eine Lücke und auch ein gewisser Bedarf nach einer universellen Methodik zur systematischen Differenzierung verschiedener Prozessschwankungen bezüglich Bahnlauf- und Registerschwankungen in Rolle-zu-Rolle Druckprozessen existiert, die eine Zuordnung zu den Ursachen entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht. Zudem bedarf es zur Evaluierung einer solchen Methodik, einen bisher nicht existenten, umfangreichen Datensatz, der eine entsprechende Vielfalt an Stör effekten beinhaltet.

5 Eigener Ansatz

5.1 Ansatz der analogen Informationsübertragung

Zur Herleitung des eigenen Ansatzes wird zunächst festgehalten, dass das Substrat innerhalb einer Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette als Bahn oder als Rolle entlang der Prozesskette durch verschiedenste Prozessstörungen und externen Einflüssen verändert/beeinflusst/beschrieben wird. Abbildung 5.1 zeigt diesen sequentiellen Beschreibungsprozess des Substrates, entlang des in dieser Arbeit betrachteten Ausschnittes der Wertschöpfungskette, als Schema.

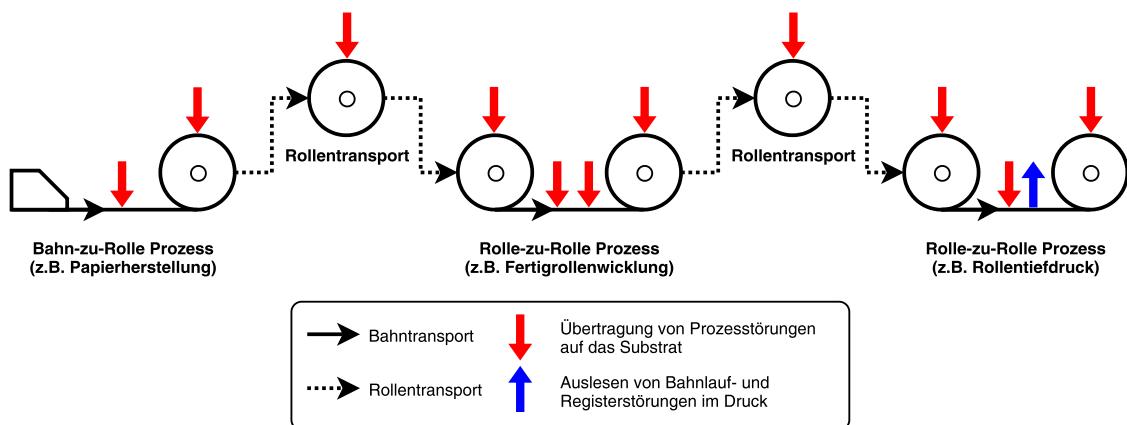


Abbildung 5.1 Sequentielle Beschreibung (rote Pfeile) des Substrates als Bahn oder Rolle entlang der Prozesskette

Die Prozessstörungen bzw. Einflüsse in den einzelnen Teilprozessen können auch als Nutzsignale betrachtet werden, die entsprechende Informationen bzgl. ihrer Ursachen beinhalten. Sie werden in Form von Analogsignalen auf unterschiedlichste Art und Weise auf den materiellen Informationsträger „Substrat“, als Bahn oder Rolle übertragen (rote Pfeile). Die Informationen wandern anschließend im Warenstrom physisch durch die gesamte Prozesskette. Im Druckprozess wirken sich einige der Störungen/Informationen auch auf den Bahnlau- und die Registerqualität aus und können dort schließlich mehr oder weniger gut nachgewiesen/ausgelesen werden (blaue Pfeile).

In dieser Betrachtungsweise lässt sich eine Analogie zwischen der Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette und einem *materialgebundenen analogen Informationsübertragungssystem* zugrundelegen. Bei erfolgreicher Interpretation und entsprechender Rückmeldung bzw. Zuordnung der übertragenen Informationen zurück zur Quelle, entspricht dies sogar einem rudimentären wechselseitigen Kommunikationssystem.

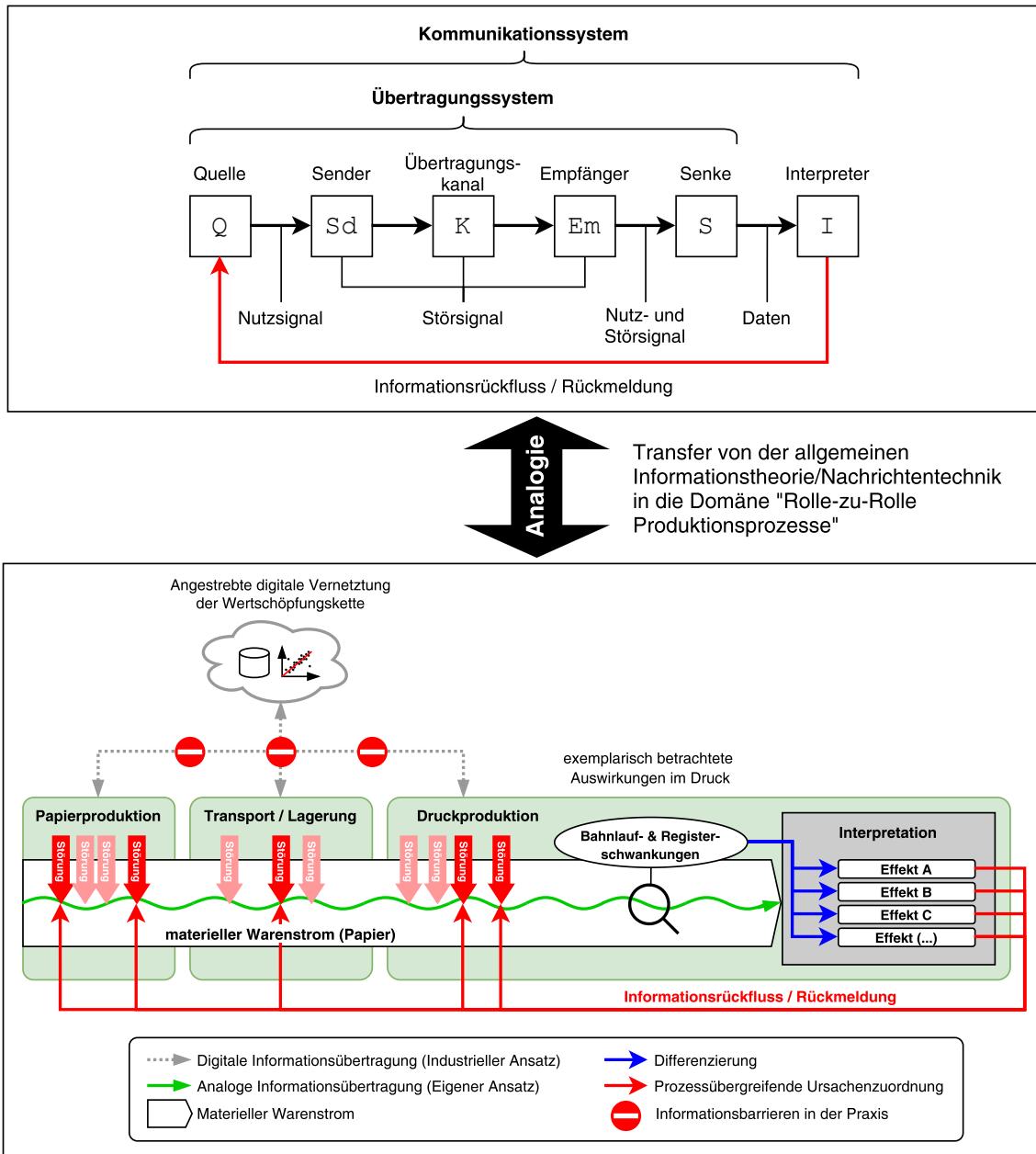


Abbildung 5.2 Analogie zwischen einem rudimentären Kommunikationssystem (siehe S.47) und dem in dieser Arbeit zugrunde gelegten analogen Informationsübertragungsprozess einer Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette im Vergleich zum digitalen Ansatz der Industrie

Abbildung 5.2 veranschaulicht den in der vorliegenden Arbeit verfolgten Ansatz der analogen und materialgebundenen Informationsübertragung über das Substrat (schwarze, blaue, grüne und rote Pfeile) im Vergleich zum digitalen Ansatz, der von der Industrie verfolgt wird (graue Pfeile). An dieser Stelle sei angemerkt, dass der vorgeschlagene Ansatz, den digitalen Ansatz in keiner Weise ersetzen kann oder soll. Er ist vielmehr als eine zweckmäßige Ergänzung in Bezug auf die konkrete Forschungsfrage zu sehen.

Aus dem analogen Ansatz ergeben sich im Zusammenhang der identifizierten Herausforderungen (siehe Kapitel 2.3) und der Forschungsfrage (siehe Kapitel 2.2) zwei grundlegende Vorteile gegenüber dem digitalen Ansatz:

- Alle für den Bahnlau und die Registerqualität relevanten Prozessstörungen sollten sich als charakteristische Schwankungen innerhalb des Druckprozesses auswirken, nachweisen bzw. auslesen lassen. Alle nicht relevanten Ursachen erzeugen keine nachweisbaren Störungen im Druckprozesses oder wurden entlang der Prozesskette so stark gedämpft, dass sie ebenfalls keine Relevanz für den Druck besitzen. In beiden Fällen werden solche irrelevanten Informationen durch das reale System selbst herausgefiltert. Dieser Aspekt⁵⁸ ist insofern grundlegend anders und vorteilhaft gegenüber dem digitalen Ansatz (siehe Kapitel 4.1), da bei letzterem im Vorfeld weitestgehend unklar ist, welche der unzähligen Datenquellen in einer Prozesskette für die Ursachenanalyse bzgl. Druckprozessstörungen überhaupt relevant sind. Die Auswahl/Filterung der Daten muss der Datenanalyst vornehmen, was immer die Gefahr birgt, dass nicht kausal zusammenhängende Daten miteinander korreliert werden und es auf diese Weise zu falschen Rückschlüssen kommt.
- Ein weiterer Vorteil ist, dass der analoge Informationsübertragungsansatz vollständig unabhängig von digitalen Informationssystemen und sonstiger digitaler Infrastruktur ist und auch ganz ohne sie auskommt.⁵⁹ Die materialgebundene analoge Informationsübertragung geschieht einfach so und umgeht über den physischen Warenstrom, die als Kernproblem identifizierten Informationsbarrieren zwischen den voneinander getrennten Produktionsprozessen. Eine Vernetzung der strikt voneinander getrennten Teilprozesse ist insbesondere im Bereich faserbasierter Substrate bisher ungelöst (siehe Abbildung 2.5). Die auf die Materialbahn übertragenen Störungen/Informationen stellen damit eine bisher quasi ungenutzte Informationsquelle im Bezug auf die Ursachenanalyse für Prozessstörungen im Druck dar, die einfach so existiert, und keine weitere digitale Infrastruktur zum Informationsaustausch bzgl. Prozessstörungen benötigt.

⁵⁸Im Weiteren auch als „innerer Relevanz-Filter“ bezeichnet

⁵⁹Ausgenommen davon ist die notwendige Messtechnik, Hardware und Analysesoftware auf der Empfängerseite (Druckmaschine bzw. Druckerei)

5.2 Analogien

Bleibt man im Bild der analogen Informationsübertragung, sind einige der in Kapitel 3.2.1 aufgeführten Konzepte und Begrifflichkeiten aus der Informationstheorie bzw. Nachrichtentechnik zur Umsetzung des Ansatzes hilfreich. Der konkrete Transfer der wichtigsten Begriffe in die Domäne „Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette“ wird über die nachfolgenden Analogien geschaffen.

Analogie Informationen und Informationsträger Mit Informationen sind in dem verfolgten Ansatz Prozessschwankungen gemeint, welche die Materialbahn oder die Rollen auf irgendeine charakteristische Art und Weise im Zustand verändern und es infolge dessen entlang der Prozesskette zu mehr oder weniger starken Auswirkungen im Druckprozess kommt. Der Untersuchungsfokus liegt in dieser Arbeit auf Bahnlauf- und Registerschwankungen. Das Substrat wird als materieller analoger Informationsträger betrachtet, welcher entlang der Wertschöpfungskette sämtliche für ihn relevanten Prozessschwankungen als Informationen aufzeichnet und in Folgeprozesse überträgt. Die Informationen sind im Substrat als Analogsignale⁶⁰ codiert.

Analogie Übertragungssystem und Übertragungskanäle Jeder kleine Teilabschnitt der Prozesskette stellt in dieser Arbeit ein elementares analoges Informationsübertragungssystem dar. Der Informationsträger besitzt unterschiedliche Übertragungskanäle, die aufgrund verschiedener Störursachen im Prozess über die Übertragungsmechanismen (Sender) im System, unterschiedlich beeinflusst bzw. beschrieben werden können. Die in dieser Arbeit betrachteten Übertragungskanäle sind:

- Bahnkante⁶¹
- Bahnzug
- Tänzerposition
- Bahnfeuchtigkeit
- Register

Liegt die Bahn in der gewickelten Form als Rolle vor, ist die Art und Weise wie auf die Übertragungskanäle geschrieben wird völlig anders, als im Bahntransport innerhalb eines Rolle-zu-Rolle Prozesses. Im ersten Fall geschieht die Informationsübertragung sequentiell entlang der Bahn. Im zweiten Fall parallel auf alle Stellen in der Bahn gleichzeitig. Neben

⁶⁰Analogsignal meint hier eine kontinuierliche und über die Zeit, sich stufenlos ändernde Eigenschaft des Substrates.

⁶¹beinhaltet sowohl Informationen zur Bahnkante selbst, als auch zur lateralen Position der Bahn (siehe Kapitel 6.3.2.2)

den bereits übertragenen Informationen können immer wieder neue Störungen auf den Informationsträger geschrieben werden.

Analogie Sender In der Nachrichtentechnik wird ein Signal zur korrekten Übertragung im Übertragungskanal auf der Seite des Senders üblicherweise passend aufbereitet [18]. Da im Anwendungsfall ein Produktionssystem als Übertragungssystem betrachtet wird, ist der Schreibprozess durch den konkreten Prozess vorgegeben. Signale von Prozessstörungen werden also nicht für den Nutzen einer Informationsübertragung aufbereitet. Üblich ist sogar das Gegenteil. In jedem Produktionsprozess wird versucht Prozessstörungen so gering wie möglich zu halten.⁶² Nur solche Prozessstörungen, die genügend Einfluss besitzen, sodass sie die spezifischen Eigenschaften der Materialbahn tatsächlich auch verändern können, werden am Ende auch auf den Informationsträger „Substrat“ übertragen und anschließend im Warenstrom durch die Prozesskette getragen. Beim Sender und im Übertragungssystem existiert damit im Prinzip ein „innerer Relevanz-Filter“, der für das Substrat irrelevante Störungen/Informationen nicht überträgt.

Jeder spezifische Übertragungsmechanismus einer Prozessstörung sendet bzw. schreibt die von der Ursache ausgehende Information der Störung, auf den für ihn jeweils zugänglichen Übertragungskanal. Das Substrat kann also auf ganz spezifische Weise beschrieben werden. In der Literatur (siehe Kapitel 4.4) beschriebene und für diese Arbeit ebenfalls relevante Beispiele sind:

- Druckpulsationen (Information) in der Headbox (Sender) im Stoffauflauf einer Papiermaschine (Quelle) beeinflussen die Materialeigenschaften wie z.B. die Faserorientierung (Übertragungskanal). [65]
- Vibrationen (Information) eines Untermessers (Sender) in der Schneidpartie eines Maschinenrollers in einer Papierfabrik (Quelle) beeinflussen die Qualität der Bahnkante (Übertragungskanal). [86]
- Vibrationen (Information) einer Tragwalze (Sender) im Walzenbett eines Maschinenrollers in einer Papierfabrik (Quelle) beeinflussen den Wickelaufbau der Fertigrolle (Übertragungskanal). [122]
- Gravitation und die Masse (Information) einer Mutterrolle (Sender) beeinflussen in der Zwischenlagerung einer Papierfabrik (Quelle) die radiale Form des Wickels (Übertragungskanal). [78]
- Taumeln einer deformierten oder nicht rotationssymmetrisch eingespannten (Information) Fertigrolle (Sender) in der Abwicklung der Druckmaschine (Quelle) beeinflussen die Bahnspannung (Übertragungskanal). [8]

⁶²Entweder durch möglichst gute Kontrolle der Ursache selbst oder durch Kompensation der Auswirkungen.

- Nicht ideale Rotation (Information) einer Leitwalze (Sender) in der Druckmaschine (Quelle) beeinflusst den Bahntransport bzw. die Bahnspannung und ggf. den seitlichen Bahnlauf (Übertragungskanal). [93]

Analogie Empfänger Als Empfänger sind in der vorliegenden Arbeit die verschiedenen Sensoren in der Druckmaschine definiert, die die verschiedenen Übertragungskanäle abtasten. Sie wandeln die analogen Messgrößen bzgl. der Bahn in digitale Signale. Im Anwendungsfall sind das im Wesentlichen⁶³:

- Verteilte Bahnkantensensoren (WE_{OS} und WE_{DS}), die zum einen die Bahnkantenqualität und gleichzeitig auch die Seitenbewegung der Bahn (y) entlang der Druckmaschine erfassen.
- Verteilte Bahnzugmesswalzen (WT), die den Bahnzug und darüber hinaus auch indirekt Abweichungen im Bahntransport in MD entlang der Druckmaschine erfassen.
- Tänzerhub (D_{UW}), der die Kompensationsbewegung der Tänzerwalze im Bahnabschnitt „Abwicklung“ erfasst.
- Feuchtigkeitssensor (WM_{UW}) direkt nach der Abwicklung in der Druckmaschine, der die relative Feuchte des Substrates an einem Punkt, mittig zur Bahnbreite erfasst.
- Registermarkensensoren (R^{CD} und R^{MD}) direkt nach jedem Druckwerk, die die Passlage des jeweiligen Druckbildes, relativ zu einem Referenzdruckwerk, einmal pro Rapport erfassen.

Analogie Senke In einer Senke wird ein Signal für die Interpretation aufbereitet. Bei einem Analogsignal könnte z.B. ein Lautsprecher genutzt werden, um das Signal für eine akustische Interpretation aufzubereiten. Für eine visuelle Interpretation würde sich eine Darstellung als Zeitreihe oder als Spektrum eignen. In dieser Arbeit werden die Analogsignale im Substrat zunächst durch die Sensoren digitalisiert und schließlich bzgl. ihres Orts-Frequenzverhaltens in einem Spektrogramm zur visuellen Interpretation aufbereitet (siehe Kapitel 6.2).

Analogie Nutz- und Störsignale Das Substrat wird entlang der Prozesskette immer wieder durch äußere Einflüsse verändert. Im Anwendungsfall sind diese äußeren Einflüsse bzw. Prozessstörungen zwar im eigentlichen Sinne Störgrößen, jedoch beinhalten die Auswirkungen im Druckprozess mutmaßlich genau die Informationen bzgl. ihrer Ursache, die es zuzuordnen gilt. Dies macht die Prozessstörungen in diesem speziellen Fall zu Nutzsignalen.

⁶³Die für diese Arbeit relevanten Eigenschaften der konkreten Sensoren werden in Tabelle 6.4 (S.124 und 6.2 (S.120) aufgeführt.

Als Störsignale werden in dieser Arbeit dagegen fehlerhafte Messungen, Sensorrauschen oder ein schlechter Ausdruck von Registermarken (siehe [48]) definiert.

Potentiell wird eine Interpretation aller bis zum Druckprozess übertragenen Signale dadurch erschwert, dass sich neben den Störsignalen (z.B. Sensorrauschen) die vielen verschiedenen Nutzsignale überlagern oder vermischen, sodass sie sich gegenseitig überdecken oder es zu Verfälschungen der ursprünglichen Informationen kommt. Je nach Übertragungsverhalten werden die Informationen im Substrat also mehr oder weniger gut (Signalstärke) bzw. korrekt (Verzerrung) bis zu den Empfängern in der Druckmaschine (Sensoren) übertragen.

Analogie Verzerrung Im Anwendungsfall werden *lineare Verzerrungen* von Signalamplituden entlang des Übertragungssystems „Druckmaschine“, insbesondere für Störungen im Bahnlauf erwartet (siehe Kapitel 4.4.4 bzw. S.103).

Nichtlineare Verzerrungen werden durch nichtlineare Übertragungskennlinien im Übertragungssystem (siehe Abbildung 3.27) erwartet, wie z.B. durch:

- Amplitudenbegrenzung: z.B. beim Erreichen der maximalen Auslenkung des Drehgestells einer Bahnlaufregelung. (siehe S.35)
- Stetig nichtlineares Übertragungsverhalten: z.B. durch das dämpfende nichtlineare Kraft-Verformungsverhalten von Papier (Bahn oder Wickel). (siehe S.71)
- Hysterese: z.B. durch Getriebespiel an einem Stellglied eines Bahnlauf- oder Registeregelungssystems einer Maschine.
- Tote Zone: z.B. durch einen Schwellwert in einer Bahnlaufregelung. (siehe S.35 bzw. Anhang A.2)

Analogie Multiplexing und Demultiplexing Überträgt man das Konzept der simultanen Mehrfachnutzung eines gemeinsamen Übertragungskanals aus der Nachrichtentechnik für die analoge Informationsübertragung (Multiplexing) auf die Domäne dieser Arbeit, wird klar, dass das Substrat ebenfalls mehrfach und simultan als Übertragungsmedium „genutzt“ wird. Der Multiplexing Prozess auf der Senderseite geschieht ohne weiteres Zutun, ganz automatisch durch die verschiedenen unabhängigen Störeinflüsse, die auf die Bahn oder die Rolle entlang der Prozesskette verteilt einwirken.

Für eine differenzierte Interpretation, der auf das Substrat übertragenen Informationen, müssen diese auf der Empfängerseite anschließend jedoch systematisch wieder voneinander getrennt werden. Die dafür notwendige Prozedur nennt man in der Nachrichtentechnik Demultiplexing. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Demultiplexing Konzept ist sehr

speziell und nutzt zur groben Vordifferenzierung, der grundlegend unterschiedlichen Informationsarten/Prozessstörungsarten, ihr systematisch unterschiedliches lineares Verzerrungsverhalten entlang der Druckmaschine aus (siehe Kapitel 6.3.2). Dieses Auftrennen/-Differenzieren/Zuordnen der übertragenen Informationen in grundlegende Quelle-Senke Verbindungen stellt eine wichtige und notwendige Prozedur für eine kausale Zuordnung von Auswirkungen im Druckprozess auf ihre originären Ursachen in der Prozesskette im Kontext der Aufgabenstellung dar.

Analogie Übertragungskapazität Im Anwendungsfall ist die Übertragungskapazität durch die im Prozess auftretenden Störungen, der jeweils betrachteten Datensequenz (i.d.R. ein Rollenzyklus) und der Abtastung der Bahn mittels Sensoren in der Druckmaschine definiert (siehe Abbildung 3.31 eines Nachrichtenquaders).

Die *Übertragungszeit* ist durch die Bahnlänge einer Rolle und die jeweilige Bahngeschwindigkeit beim Sender (z.B. Papierherstellung oder Rollenwicklung) und Empfänger (hier immer Druckprozess) definiert. Da die Sensordaten ortsbezogen vorverarbeitet werden (siehe Kapitel 6.1.4), muss es hier streng genommen *Übertragungslänge* heißen.

Die *Bandbreite* einer Nachricht bzw. Information ist von seiner höchsten originären Frequenz, etwaigen nichtlinearen Verzerrungen bei der Übertragung auf den Informationsträger und innerhalb des Übertragungskanals abhängig. Die Bandbreite des jeweiligen Übertragungskanals ist im wesentlichen durch die Abtastfrequenz des Sensors, des Datenloggers und durch die maximale Bahngeschwindigkeit limitiert. In Tabelle 6.4 (S.124) sind die Frequenzbereiche (in Wellenzahl und Wellenlänge) und die sich daraus ableitenden Bandbreiten der einzelnen Übertragungskanäle aufgelistet.

Der *Störabstand* (SNR) hängt insbesondere von der Nutzsignalstärke ab, die von Fall zu Fall unterschiedlich ausfallen sollte und daher nie eindeutig definiert ist. Da es sich um reale Prozessstörungen handelt, wird angenommen, dass die Nutzsignalstärke stark variieren kann und i.d.R. auch bis in den Störbereich⁶⁴ hineinreicht. In jedem Fall existiert keine definierte Intensität des Nutzsignals. Die Störsignalstärke ist vom System⁶⁵ und der Messtechnik auf der Empfängerseite vorgegeben. Ein genauer und für alle Rollen und Sensoren gültiger Störabstand kann dadurch nicht berechnet werden. Ebenso wenig die konkrete Übertragungskapazität, aus der Kombination zuvor genannter Größen. Aufgrund der hohen Abtastrate der verbauten Sensoren⁶⁶ und die geringe Bahngeschwindigkeit⁶⁷, wird

⁶⁴z.B. Sensorrauschen

⁶⁵z.B. Ausdruckqualität der Registermarke

⁶⁶Bei der Abtastung des Registers kommt es durch die aufgedruckten Registermarken (1/Rapport), ggf. zur Unterabtastung von hochfrequenten Passerschwankungen.

⁶⁷typischerweise 150 m/min

angenommen, dass die für den Druckprozess relevantesten Störungen innerhalb der Bandbreite der Sensoren liegen. Außerdem sollten sie innerhalb der Übertragungslänge eines Rollenzyklus in ihrer spezifischen Charakteristik als Nutzsignal/Information identifiziert werden können.

Die *Übertragungskanäle* sind durch den Informationsträger „Substrat“ in aufgerollter Form als Wickel (Mutterrolle oder Fertigrolle) oder in abgewickelter Form als Bahn vorgegeben.

Analogie Kommunikationssystem bzw. Kommunikationsvorgang Die analoge Informationsübertragung über das Substrat kann als unidirektonaler Kommunikationsvorgang gesehen werden, da der Informationsträger nur in eine Richtung durch die Wertschöpfungskette transportiert wird.⁶⁸ Sobald die übertragenen Informationen im Druckprozess ausgelesen, interpretiert und differenziert den Ursachen bzw. Quellen in der Prozesskette zugeordnet werden, wird ein Informationsrückfluss zu vorgelagerten Prozessen möglich. In der Analogie kann dies als rudimentärer Wechselbetrieb auf Ebene der Wertschöpfungskette gesehen werden, bei dem Informationen zu Prozessstörungen wechselseitig ausgetauscht werden können. Im Anwendungsfall zielt diese Analogie z.B. auf eine qualifizierte Rückmeldung der Bahnlaufeigenschaften von Drucksubstraten zurück an den Papierhersteller. Dieses Konzept adressiert damit genau das in der Ausgangssituation (siehe Kapitel 2.1) beschriebene Problem von Papierherstellern, die nicht wissen, wie genau⁶⁹ sich ihr Substrat bei deren Kunden (Druckereien) in der Druckmaschine verhält.

Zusammenfassung Zusammenfassend werden in Tabelle 5.1 noch einmal die wesentlichen Komponenten eines analogen Kommunikationssystems und den hier definierten Analogien in der spezifische Domäne „Rolle-zu-Rolle Prozesskette“ gegenübergestellt.

⁶⁸Hiermit ist der allgemeine Warenstrom gemeint, nicht die Laufrichtung der Papierbahn, welche nach jedem Wickelvorgang wechselt.

⁶⁹Hiermit ist eine differenziertere Rückmeldung als nur „gut“ oder „schlecht“ bzw. in Form von „Reklamation“ oder „keine Reklamation“ gemeint.

Komponenten eines Kommunikationssystems	Analogie in der Domäne
Information	Prozessstörung
Informationsträger	Substrat als Bahn oder Rolle
Signal	Sensordaten (Zeitreihen)
Nutzsignal	Informationstragender Anteil im Gesamtsignal (Signal der Prozessstörung)
Störsignal	Verrauschter Anteil im Gesamtsignal (z.B. Sensor Rauschen, Messfehler)
Quelle	Spezifischer Ort einer Prozessstörung in der Prozesskette
Sender	Übertragungselement einer Prozessstörung auf das Substrat
Übertragungskanäle	Bahnkante (Bahnkante, Seitenposition der Bahn), Bahnzug, Tänzerbewegung, Bahnfeuchtigkeit, Register
Empfänger	Sensoren in der Druckmaschine
Senke	Signalvisualisierung mittels Spektrogramm (Orts-Frequenzanalyse)
Interpreter	Interpretationsstrategie
Rückmeldung / Informationsrückfluss	Differenzierte und prozessübergreifende Zuordnung von Bahnlauf- und Registerschwankungen zu den Ursachen im Gesamtprozess

Tabelle 5.1 Übersicht der wesentlichen Komponenten eines Kommunikationssystems in der Nachrichtentechnik und entsprechende Analogien in der spezifischen Domäne „Rolle-zu-Rolle Prozesskette“

Merke: Neben der Erstellung eines Datensatzes aus einer umfangreichen inlinen Beobachtung von Materialbahnen in einem realen Druckprozess, liegt der Schlüssel zur angestrebten Informationsrückführung, in einer zweckmäßigen Datenaufbereitung in der Senke, einem systematischen Demultiplexing zur grundlegenden Differenzierung verschiedener Informationsarten im gemeinsam genutzten Übertragungsmedium, sowie in der semantischen Interpretation der bereits separierten Nutzsignale als konkrete Informationen bzgl. der ursächlichen Prozessstörungen. Durch eine Kombination dieser grundlegenden Komponenten nach dem Vorbild eines analogen Kommunikationssystems, scheint eine rückwirkende und kausale Zuordnung von Auswirkungen im Druckprozess auf die Ursachen in der Prozesskette möglich. Die dafür notwendigen konkreten Methoden werden in Kapitel 6 im Detail erläutert.

6 Methodischer Teil

In diesem Teil werden sämtliche Methoden erläutert, die zur Erarbeitung der Ergebnisse verwendet oder entwickelt wurden.

6.1 Fallbeispiel und Datensatz

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte empirische Datenerhebung wurde im Sinne der guten wissenschaftlichen Praxis im Vorfeld der Dissertationspublikation unter einer Creative Common Licence 4.0 unter dem Name MSDIRPP (Multivariate Sensor Dataset of an Industrial Rotogravure Printing Press) vorveröffentlicht [15]. Der Datensatz enthält mehr Daten als für den Kern dieser Arbeit genutzt wird und bietet daher noch Potential für weiterführende Untersuchungen (siehe Ausblick 10). Die für diese Arbeit relevanten Aspekte des Datensatzes werden nachfolgend erläutert.

6.1.1 Konkrete Rollentiefdruckmaschine

Da in dieser Arbeit die Zusammenhänge von realen Prozessstörungen innerhalb der Prozesskette und den spezifischen Auswirkungen im Druck untersucht werden sollen, wurde bewusst keine Labor Druckmaschine genutzt, sondern eine in Produktion stehende Rollentiefdruckmaschine in einer Verpackungsdruckerei. Über eine Untersuchungsdauer von ca. 2 Jahren wurden vielfältige Beobachtungen unter realen Produktionsbedingungen gemacht. Der Einsatz von zusätzlichen Ressourcen wie Versuchsmaterial, Maschinenstunden für Druckversuche, Maschinenpersonal oder Energie, konnte durch diese beobachtende Herangehensweise minimal gehalten werden.⁷⁰

Abbildung 6.1 zeigt in einer Prozessschemazeichnung die konkret verwendete Druckmaschine mit allen für die Arbeit relevanten Sensoren und Regelsystemen.

⁷⁰Zur Generierung eines ähnlichen Datensatzes über kontrollierte Experimente, wäre der Ressourcenverbrauch exorbitant hoch und die Daten wären am Ende weniger praxisrelevant.

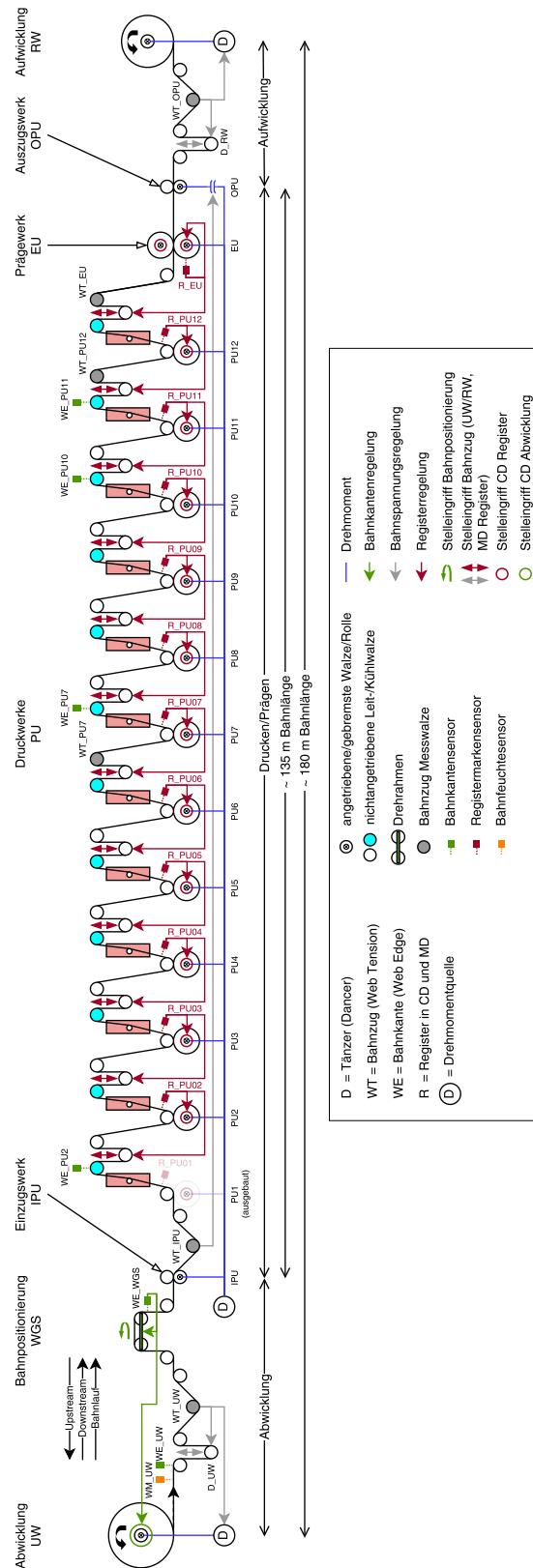


Abbildung 6.1 Prozessschema der in dieser Arbeit verwendeten Rollentiefdruckmaschine

Die Tiefdruckmaschine besitzt 11 Druckwerke (PU = engl. Print Unit) und ein Prägewerk (EU = engl. Embossing Unit). Sie wird primär für die Produktion von Faltschachteln⁷¹ genutzt. Der Bahnweg durch die gesamte Druckmaschine beträgt ca. 180 m. Die Druckzylinder werden über einen Hauptantrieb und per Königswelle synchronisiert angetrieben. Zunächst wird die Rolle im Abwickler (UW = engl. Unwinder) abgewickelt. Danach wird der Bahnlauf über das Tänzersystem (D = engl. Dancer) und die seitliche Bahnlaufregelung (WGS = engl. Web Guiding System) für die anschließende Bedruckung stabilisiert. Zwischen den Druckwerken wird der seitliche Bahnlauf nicht geregelt. Das Einzugswerk (IPU = engl. Infeed Pull Unit) stellt eine für den Druckprozess geeignete Bahnspannung ein. In dem 135 m langen Bahnabschnitt „Druck“ folgen aufeinander 11 identische Druckwerke mit Heißlufttrocknung und anschließender Abkühlung der Bahn über eine Kühlwalze, direkt nach jedem Druckwerk.

Das Register wird einmal pro Rapport (entspricht einer Druckzyllinderumdrehung) über die Position von aufgedruckten Dreiecksmarken ermittelt. Abhängig vom Druckauftrag dient die erste aufgedruckte Marke oder ggf. auch die von anderen Druckwerken als Referenz zur Bestimmung der Passerabweichung (siehe Kapitel 3.1.3.3).⁷² In der hier verwendeten Druckmaschine kommt ein unstetig arbeitender Registerregler in Form eines *Dreipunktreglers* mit drei Ausgangszuständen zum Einsatz. Dieses Regelprinzip kommt zum Einsatz, da die Stellgröße, nämlich die Position der Registerwalze und die Seitenposition des Druckzyllinders nicht stetig variiert wird, sondern immer erst bei Überschreitung bzw. Unterschreitung eines Schwellwertes (Totzone). Die Korrekturbewegung von Registerwalze (bzgl. MD-Register) und Druckzyylinder (bzgl. CD-Register) wird immer mit konstanter Geschwindigkeit durchgeführt, sodass die jeweilige Regelgröße rein über die Dauer der konstanten Korrekturbewegung erreicht wird. Dieses Regelprinzip wird an der konkreten Maschine als ein Kompromiss aus Schnelligkeit, Genauigkeit und Stabilität im Zusammenspiel mit der komplexen Bahnlaufdynamik verwendet. Je nach Auftrag und Material werden einzelne Regelparameter ggf. auch angepasst.⁷³ *In jedem Fall weist die Registerregelung als Dreipunktregler ein grundsätzlich nichtlineares Übertragungsverhalten auf.*

Zur drucktechnischen Kompensation der ansteigenden Bahndehnung, aufgrund von Reibungsverlusten an Leitwalzen entlang der Druckmaschine, steigen die Druckzyllinderdurchmesser in der Größenordnung 0,005 % pro Druckwerk (Zylinderstaffelung) an. Der Wert variiert auftragsspezifisch und materialabhängig. Das so in MD verzerrte Druckbild auf dem

⁷¹Hauptsächlich Zigaretenschachteln, bei denen verhältnismäßig hohe Qualitätsanforderungen bzgl. der Passlage des Druckbildes und Prägung in Bezug auf die Bahnkante eingehalten werden müssen.

⁷²Der Referenzierungsmodus und das jeweilige Referenzdruckwerk für jede Druckfarbe wurde im Rahmen der Datenerhebung nicht mit aufgezeichnet.

⁷³Im Datensatz sind keine Informationen zu Parametrierung der Regler enthalten.

Druckzyylinder kompensiert dann die Bahndehnung während des Drucks. Die Druckmaschine produziert größtenteils mit einer konstanten Bahngeschwindigkeit bei etwa 150 m/min.

6.1.2 Datenerhebung

Zur besseren Handhabung des kontinuierlichen Datenstroms aus der Druckmaschine wird dieser Rollenweise⁷⁴, in für die Aufgabenstellung zweckmäßige Datensequenzen bzw. Übertragungslängen unterteilt und abgespeichert. Über die Vergabe einer ID wird jede Sequenz eindeutig identifizierbar gemacht. Neben den Sensordaten werden außerdem Metainformationen der Rolle und zum Druckauftrag abgespeichert. Abbildung 6.2 zeigt die Struktur des Datensatzes, bei dem die inline erhobenen Sensordaten und die Metadaten über ihre jeweilige Rollen ID miteinander verknüpft sind.

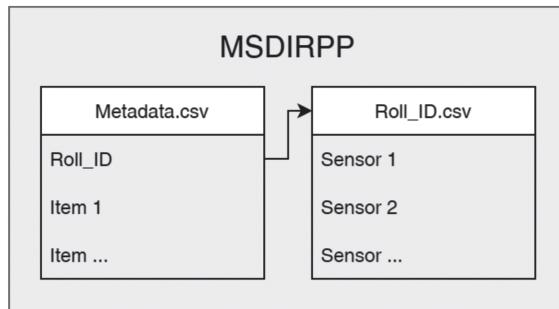


Abbildung 6.2 Strukturierung des MSDIRPP Datensatzes in Metadaten und Sensordaten, die über die Rollen ID verknüpft sind [15]

Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht aller erhobenen Metainformationen pro Rolle. Sensible Informationen bzgl. Kunden oder Lieferanten wurden über ein kategorisches Zahlensystem anonymisiert. Nicht verfügbare Informationen sind mit –1 markiert.

⁷⁴im Bezug auf die Rolle im Abwickler, da die Rollenlänge an der Aufwicklung sich stark unterscheiden kann und dadurch wenig aussagekräftig wäre. Bei der konkreten Rollendruckmaschine kann die Bahn am Ende der Maschine außerdem alternativ zur Aufwicklung auch zu Bogen verarbeitet und auf Palette gestapelt werden, wodurch sich nochmals völlig andere Datensequenzen ergeben würden.

Column name	Unit	Type	valid within each	Data source	Values
Roll_ID	-	numerical	-	data recorder	[10001, (...), 17608]
SignalFile	-	textual	-	data recorder	[10001.csv, (...), 17608.csv]
TimeStamp	-	temporal	-	data recorder	[value]
Date	-	temporal	-	data recorder	[value]
Start_Time	-	temporal	-	data recorder	[value]
End_Time	-	temporal	-	data recorder	[value]
Roll_Nr	-	categorical	Batch_Nr	extern metadata	[-1, 1, 2, (...)]
Roll_CD_Position	-	categorical	Supplier	extern metadata	[-1, 1, 2, (...)]
Batch_Nr	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1, 2, (...), 246]
Material	-	categorical	-	extern metadata	[-1, C01, C02, C03, GC1, GC2, GZ1]
Web_Width_[mm]	mm	numerical	-	extern metadata	[-1, value]
Grammage_[g/qm]	g/m ²	numerical	-	extern metadata	[-1, value]
Factory	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1, 2, (...), 13]
Supplier	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1, 2, (...), 9]
Converting	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1(Sheet), 2(Roll)]
Order_Nr	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1, 2, (...), 634]
WebGuiding_Ref_Edge	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1(OS), 2(DS), 3(Center)]
Unwinding_Shift	-	categorical	-	extern metadata	[-1, 1, 2]
Cylinder_Circumference_[mm]	mm	numerical	-	signal files	[-1, value]
Roll_UW_Core_Diameter_[mm]	mm	numerical	-	signal files	[-1, value]
Caliper_[mm]	mm	numerical	-	signal files	[-1, value]
Steady_State_Data_[m]	m	numerical	-	signal files	[-1, value]
Real_Run_Length_[m]	m	numerical	-	signal files	[-1, value]
State_Reg_PU02	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU03	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU04	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU05	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU06	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU07	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU08	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU09	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU10	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU11	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_PU12	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_EU01	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]
State_Reg_EU02	-	logical	-	signal files	[-1, 0, 1]

Tabelle 6.1 Übersicht verfügbarer Metadaten je Rolle im MSDIRPP Datensatz [15]

Tabelle 6.2 zeigt eine Übersicht der Inline-Sensordaten, inklusive Messposition in MD relativ zum Abwickler, der Messauflösung (Resolution), der Zeitauflösung (Sampling) und die jeweiligen Messeinheiten.⁷⁵

⁷⁵ „Web Tension“ beschreibt hier den Bahnzug und nicht die Bahnnspannung.

Nr	Measurement	Unit	MD Pos.	CD Pos.	Objective	Unit (Meas.)	Resolution	Sampling	Sensor
1	Web Moisture	UW	0 m	center	rel. moisture	%	-	> 100 Hz	infrared
2	Web Speed	Drive	0 m	-	speed	m/min	-	> 100 Hz	encoder
3	Roll Diameter	UW	0 m	center	distance	mm	-	> 100 Hz	laser distance
4	Web Tension	UW	2 m	CD	force	N	-	> 100 Hz	strain gauge
5	Web Tension	IPU	19 m	CD	force	N	-	> 100 Hz	strain gauge
6	Web Tension	PU7	78 m	CD	force	N	-	> 100 Hz	strain gauge
7	Web Tension	PU12	137 m	CD	force	N	-	> 100 Hz	strain gauge
8	Web Tension	EU	154 m	CD	force	N	-	> 100 Hz	strain gauge
9	Web Tension	CC	178 m	CD	force	N	-	> 100 Hz	strain gauge
10	Dancer Movement	UW	2 m	CD	movement	%	-	> 100 Hz	potentiometer
11	Dancer Movement	RW	170 m	CD	movement	%	-	> 100 Hz	potentiometer
12	Web Edge	UW	2 m	DS	position	mm	0.005 mm	500 Hz	CCD
13	Web Edge 1 + 2	WGS	18 m	OS + DS	position	mm	0.001 mm	500 Hz	infrared
14	Web Edge	PU2	20 m	DS	position	mm	0.005 mm	500 Hz	CCD
15	Web Edge	PU7	88 m	DS	position	mm	0.005 mm	500 Hz	CCD
16	Web Edge	PU10	112 m	DS	position	mm	0.005 mm	500 Hz	CCD
17	Web Edge	PU11	135 m	DS	position	mm	0.005 mm	500 Hz	CCD
18, 19	Register CD + MD	PU2	23 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
20, 21	Register CD + MD	PU3	35 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
22, 23	Register CD + MD	PU4	46 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
24, 25	Register CD + MD	PU5	59 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
26, 27	Register CD + MD	PU6	70 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
28, 29	Register CD + MD	PU7	81 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
30, 31	Register CD + MD	PU8	93 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
32, 33	Register CD + MD	PU9	105 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
34, 35	Register CD + MD	PU10	117 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
36, 37	Register CD + MD	PU11	129 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
38, 39	Register CD + MD	PU12	141 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
40, 41	Register CD + MD	EU1	157 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast
42, 43	Register CD + MD	EU2	157 m	OS	misregister	mm	0.005 mm	1/cyl. turn	contrast

Tabelle 6.2 Übersicht verfügbarer Sensordaten je Rolle im MSDIRPP Datensatz [15]

Die Inline-Datenerfassung wurde mit Hilfe des Datenerfassungssystems „iba“ [31] mit einer festen Abtastrate von $f_s = 100 \text{ Hz}$ durchgeführt, wobei immer der letzte erfasste Wert eines Sensors an das System übermittelt wird. So haben alle Signale datentechnisch zunächst dieselbe Zeitauflösung.⁷⁶

Der Datensatz erfasst nicht alle auf den Druckprozess einwirkenden Einflüsse und Effekte. Er zeigt nur einen spezifischen Ausschnitt, der für diese Arbeit besonders relevanten Aspekte, die mit einem vertretbaren Aufwand und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln aufgezeichnet werden konnten.⁷⁷

⁷⁶In der späteren spektralen Interpretation der Daten müssen die unterschiedlichen nativen Abtastraten der Sensoren wieder berücksichtigt werden, da es zu Alias Effekten kommen kann. Insbesondere bei den einmal pro Rapport abgetasteten Registerdaten ist das relevant (siehe S.248).

⁷⁷Beispielsweise wurden keine Informationen zur Parametrierung von Bahnspannungsregelung, Bahnlaufregelung, Registerregelung oder der Trockner aufgezeichnet. Mechanische Veränderungen an der Maschine, Wartungsarbeiten, manuelle Eingriffen durch Maschinenbediener oder allgemeine Betriebsstörungen wurden ebenfalls nicht aufgezeichnet.

6.1.3 Datenexploration

Materialien Der Datensatz enthält insgesamt 7608 Rollen mit 43 181 km Material, wobei mindestens 87 % der Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem stationären Maschinenbetrieb entstanden sind.⁷⁸

Aufgrund der Auftragsstruktur, die mit der Druckmaschine produziert wird, sind im Datensatz hauptsächlich Daten zu mehrlagigen und gestrichenen Kartonmaterialien im Bereich von $210\text{g}/\text{m}^2$ bis $240\text{g}/\text{m}^2$ enthalten. Tabelle 6.3 zeigt einige Informationen zu Rollenzahl, Gesamt-Laufmeter, Median der Laufmeter auf einer Rolle, Median des Flächengewichts, Median der Bahnbreite und Median der Materialdicke zu den verschiedenen verarbeiteten Materialien.

Material	Description	Rolls	Total run length [km]	Steady state [km]	Roll length median [m]	Grammage median [g/m^2]	Web width median [mm]	Caliper median [mm]
GC1	Coated FBB*, white back	3879	20458	18065	5352	220	743	0.316
GC2	Coated FBB*, bright back	44	228	201	5218	210	705	0.33
GZ1	Coated SBB*	3151	18300	15720	5654	240	835	0.291
C01	Custom specific	12	172	165	14290	70	757	0.052
C02	Custom specific	135	2174	2031	16387	80	1015	0.073
C03	Custom specific	29	222	208	7707	-1	-1	0.148
-1	no information	358	1627	1328	4933	-1	-1	0.336
Total		7608	43181	37718				

* according to DIN 19303

Tabelle 6.3 Übersicht der verarbeiteten Materialien im MSDIRPP Datensatz [15]

Die Substrate stammen von einigen wenigen Papierfabriken. Durch die spezifische Auftragsstruktur führt dies zu einer sehr ungleichmäßigen Verteilung verfügbarer Daten von Rollen bzgl. verschiedener Papierhersteller.

Datenverfügbarkeit Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Analyse der Daten ist, dass nicht für jede Rolle immer Sensoren verfügbar waren und valide Daten erfasst wurden. In manchen Fällen gab es außerdem keine oder nur eingeschränkten Zugriff auf Metainformationen.

Die Datenverfügbarkeit bzgl. der Registersensoren ist entlang der Druckmaschine nicht einheitlich, da je nach Auftrag nicht immer alle Druckwerke genutzt werden. Prinzipiell

⁷⁸In dieser Arbeit werden nicht nur stationäre Daten gezeigt, sondern auch instationäre Betriebszustände. Die Zahl dient lediglich zur besseren Einschätzung unter welchen Produktionsbedingungen der Großteil der Daten entstanden ist. Das genaue Vorgehen zur Ermittlung der stationären und instationären Betriebszustände, kann in [15] eingesehen werden.

werden die in Bahntransportrichtung hinteren Druckwerke bevorzugt genutzt. Die vorderen Druckwerke bleiben bei Aufträgen mit wenigen Farben dann ungenutzt, wodurch die Registersensoren der vorderen Druckwerke häufig dann nur Messrauschen aufweisen. Die Datenverfügbarkeit ist also für hintere Druckwerke deutlich höher als für vordere Druckwerke. Abbildung 6.3 zeigt die Datenverfügbarkeit der Registersensoren entlang der Druckmaschine.

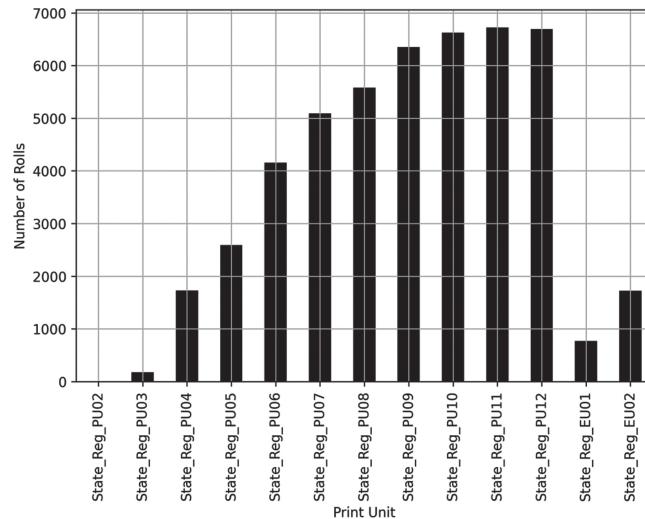


Abbildung 6.3 Ungleichmäßige Datenverfügbarkeit der Registersensoren im MSDIRPP
Datensatz [15], aufgrund einer auftragsspezifischen Anzahl und Verteilung der genutzten
Druckwerke

Auch bei den Bahnkantensensoren ist die Datenverfügbarkeit entlang der Druckmaschine stark unterschiedlich und insgesamt eingeschränkt, weil auf eine automatisierte Nachführung der Bahnkantensensoren verzichtet wurde. Aufgrund der ständigen Jobwechsel und den damit einhergehenden Materialwechsel⁷⁹ kommt es relativ häufig dazu, dass die fix montierten Bahnkantensensoren keine Daten erfassen, weil die Bahn seitlich aus dem Messbereich läuft. Die Datenmenge für valide Bahnkantenmessungen im Bahnabschnitt „Druck“ liegt deshalb bei etwa 50 % aller verarbeiteten Rollen. Die valide Datenmenge der Bahnkantenbeobachtung direkt nach der Abwicklung (WE_{UW}) ist mit ca. 80 % deutlich größer.

Bei den Bahnspannungssensoren und der Bahnfeuchtigkeitsmessung liegt die Datenverfügbarkeit dagegen bei nahezu 100 %, da die Bahn diese Sensoren immer innerhalb des Messbereiches passieren und es dadurch kaum zu Fehlmessungen kommt.

⁷⁹Äußert sich z.B. in einer anderen Bahnbreite oder einem völlig anderem seitlichen Bahnlaufverhalten entlang der Maschine (Drift).

6.1.4 Datenvorverarbeitung

Aufgrund der sequentiellen Verarbeitung im Rolle-zu-Rolle Verfahren und den verteilten Sensoren entlang der Druckmaschine, sind die Messdaten bzgl. desselben Ortes auf der Materialbahn, phasenverschoben bzw. zeitversetzt. Die Phasenverschiebung ist von der Sensorposition in MD und der Bahngeschwindigkeit abhängig. Um eine bzgl. der Materialbahn ortsaufgelöste Analyse aller Prozess- und Qualitätsdaten unabhängig von der ursprünglichen Prozessgeschwindigkeit⁸⁰ zu ermöglichen, werden Signale in drei Schritten vorverarbeitet:

1. Zunächst wird der kontinuierliche Datenstrom bei jedem Rollenwechsel am Abwickler auf Basis des Abschlagmesserimpulses unterbrochen. Dadurch wird pro Rolle eine separate Datei erzeugt, die sämtliche Messdaten dieser Rolle beinhaltet.
2. Zur Umformung der Zeitreihen $x_i(t_i)$ auf einer von der Maschinengeschwindigkeit unabhängigen Zeitachse \hat{t}_i , werden die Zeitstempel t_i der Signale über ihre sensorspezifischen mittleren Zeitkonstanten τ_i entsprechend ihrer MD-Position l_i in der Druckmaschine, relativ zur Abwicklung mit $l_{UW} = 0$ m und der Bahngeschwindigkeit v angepasst. Dadurch wird das Signal entsprechend des Weges zwischen den Sensoren so verschoben, dass alle Sensordaten zusammen einer Bahnposition zugeordnet sind. Abweichungen von der material- und bahnspannungsbedingten mittleren Zeitkonstante durch Bahndehnungsänderungen werden nicht berücksichtigt.

$$\tau_i = \frac{l_i}{v} \quad (6.1)$$

$$\hat{t}_i = t_i - \tau_i \quad (6.2)$$

$$x_i(t_i) \Rightarrow x_i(\hat{t}_i) \quad (6.3)$$

3. Schließlich werden diese neuen Zeitreihen mit einer neuen äquidistanten Auflösung von $f_s = 10/\text{m}$ abgetastet. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiss aus einer möglichst hohen Zeitauflösung für die Analyse und einem möglichst geringen Datenvolumen hinsichtlich des Speicherbedarfs und der Verarbeitungsgeschwindigkeit dar.

Merke: Die so aufbereiteten rollenspezifischen Messsignale sind zum Zwecke einer einfachen Vergleichbarkeit der darin enthaltenen Effekte bzw. Störungen,

⁸⁰auch als *laufmetersynchrone* Analyse bezeichnet

welche aus den verschiedenen Teilprozessen mit sehr unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten stammen, nun bzgl. der Laufmeter synchronisiert und damit ortsaufgelöst.

6.1.5 Übertragungskanäle

Tabelle 6.4 zeigt die Frequenzbereiche und Bandbreiten der einzelnen Übertragungskanäle im schlechtesten Fall. Die Werte ergeben sich aus den sensorspezifischen fixen Abtastraten (siehe „Resolution“ in Tabelle 6.2), der fixen Abtastrate des Datenloggers ($f_s = 100 \text{ Hz}$), der maximalen Bahngeschwindigkeit ($v_{Web} = 150 \text{ m/min}$) sowie der Datenvorverarbeitung, bei der die Messdaten mit einer neuen äquidistanten Ortsauflösung von $f_s = 10/\text{m}$ erneut abgetastet werden (siehe Kapitel 6.1.4).

Sensor	Abtastrate f_s [m^{-1}]	Wellenzahl k [m^{-1}]	Wellenlänge λ [m]	Bandbreite B [m^{-1}]
Bahnkante	10	0 - 5	∞ - 0.2	5
Bahnspannung	10	0 - 5	∞ - 0.2	5
Tänzerbewegung	10	0 - 5	∞ - 0.2	5
Bahnfeuchtigkeit	10	0 - 5	∞ - 0.2	5
Register	1/RL	0 - RL/2	∞ - 2RL	RL/2

Tabelle 6.4 Frequenzbereiche bzw. Bandbreiten der durch die einzelnen Sensoren abgetasteten Übertragungskanäle (RL = Rapportlänge)

6.2 Orts-Frequenz Spektrogramm

6.2.1 Implementierung und Parametrierung

Zur Visualisierung der laufmetersynchronen Messsignale als Spektrogramm, wird eine Open-Source Implementierung der STFT (siehe Kapitel 3.2.2.3) in Python genutzt [92].

Zum Zwecke der Vergleichbarkeit der Spektrogramme untereinander und des Kompromisses aus Orts- und Frequenzauflösung, dem Datenvolumen und optischen Aspekten, wird eine im Grundsatz identische Parametrierung für alle in der Arbeit vorliegenden Spektrogramme genutzt. Nur im Einzelfall werden davon abweichende Einstellungen genutzt, um Details besser sichtbar zu machen.

Da in den Untersuchungen primär die Schwankungscharakteristik im Fokus steht, wird der Gleichanteil abweichend zu Abbildung 3.38 (S.60) für jeden Zeitrahmen der STFT

über eine gleitende Mittelwertbildung unterdrückt. Ohne diese Unterdrückung würden die teilweise sehr großen Werte im Gleichanteil, im Vergleich zu den relativ kleinen Schwankungen, aufgrund des Leck-Effektes, einen Teil des niedrigen Frequenzbereiches überdecken. Sprünge im Gleichanteil können weiterhin als kurzzeitige Anregung sehr vieler niedriger Frequenzen und damit als vertikale nach oben auslaufende Linie im Spektrogramm sichtbar gemacht werden und bleiben daher als charakteristisches Merkmal für die Analyse weiter erhalten.

Zur Realisierung einer klaren Abzeichnung der Frequenzmuster (Nutzsignalanteil) gegen den Hintergrund (Störanteil) muss der Leck-Effektes möglichst gering gehalten werden, weshalb in dieser Arbeit immer das Hann-Fenster genutzt wird. Die Fensterbreite wird für die meisten der nachfolgenden Untersuchungen mit $N = 112$ m gewählt. Dies ist ein guter Kompromiss zwischen Frequenz- und Ortsauflösung für viele unterschiedliche Effekte, die im Basisband der Übertragungskanäle auftreten. Im Einzelfall wird für besonders niederfrequente Effekte die Fensterbreite teilweise auch auf $N = 224$ m verdoppelt (bessere Frequenzauflösung) und für sehr hochfrequente Effekte auf $N = 56$ m halbiert (bessere Ortsauflösung).

Der Hop-Parameter wird mit $H = \frac{N}{8}$ gewählt. Das bedeutet es wird alle 14 m eine Frequenzanalyse über die Fensterlänge durchgeführt. Nach Gleichung 3.24 (S.55) ergibt sich für eine 5000 m lange Rolle bei $f_s = 10$ / m ein Spektrogramm mit etwa 350 diskreten Einzelspektren bzw. Pixeln in der Breite. Die Frequenzauflösung ergibt sich über Gleichung 3.27 bei gegebenem f_s und einer Fensterlänge von 112 m zu 560 Frequenzkoeffizienten bzw. Pixeln in der Höhe.

Falls die Frequenzanalysen nicht ganzzahlig in die Signallänge passen, werden die Signale zum Ende nicht aufgefüllt. Da sich pro Rollenzyklus in der Regel genügend Frequenzanalysen ergeben, kann auf den letzten Pixel im Spektrogramm bzw. die letzten 14 m der Rolle für die Analyse verzichtet werden.

6.2.2 Achsen und Wertebereich

X-Achse Die x-Achse ist abweichend zur allgemeinen Formulierung des Spektrogramms als Zeit-Frequenz-Repräsentation (siehe Kapitel 3.2.2.4) aufgrund des Ortsbezugs der Messdaten bzgl. der Materialbahn, genau genommen nicht die Zeitachse, sondern die Ortsachse. Sie wird in den Orts-Frequenzspektrogrammen über den Koeffizienten m in Meter ausgedrückt. Die Schrittweite bei $H = \frac{N}{8}$ liegt bei 14 m.⁸¹ Die Schrittweite und

⁸¹Entspricht bei einer mittleren Druckgeschwindigkeit von 150 m/min = 2,5 m/s einer Schrittweite von 5,6 s.

die Fensterbreite ergibt eine Ortsauflösung im Spektrogramm, die hoch genug ist um die Frequenzänderungen über einen Rollenzyklus gut aufzulösen. Die Ortsauflösung ist aber weiterhin grob genug, um leichte Abweichungen der fest definierten Zeitkonstanten der Sensoren τ_i durch material und bahnspannungsspezifischen Bahndehungseigenschaften zu vernachlässigen, sodass die Spektrogramme der unterschiedlichen Sensoren entlang der Maschine weiterhin pixelgenau miteinander vergleichbar sind.

Y-Achse Die y-Achse ist abweichend zur allgemeinen Formulierung des Spektrogramms als Zeit-Frequenz-Repräsentation (siehe Kapitel 3.2.2.4) aufgrund des Ortsbezugs der Messdaten bzgl. der Materialbahn genau genommen nicht die Frequenzachse sondern die Ortsfrequenzachse.⁸² Aufgrund der örtlichen Auflösung der Signale und unter Berücksichtigung des NYQUIST-SHANNON-Theorems steht für die meisten Sensoren theoretisch das Frequenzband von 0/m bis 5/m zur Verfügung (siehe Tabelle 6.4). Da die meisten Effekte bereits im Basisband von 0/m bis 2/m erkennbar sind, wird für die meisten Spektrogramme nur dieser Frequenzbereich als Ausschnitt der gesamten STFT-Matrix visualisiert. Da das Register, im Gegensatz zu den anderen Übertragungskanälen, nur einmal pro Rapport abgetastet wird, wird die y-Achse hier für den schlechtesten Fall, nämlich für eine maximale Rapportlänge von 1 m auf 0/m bis 0,5/m begrenzt.⁸³

Z-Achse Die z-Achse im Betragsspektrogramm \hat{X} stellt die Amplitude dar. In Anlehnung an Gleichung 3.12 wird es über die Gleichung 6.4 zu einem *absoluten Pegel-Spektrogramm* bzgl. eines Referenz Spektrogramms \hat{X}_{ref} mit der Amplitude 1, für alle Frequenz- und Ortskoeffizienten und bzgl. der verschiedenen Messeinheiten der Sensoren transformiert. Die Logarithmierung sorgt dafür, dass ein sehr großer Wertebereich grafisch über die Farbskala dargestellt werden kann.⁸⁴ Dies vereinfacht die Darstellungen wenn Spektrogramme verschiedener Sensoren miteinander verglichen werden, da man sich stets auf die Amplitude 1 der jeweiligen Messeinheit (siehe Tabelle 6.2) bezieht.

$$\hat{X}[m, k] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\hat{X}[m, k]}{\hat{X}_{ref}[m, k]} \right) \text{dB} \quad (6.4)$$

Der Wertebereich der z-Achse wird für jeden Sensortyp einheitlich angepasst, sodass der Nutzsignal-Anteil zweckmäßig im Dynamikumfang der Farbachse liegt. Die Spektrogramm-

⁸²Zur besseren Lesbarkeit wird nachfolgend jedoch i.d.R. der Begriff Frequenz statt Ortsfrequenz benutzt.

⁸³Bei kürzeren Rapportlängen ist die Auflösung zwar besser und es ist theoretisch auch ein breiterer Frequenzbereich im Spektrogramm darstellbar. Im Sinne der Einheitlichkeit in der Datenvisualisierung, werden alle Registerdaten jedoch im gleichen Frequenzbereich von 0/m bis 0,5/m visualisiert.

⁸⁴Die Multiplikation mit 10 skaliert den Wertebereich auf größere Zahlen und man kann verallgemeinert die Pseudoeinheit dB nutzen. Der Ausdruck in dB ist hier zweckmäßig, da es in der Analyse nicht um den absoluten Wert geht, sondern stets um die Relation der Signalanteile.

me gleicher Sensortypen sind damit direkt miteinander vergleichbar. Spektrogramme unterschiedlicher Sensortypen können nur hinsichtlich der Ähnlichkeit der darin enthaltenen Orts-Frequenzsignaturen miteinander verglichen werden. Am Beispiel der Bahnkante wird das Vorgehen zur Bestimmung eines geeigneten Wertebereiches der z-Achse erläutert. Für andere Sensoren ergeben sich andere Wertebereiche.

Die Sensorsauflösung des Bahnkantensensors beträgt 0,005 mm (siehe „Resolution“ in Tabelle 6.2), was -23 dB bei einem Bezug auf eine Amplitude von 1 mm entspricht. Da sich der Wertebereich des Signalrauschen und der Nutzsignalbereich potentiell überlappen können, wird der Wertebereich am unteren Ende auf -30 dB begrenzt, so können auch noch Informationen im Überlappungsbereich mit aufgelöst werden. Zur Unterscheidung zwischen Stör- und Nutzsignalanteil in diesem Bereich hilft die Tatsache, dass die meisten Nutzsignale sich nicht als stochastisches Rauschen über alle Frequenzanteile gleichmäßig verteilen⁸⁵, sondern sich als sehr spezifische Orts-Frequenzsignaturen darstellen.

Der Amplitudengrenzbereich wird am oberen Ende bei 0 dB begrenzt, was einer Amplitude von 1 mm entspricht. Bei transienten Phasen bzw. instationären Betriebszuständen existieren zwar deutlich größere Amplituden in den Signalen, aber in den Untersuchungen geht es primär darum, die verborgenen Strukturen der Schwankungen in den stationären Phasen zu analysieren. Schwankungen mit $\hat{X} > 1 \text{ mm}$ bzw. 0 dB werden daher zu Gunsten eines höheren Dynamikumfangs für kleine Amplituden ggf. am oberen Amplitudengrenzbereich begrenzt.

Grundsätzlich führen andere STFT- und Spektrogramm-Parameter zu Pixelbildern mit einem anderen Erscheinungsbild. Die hier gewählten Parameter dienen dem Zweck dieser Arbeit und werden in Tabelle 6.5 nochmals zusammengefasst.

Parameter	Wert	Einheit
Spektrogramm Typ	Betrags-Spektrogramm	–
Fenster	Hann	–
Fensterbreite N	224, 112, 56	m
Hop Parameter H	$\frac{N}{8} = 28, 14, 7$	m
DC-Unterdrückung	pro Segment	–
z-Achse	$[-30, 0]$	dB
y-Achse	$[0, 5], [0, 2], [0, 0.5]$	1/m
x-Achse	Rollenlänge	m
Shading	nearest	–
Farb Tiefe	8 Bit = 256 Werte pro Farbkanal	Bit
Geschwärzte Amplituden	256ter Wert, ($\hat{X} > -29,921\,875 \text{ dB}$)	–

Tabelle 6.5 STFT Parametrierung und Spektrogramm Einstellungen

⁸⁵auch weißes Rauschen genannt

Nachfolgend sei in Abbildung 6.4 beispielhaft die Bahnkantenmessung der Rolle ID 10277 direkt nach der Abwicklung (WE_{UW}) als Spektrogramm (STFT) im Vergleich zur Zeitreihe und zum einfachen Spektrum (DFT) über den kompletten Rollenzyklus gezeigt.

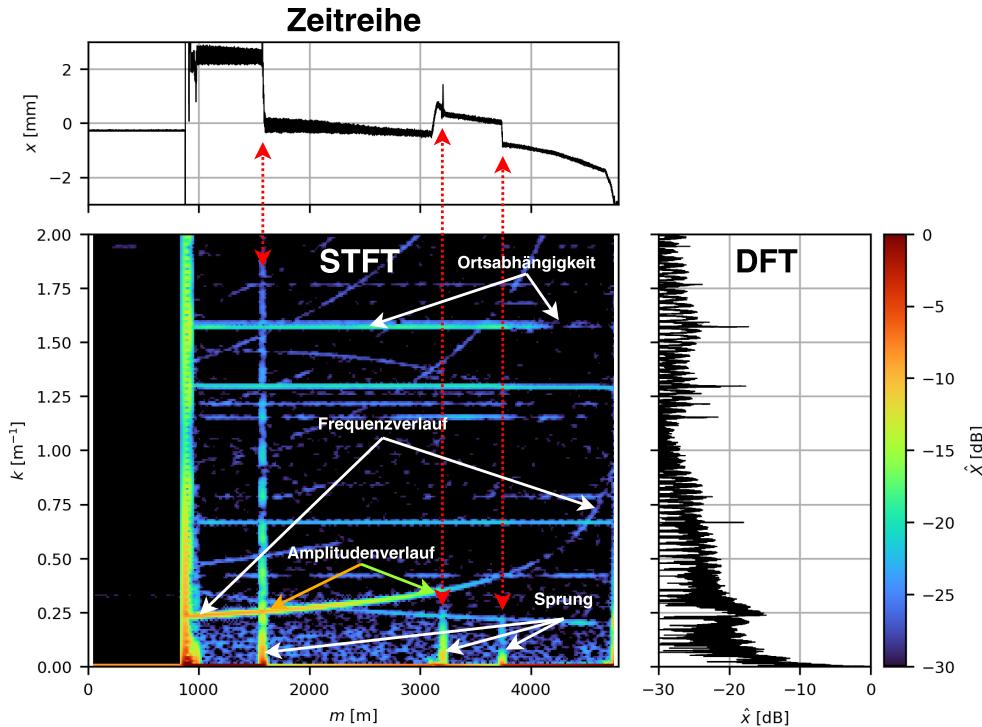


Abbildung 6.4 Beispielhafte Visualisierung einer Bahnkantenmessreihe (ID 10277) als Zeitreihe (oben links), als einfaches Spektrum per DFT (unten rechts) und als Orts-Frequenz Spektrogramm per STFT (unten links)

Es wird sehr deutlich, dass die vielen Informationen im Spektrogramm als Zeitreihendarstellung und als einfaches Spektrum verborgen bleiben und visuell nicht einfach zugänglich sind. Die frequenzmäßige Zusammensetzung des Signals kann im Spektrogramm, im Gegensatz zur DFT, auch bei komplexen Signalen mit Sprüngen, abfallendem Mittelwert und zwischenzeitlichem Verlust des Messsignals, sehr gut veranschaulicht werden.

Durch die spezifische Skalierung der z-Achse werden also sehr kleine und sehr große Abweichungen sichtbar. Man erkennt, dass Amplituden mit $\hat{X} < -23$ dB (entspricht Ortsauflösung der Bahnkantensensoren) offensichtlich nicht stochastischen Orts-Frequenzstrukturen folgen und daher auch im Überlappungsbereich als potentielle Nutzsignale identifiziert werden können.

Grundsätzlich zeigt sich eine ähnliche Vielfalt an Effekten, wie im konstruierten Signalbeispiel in Abbildung 3.38 (S.60) dargestellt. Es sind u. a. Sprungstellen, Frequenz- und

Amplitudenverläufe, konstante Frequenzen sowie über die Zeit kontinuierliche Frequenzmusterverläufe und eine allgemeine Ortsabhängigkeit der Effekte zu sehen. Diese werden an dieser Stelle in ihrer semantischen Bedeutung nicht weiter interpretiert.

Merke: Aufgrund der verschiedenen sich kontinuierlich fortsetzenden Linienstrukturen wird vermutet, dass es sich um mehrere unterschiedliche Informationen handelt, die in der Bahnkante beobachtet werden können. Zur semantischen Analyse der Nutzsignalanteile bedarf es einer Interpretationsstrategie, die eine systematische Differenzierung der Einzelinformationen ermöglicht, um sie schließlich ihren Ursachen zuzuordnen.

6.3 Interpretationsstrategie

Durch die Visualisierung als Orts-Frequenz Spektrogramm wird deutlich, dass am Beispiel realer Bahnkantendaten offensichtlich viele einander überlagerte und potentiell auch miteinander vermischtene Nutzsignale enthalten sind. Die nachfolgenden Abschnitte zeigen Methoden zur Gegenüberstellung, Differenzierung und Strukturierung der einzelnen Effekte um diese schließlich ihren Grundursachen systematisch zu ordnen zu können. Hierzu werden Konzepte aus der analogen Informationsübertragung der Nachrichtentechnik genutzt. Zum einen werden die verschiedenen Informationen im Übertragungskanal „Bahnkante“ durch ein spezielles Demultiplexing Konzept voneinander differenziert. Zum anderen werden einige Orts-Frequenz Signaturen per Signalsynthese an einem finiten Wickelmodell virtuell rekonstruiert, um die zugrundeliegende Systematik in der Signatur prinzipiell zu erläutern. Die Methoden werden anhand der Bahnkantendaten exemplarisch durchgeführt.

6.3.1 Manuelle Datenexploration

Dimensionalität der Daten Grundsätzlich besitzt der Datensatz 2 Hauptdimensionen, nämlich die Rollen (7608) und die verschiedenen Sensoren (43). Hinzu kommen die Dimensionen aus den Metadaten, welche jede individuelle Rolle spezifiziert (>23). Die in jeder einzelnen Messreihe enthaltenen Orts-Frequenzsignaturen stellen jeweils weitere Dimensionen dar, wenn es darum geht, diese hinsichtlich ihrer Abhängigkeit zu anderen Aspekten wie z.B. bestimmten Metadaten zu untersuchen.

Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, für unterschiedlichste Gesichtspunkte in der Untersuchung, aussagekräftige Subsets⁸⁶ zu finden. Aufgrund der hohen Dimensionalität

⁸⁶Eine spezifische Teilmenge des gesamten Datensatzes.

des Datensatzes sowie der hohen Spezifität jeder einzelnen Rolle, verbleiben je nach Untersuchungsabsicht teilweise nur noch eine vergleichsweise kleine Untergruppe geeigneter Daten. Die Tatsache, dass nicht für alle Rollen immer alle Sensordaten und/oder Metadaten zur Verfügung stehen (siehe S.6.1.3), reduziert die Anzahl geeigneter Datenpaare für die Analyse je nach Untersuchungsziel weiter.

Vor diesem Hintergrund (Individualität und Inhomogenität der Daten) sind statistische Auswertungen der Daten nur eingeschränkt sinnvoll und stehen daher in dieser Arbeit auch nicht im Vordergrund. Vielmehr soll anhand von möglichst aussagekräftigen Einzelbeispielen, die jeweils zugrundeliegende Entstehungssystematik von relevanten und sich häufig wiederholenden Orts-Frequenzsignaturen in den Daten exemplarisch untersucht werden.

Das große Volumen, die hohe Dimensionalität und die große Spezifität der Daten ist trotz aller damit einhergehenden Herausforderungen dennoch sehr hilfreich und auch notwendig, um überhaupt eine ausreichende Anzahl an Beispielen bzgl. verschiedener auf und über die Materialbahn übertragener Informationen zu erhalten.

Vergleich der Spektrogramm Einstellungen Zur Entwicklung einer systematischen Interpretationsmethodik der Messdaten werden im ersten Schritt alle verfügbaren Signale per Orts-Frequenzanalyse als Spektrogramm aufbereitet und anschließend manuell in mehreren Durchgängen gesichtet. Mit Hilfe der Metadaten werden spezifische Subsets hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte aufbereitet und gegeneinander verglichen. Zur besseren visuellen Vergleichbarkeit der Spektrogramme werden drei unterschiedliche Darstellungsvarianten umgesetzt. Dadurch ergibt sich eine jeweils eigene Perspektive auf die Daten und ermöglicht unterschiedliche Beobachtungen, die zu verschiedenen Erkenntnissen führen. So werden die Daten zunächst manuell erkundet und Ausschau nach wiederkehrenden Mustern gehalten. Außerdem wird darauf geachtet, in welchen Konstellationen die Muster in den einzelnen Sensoren auftreten und sich ggf. entlang der Druckmaschine verändern.

Hierfür werden drei verschiedene Spektrogramm Einstellungen genutzt (siehe Tabelle 6.5). Sie offenbaren mal mehr und mal weniger detailliert verschiedene Orts-Frequenzmuster, die in den jeweils anderen Einstellungen nicht oder nur sehr schwer erkennbar sind. Abbildung 6.5 zeigt exemplarisch ein und dieselbe Messreihe (ID 13995 *WE_{UW}*) bzgl. drei unterschiedlicher Fensterbreiten *N* (224 m, 112 m, 56 m) und Bandbreiten (siehe y-Achse). In den Bahnkantendaten lassen sich in der mittlere Einstellung i.d.R. die meisten Signaturen visuell gut erfassen. Die Einstellung ist daher ein guter Kompromiss. Beispiele für Muster, die ausschließlich in den anderen beiden Einstellungen gut erkennbar sind, werden mit Pfeilen markiert. Einmal ein hochfrequenter nahezu konstanter Oberton (3x) bei ca.

3,8/m in der Darstellung ganz links. Und das Linienmuster in der Darstellung rechts, dass über den Rollenzyklus von 0,14/m auf 0,11/m in der Frequenz leicht abfällt.

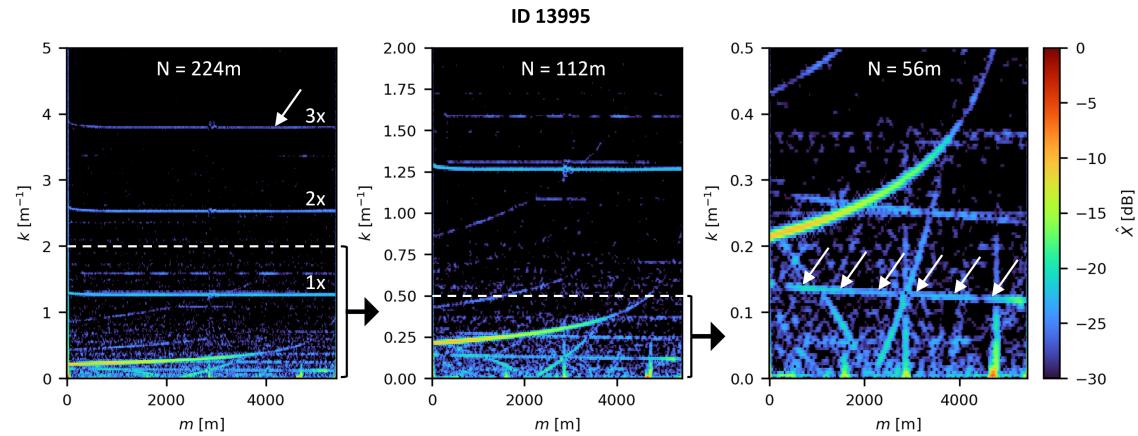


Abbildung 6.5 Unterschiedliche Spektrogramm Einstellungen derselben Bahnkantenmessung bzgl. WE_{UW} (ID 13995); Fensterbreite N von links nach rechts: 224 m, 112 m, 56 m

Vergleich über verschiedene Rollen (ein Sensor) Eine Gegenüberstellung der Spektrogramme von aufeinanderfolgenden Rollen desselben Sensors offenbart Veränderungen in den Orts-Frequenzsignaturen, die potentiell mit veränderten Rahmenbedingungen zusammenhängen (Metadaten). Abbildung 6.6 zeigt dazu exemplarisch Bahnfeuchtigkeitsdaten WM_{UW} direkt nach der Abwicklung von 58 aufeinanderfolgender Rollen (ID 11816 bis ID 11873), von zwei unterschiedlichen Papierlieferanten (Supplier), drei unterschiedlichen Lieferchargen (Batch-Nr.) und bzgl. drei verschiedener Druckaufträge (Order-Nr.). Die Abbildung zeigt alle einzelnen Spektrogramme horizontal aneinander gereiht in einem einzigen Spektrogramm.

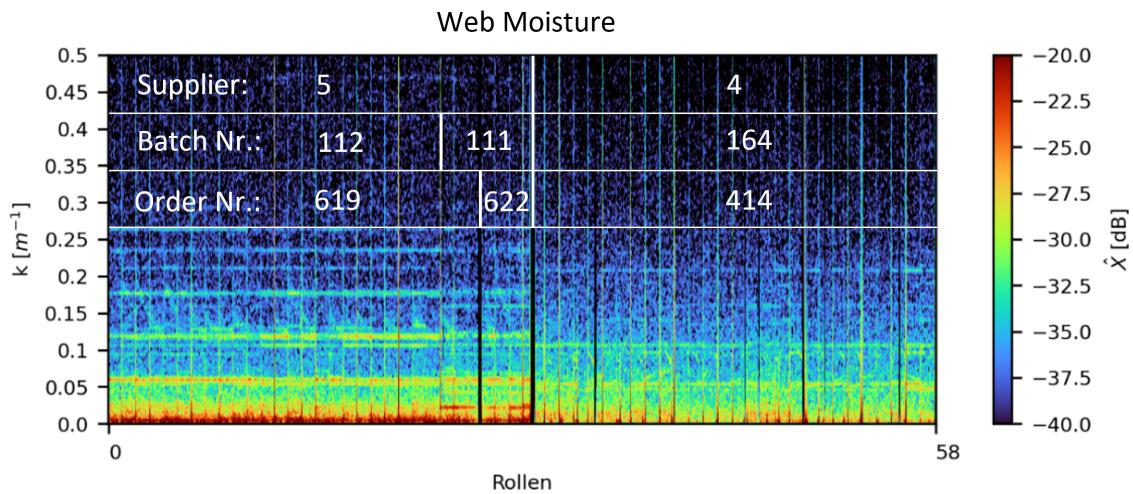


Abbildung 6.6 Veränderung der Bahnfeuchtigkeitsschwankungen (WM_{UW}) über 58 Rollen (ID 11816 bis ID 11873) im Vergleich zu drei exemplarischen Metainformationen (Supplier, Batch-Nr., Order-Nr.)

Man erkennt, dass sich die grundsätzliche spektrale Charakteristik insbesondere durch den Wechsel des Papierlieferanten und der Liefercharge verändert. Ein Einfluss durch den Auftrag ist nicht zu erkennen. Das ist insofern plausibel, weil die Bahnfeuchtigkeit sowohl vom Papierherstellungsprozess abhängig ist, als auch von Umwelteinflüssen im Transport und vom Material selbst. Die Restfeuchtigkeit im Substrat ist unabhängig von dem jeweiligen Druckauftrag.

Vergleicht man nach diesem Prinzip die für diese Arbeit besonders relevanten Bahnspannungs- und Bahnkantendaten mit den Registerdaten, zeigt sich zunächst eine weitestgehende Übereinstimmung in der spektralen Charakteristik zwischen den Bahnlauf- und den Registerstörungen. Genauer gesagt, stimmt die spektrale Charakteristik der Bahnkantendaten mit den CD-Registerdaten überein (siehe Abbildung 6.7), sowie die Bahnspannungsdaten mit den MD-Registerdaten (siehe Abbildung 6.8). Beide Messungen beziehen sich auf eine Beobachtung bei PU07.

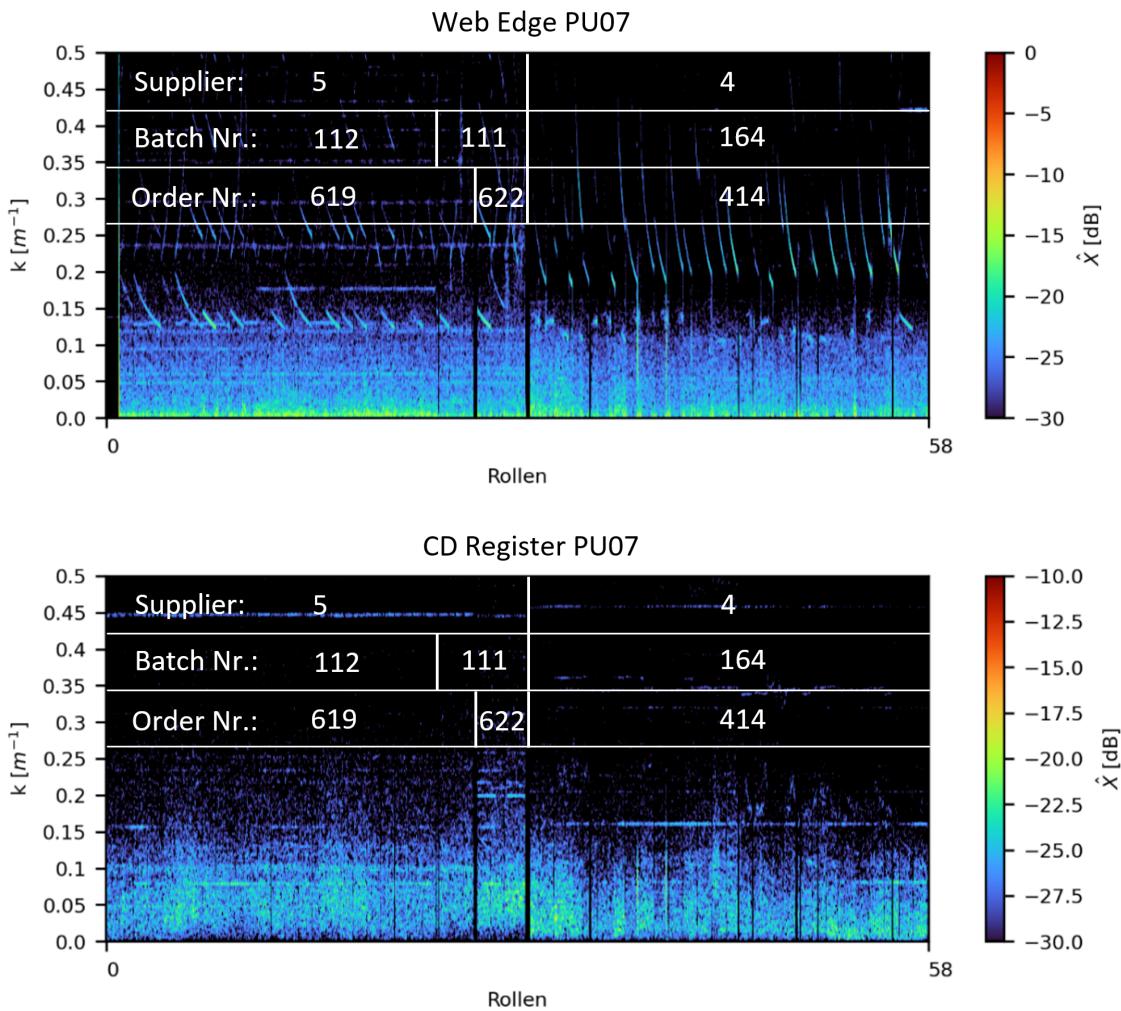


Abbildung 6.7 Vergleich von Bahnkantendaten (WE_{PU7}) und CD-Register (R_{PU7}^{CD}) bzgl. 58 aufeinanderfolgender Rollen (ID 11816 bis ID 11873) zeigen eine weitestgehende spektrale Übereinstimmung

Insbesondere der dominante niederfrequente und verrauschte Frequenzbereich ähnelt sich in beiden Sensoren weitestgehend. Die Daten unterscheiden sich beispielsweise im sehr niedrigen Frequenzbereich ($>0,05/m$), also nahe des Gleichanteils und bei einigen feineren horizontalen und gebogenen Linienmustern. Weiter soll an dieser Stelle zunächst nicht auf die spezifischen Signaturen eingegangen werden.

Abbildung 6.7 zeigt ebenfalls für PU07, derselben Rollen, den Vergleich zwischen den Bahnspannungsdaten und den MD-Registerschwankungen.

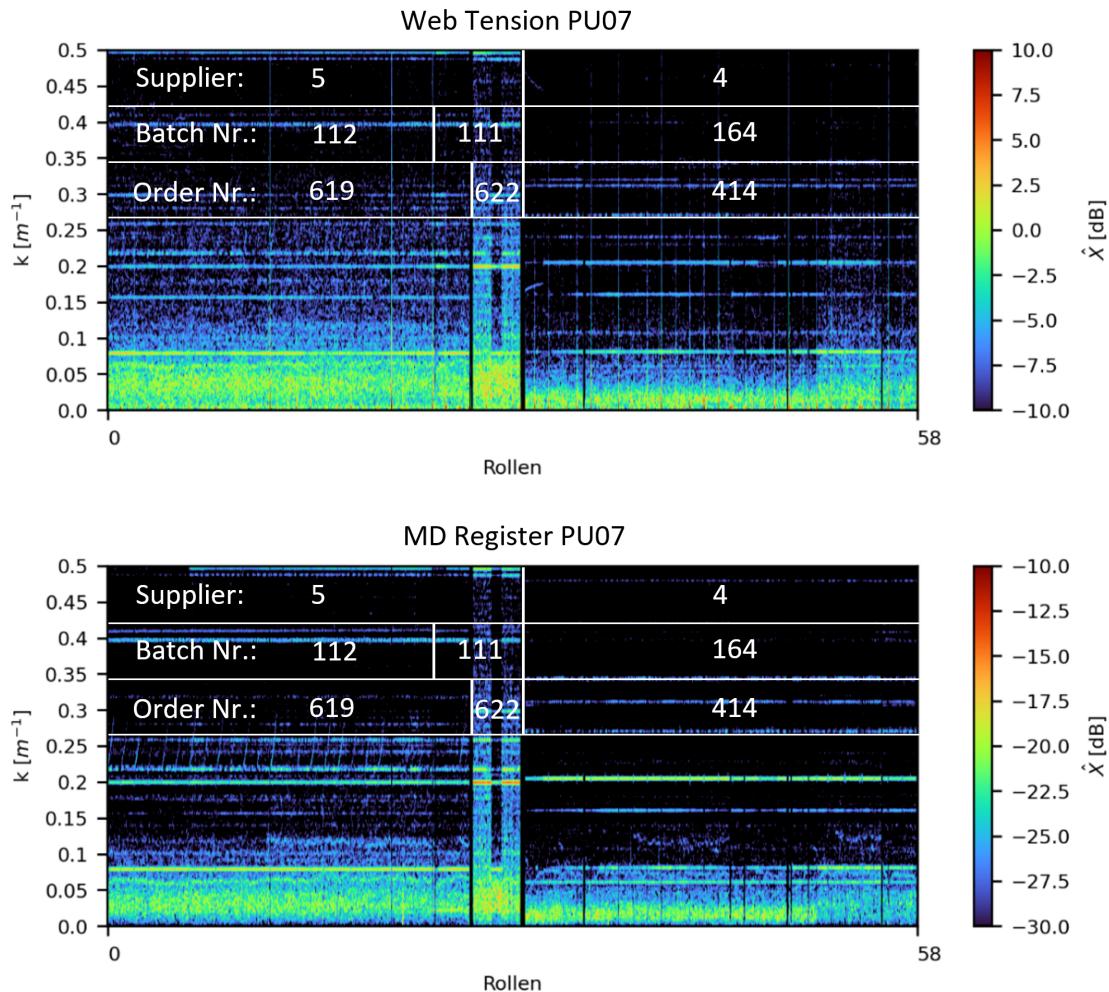


Abbildung 6.8 Vergleich von Bahnspannungsdaten (WT_{PU7}) und MD-Register (R_{PU7}^{MD}) bzgl. 58 aufeinanderfolgender Rollen (ID 11816 bis ID 11873) zeigen eine weitestgehende spektrale Übereinstimmung

Auch hier stimmt die grundlegende spektrale Charakteristik beider Sensordaten weitestgehend überein. Auffällig ist, dass in den Bahnspannungs- und MD-Registerdaten sehr viel stärker die horizontal verlaufenden Frequenzlinienmuster dominieren, als in Abbildung 6.7 (Bahnkante und CD-Register). In beiden Gegenüberstellungen (Abbildung 6.7 und 6.8) wird außerdem deutlich, dass nicht nur der Papierlieferant und dadurch höchstwahrscheinlich das Material einen Einfluss auf die Bahnbewegungen und Registerschwankungen haben, sondern auch auftragsspezifische Einflüsse. Ganz besonders gut sieht man diesen Aspekt an dem deutlichen Unterschied in den Orts-Frequenzsignaturen am Übergang von Order-Nr. 619 auf 622, wobei in beiden Aufträgen Rollen aus der Batch Nr. 111 desselben Papierlieferanten genutzt wurden. Diese Abhängigkeit sieht man im Spektrogramm der Bahnfeuchtigkeitsdaten in Abbildung 6.6 so nicht.

Vergleich über verschiedene Sensoren (eine Rolle) Ein Vergleich der Spektrogramme der verschiedenen Sensoren einer einzelnen Rolle, wie in Abbildung 6.9 exemplarisch dargestellt, macht deutlich, dass die verschiedenen Orts-Frequenzsignaturen nicht zufällig auftreten. Der Verursachung, der Übertragung auf die einzelnen Übertragungskanäle sowie hinter dem spezifischen Übertragungsverhalten entlang der Druckmaschine muss irgendeine Systematik zugrunde liegen.

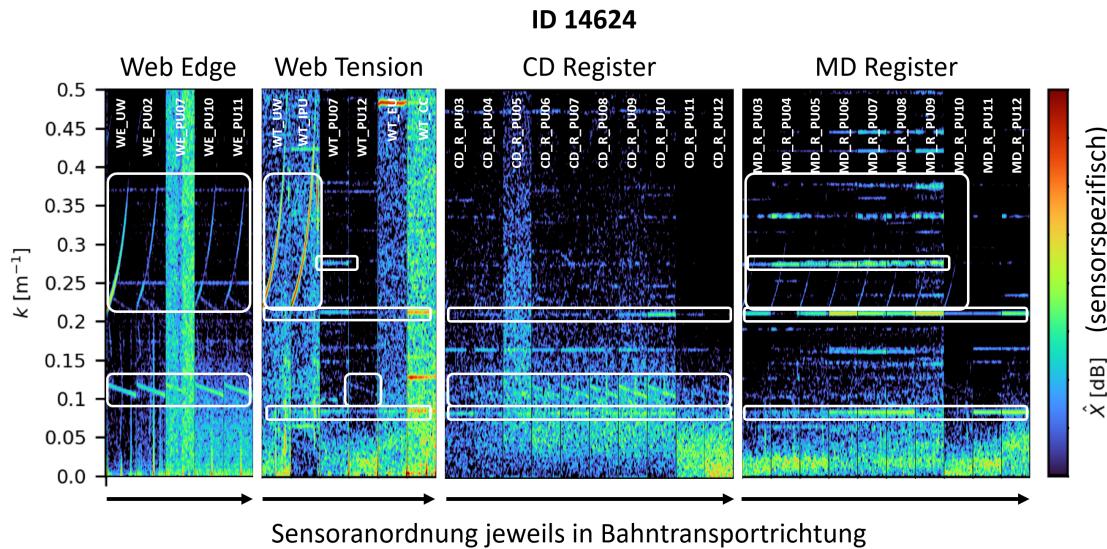


Abbildung 6.9 Vergleich der verschiedenen Sensoren einer einzelnen Rolle (ID 14624) und markierte Orts-Frequenzmuster, die sich bei verschiedenen Sensordaten wiederholen

Es zeigen sich sowohl konstant⁸⁷ als auch nicht konstant verlaufende Frequenzlinien, die in den verschiedenen Sensordaten teilweise mehrfach auftreten, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Außerdem kann unterschiedliches niederfrequentes und teilweise auch weißes Rauschen beobachtet werden. Manche Strukturen verändern sich entlang der Druckmaschine in ihrer Amplitude und ggf. auch im Spektrum, andere nicht. Bei der Rückverfolgung der Ursachen für die einzelnen Orts-Frequenzsignaturen spielt die absolute Ausprägungsstärke der einzelnen Effekte zunächst eine untergeordnete Rolle. Viel wichtiger ist die Charakteristik der Orts-Frequenzsignatur an sich und deren relative Veränderung in der Amplitude und im Spektrum entlang der Maschine.

Merke: Aufgrund der tendenziell großen Übereinstimmung der Schwankungscharakteristik der Registerdaten zu den Bahnlaufdaten wird nachfolgend zunächst der Fokus auf die Interpretation der Bahnlaufdaten gelegt, da hier i.d.R.

⁸⁷bzgl. der Frequenz und nicht bzgl. der Amplitude

mehr Muster und damit Informationen enthalten sind und diese Daten auch höher ortsaufgelöst sind als die Registerdaten.

Ein Vergleich der Spektrogramme eines einzelnen SensorTyps (z.B. nur Bahnkantensensoren) entlang der Druckmaschine zeigt die spezifischen Veränderungen einzelner Ortsfrequenzmuster in Transportrichtung besonders deutlich. Abbildung 6.10 zeigt dazu exemplarisch die Daten von *WEPU7* bzgl. ID 11775. Die Veränderungen in der Amplitude der Signaturen zeigen sehr deutlich, dass es systematische Unterschiede im Übertragungsverhalten einzelner Informationen entlang der Druckmaschine gibt.

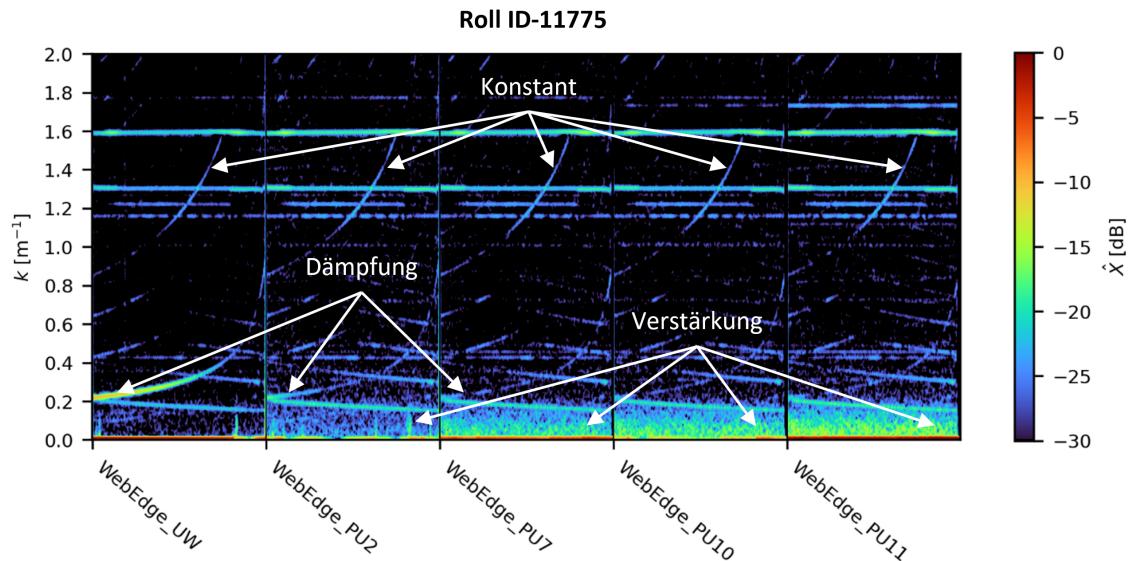


Abbildung 6.10 Vergleich der Bahnkantenmessungen entlang der Druckmaschine einer einzelnen Rolle (ID 11775) zeigt das individuelle Übertragungsverhalten einzelner Informationen

Einige Effekte verstärken sich, andere schwächen sich ab und weitere bleiben vollständig konstant in ihrer linearen Verzerrung. Das Übertragungsverhalten ist damit offensichtlich nicht nur abhängig von der Frequenz, sondern grundsätzlich auch von der Art der Information. Diese Beobachtung deckt sich mit den verschiedenen Hypothesen zum Übertragungsverhalten entlang der Druckmaschine (siehe Kapitel 6.3.2.1 (S.137)). Eine systematische Bewertung des Übertragungsverhaltens der einzelnen Effekte entlang der Druckmaschine, scheint daher für eine grobe Strukturierung bzw. Differenzierung der verschiedenen Effekte hilfreich zu sein.

6.3.2 Systematisierte Analyse des Übertragungsverhaltens

6.3.2.1 Hypothesen zum Übertragungsverhalten lateraler Bahnlaufstörungen in der Druckmaschine

Ein zentraler Bestandteil zur Umsetzung des eigenen Ansatzes ist die differenzierte Interpretation der unterschiedlichen, auf das Substrat übertragenen Informationen auf der Empfängerseite. Grundsätzlich wird jeder Übertragungskanal mit einem separaten Sensor-typ abgetastet. Bei einer einseitigen⁸⁸ Bahnkantenabtastung zur Beobachtung von Bahnstörungen in CD-Richtung, ergibt sich im Gegensatz zu allen anderen Übertragungskanälen eine Besonderheit. Im Übertragungskanal „Bahnkante“ sind nämlich drei voneinander unabhängige Informationsarten enthalten, die es in der Analyse zu berücksichtigen gilt:

1. Abweichung der Bahnkante (δDS)
2. Abweichung der lateralen Bahnposition (δy)
3. Abweichung der Bahnbreite (δW)⁸⁹

Basierend auf der Literatur zu typischen Prozessstörungen (siehe Kapitel 4.4) und den Beschreibungen des Übertragungsverhaltens⁹⁰ von lateralen Bahnlaufstörungen über mehrere Walzen (siehe Kapitel 4.4.4 und 3.1.3.6), werden nachfolgend zusammenfassende Hypothesen aufgestellt. Diese sollen grundsätzliche Unterscheidungen von Informationen in der Bahnkante (1.) und Informationen des lateralen Bahnlaufs (2.) ermöglichen.

Hypothese 1: *Reine Bahnkantenstörungen übertragen sich über mehrere Walzen unverändert. Ihre lineare Verzerrung ist annähernd Null.⁹¹*

Hypothese 2: *Störungen im lateralen Bahnlauf sind stets temporär und werden über mehrere Walzen in jedem Fall linear verzerrt. Je nach Ursache werden sie entweder verstärkt oder gedämpft. Eine unveränderte Übertragung ist äußerst unwahrscheinlich.*

Die grundlegenden Ursachen lateraler Bahnlaufstörungen können darüber hinaus, über ihr spezifisches Übertragungsverhalten (lineare Verzerrung) entlang mehrerer Walzen in zwei Gruppen unterteilt werden:

⁸⁸siehe Kapitel 6.3.2.2

⁸⁹Effekte in der Bahnbreite können mit dem verwendeten Messaufbau nicht direkt ermittelt werden und können daher nicht direkt von reinen Bahnkanteninformationen (1.) unterschieden werden. Breiten-informationen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet und daher im weiteren Verlauf der Arbeit in diesem Kontext nicht mehr mit aufgeführt.

⁹⁰Hier ist im speziellen die lineare Verzerrung gemeint.

⁹¹Minimale Ungenauigkeiten durch Bahndehnung und Querkontraktionsverhalten seien hier vernachlässigt.

Hypothese 2 a): *Materialspezifische Störungen sind ortsfest zur Bahn und verstärken sich entlang mehrerer Walzen, da sie sich an jedem Bahnführungs-element erneut auswirken.⁹²*

Hypothese 2 b): *Von außen auf den Bahnlauf aufgezwungene Störungen werden entlang mehrerer Walzen wieder gedämpft, da sich die Bahn von selbst stabilisiert.⁹³*

Die grundsätzliche Frequenzabhängigkeit der linearen Verzerrung wird für die beiden Gruppen wie folgt eingeschätzt:

Hypothese 2 c): *Durch die Zeitabhängigkeit der dynamischen Phase in einer instationären Bahnlaufsituation⁹⁴ folgt grundsätzlich, dass sich niederfrequente Störungen besser übertragen als hochfrequente.*

Passerschwankungen werden außerdem als Folgestörungen von Bahnlaufstörungen (bzgl. CD und MD) eingeschätzt, was zu einer weiteren Hypothese führt:

Hypothese 3): *Registerstörungen entstehen aus einer Kombination von Bahnlaufstörungen, deren individuellen Übertragungseigenschaften entlang der Druckmaschine und entsprechenden Kompensationsmaßnahmen durch die zentralen Regelungssysteme (Bahnlauf-, Bahnspannungs- und Registerregelung). Sie übertragen sich entlang der Druckmaschine dadurch grundsätzlich anders als die ursächlichen Bahnlaufstörungen. Die Orts-Frequenzsignatur von Registerstörungen stimmen jedoch in der grundlegenden Charakteristik weitgehend mit der jeweils ursächlichen Bahnlaufstörung überein.*

6.3.2.2 Signalpegelmessung entlang der Druckmaschine

Abweichend zu einer beidseitigen Bahnkantenmessung, welche an der konkret verwendeten Druckmaschine nicht zur Verfügung steht, wird die Bahnkante in dieser Arbeit nur an einer Seite (DS) abgetastet. Dafür aber an mehreren Stellen entlang der Druckmaschine. Abbildung 6.11 zeigt den hier verwendeten Messaufbau, der eine Analogie zum Pegelmaß⁹⁵ in analogen Signalübertragungssystemen zulässt.

⁹²siehe z.B. [118]

⁹³siehe NEL und lineares Übertragungsverhalten lateraler Bahnlaufstörungen (siehe Abbildung 3.24 [95, 79-80])

⁹⁴Hiermit sind Prozessstörungen im ansonsten stationären Betriebszustand der Maschine gemeint

⁹⁵Bei einem relativen Vergleich zweier Signalpegel an zwei unterschiedlichen Stellen im Übertragungssystem spricht man vom sogenannten Pegelmaß (siehe S.48).

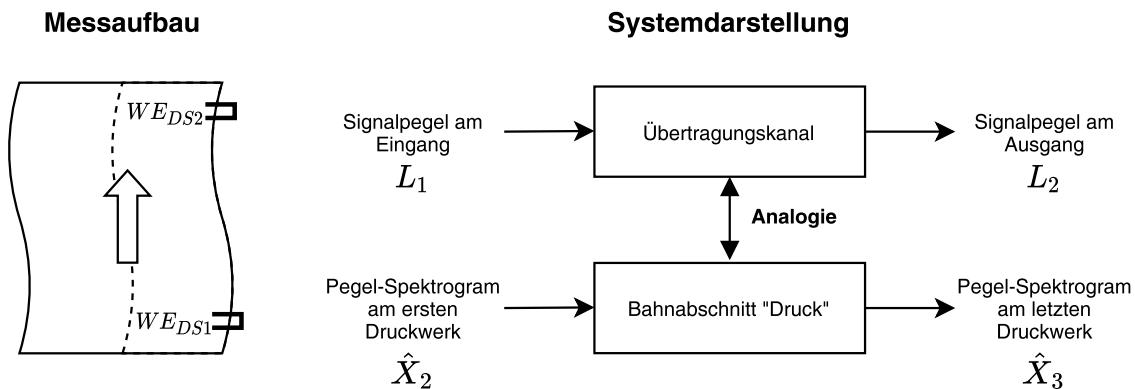


Abbildung 6.11 Analogie der verteilten Bahnkantenmessung entlang der Druckmaschine zum Pegelmaß in der analogen Signalübertragung

Zwar ist bei einer beidseitigen Bahnkantenerfassung eine einfache Herleitung der Bahnbreite und seitlichen Bahnbewegung möglich, jedoch sind die Informationen auf diesen Ort beschränkt. Im Gegensatz dazu macht eine verteilte Messung entlang der Druckmaschine eine Bewertung des Übertragungsverhaltens der einzelnen Störungen im Drucksystem möglich und eröffnet eine völlig andere Perspektive bei der Untersuchung von Bahnlaufstörungen im Druck.

Die Betrachtung der Messdaten in Pegel-Spekrogrammen und deren relativen Vergleich entlang eines bestimmten Bahnabschnittes, macht eine Bewertung der linearen Verzerrung, einzelner darin enthaltener Informationen bzgl. Ort- und Frequenz möglich. Auf Basis der aufgestellten Hypothesen zum erwarteten Übertragungsverhalten bestimmter Informationsarten (siehe Kapitel 6.3.2.1) soll eine grundsätzliche Unterscheidung hinsichtlich ihres Orts-Frequenzverhaltens in der Druckmaschine im Übertragungskanal „Bahnkante“ realisiert werden.

Die Prozedur wird nachfolgend für Bahnkantensensoren beispielhaft eingeführt und im weiteren Verlauf der Arbeit auch nur für diesen Sensortyp angewendet.⁹⁶

6.3.2.3 Differenzierung (Demultiplexing Konzept)

Abbildung 6.12 zeigt zunächst das Gesamtkonzept der Informationsdifferenzierung im Übertragungskanal Bahnkante auf Basis der Bewertung der linearen Verzerrung entlang

⁹⁶Theoretisch kann die relative Pegelmessung auch auf andere verteilte Sensoren angewendet werden. Bei den Registerdaten muss immer auch die Referenzierung der Druckwerke berücksichtigt werden. Da in der Fallstudie dazu keine Daten erhoben wurden, ist eine Anwendung auf die Registerdaten nicht möglich bzw. sinnvoll.

verschiedener Bahnabschnitte. Es entspricht in seiner Funktion einem Demultiplexing in der Nachrichtentechnik (siehe S.53).

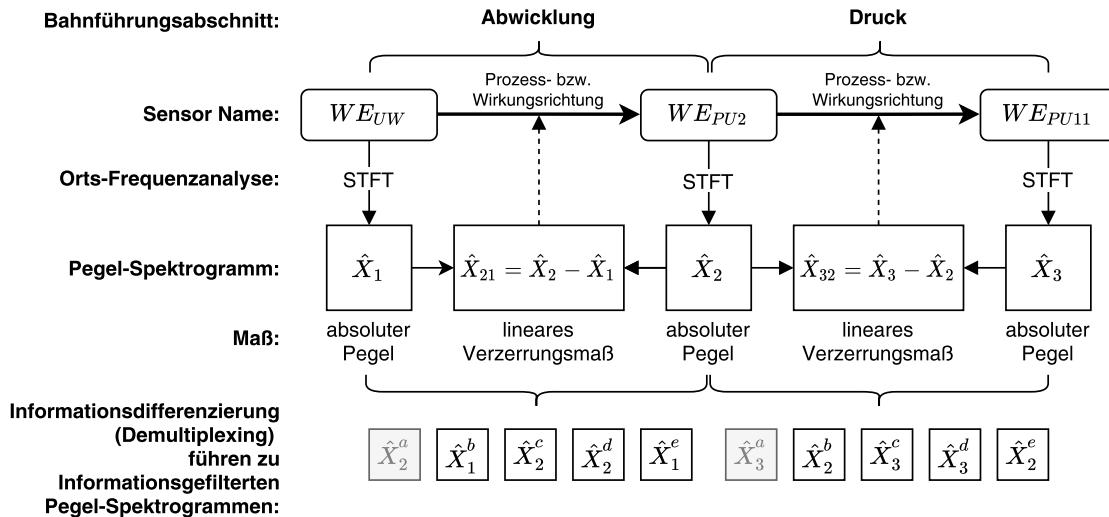


Abbildung 6.12 Konzept der Informationsaufteilung (Demultiplexing) durch Bewertung der Orts-Frequenz aufgelösten linearen Verzerrung innerhalb der Bahnabschnitte „Abwicklung“ und „Druck“

Das lineare Verzerrungsmaß im Bahnabschnitt „Abwicklung“ (\hat{X}_{21}) wird über den pixelgenauen⁹⁷ Vergleich der beiden Pegelspektrogramme \hat{X}_1 und \hat{X}_2 ermittelt, die sich in diesem Beispiel auf die Signale WE_{UW} bzw. WE_{PU02} beziehen. Dazwischen liegt die Bahnlaufregelung und das Tänzersystem, dass die Bahnlaufschwankungen bzgl. MD und CD bestmöglich eliminieren soll, sodass die Bahn innerhalb des Druckabschnittes gut verarbeitet werden kann. Die zweite Beobachtung wird über den Vergleich der Bahnkante an zwei unterschiedlichen Orten des Bahnabschnitt „Druck“ durchgeführt. In diesem Abschnitt sollten alle für den Druck relevanten Informationen des Bahnlaufs enthalten sein.

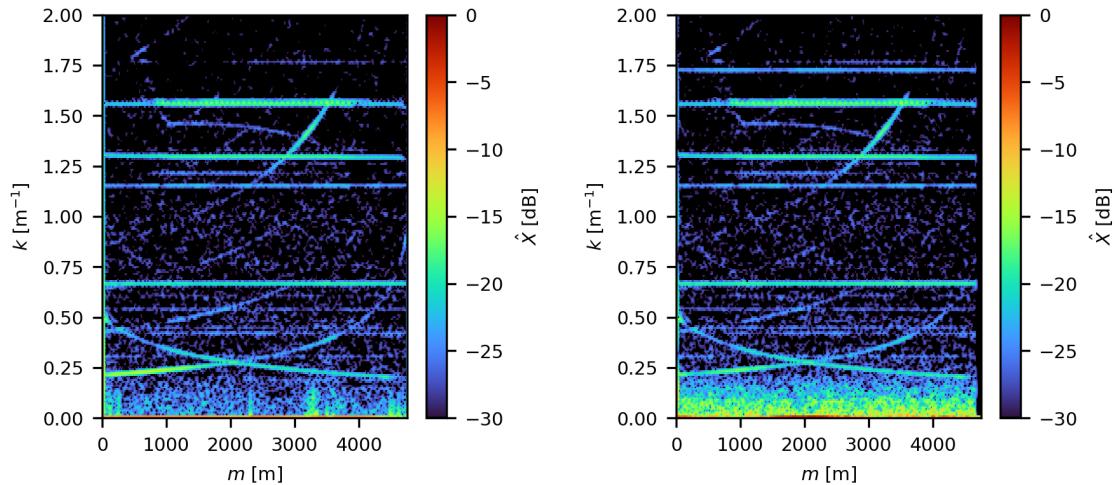
Um die Frequenzkomponenten bzgl. charakteristischer Eigenschaften im Übertragungsverhalten zu analysieren, werden die Ergebnismatrizen der STFT direkt herangezogen und nicht die angepassten Spektrogramm Visualisierungen. Das Demultiplexing Konzept wird nachfolgend am Beispiel der Rolle (ID 10284) im Bahnabschnitt „Druck“ exemplarisch

⁹⁷Für den pixelgenauen Vergleich ist die Korrektur der Zeitkonstanten in der Datenvorverarbeitung (siehe 6.1.4) wichtig. Nur so liegen die Spektrogramme genau übereinander und können anschließend korrekt miteinander verrechnet werden. Da die Ortsauflösung der Spektrogramme mit den definierten Einstellungen grob genug ist, funktioniert der Ansatz prinzipiell auch für unterschiedliche Materialien, die jeweils unterschiedliche Bahndehnungen entlang der Maschine aufweisen. Die Pixelbreite im Spektrogramm entspricht ca. 14 m (siehe 6.2.1). Erst bei einer Bahndehnung von 10 % käme es damit zu einem Versatz von genau einem Pixel. Bei den verdrückten Materialien ist mit derart großen Materialdehnungen nicht zu rechnen.

angewendet und schrittweise erläutert. Dieser Abschnitt beinhaltet Informationen, die für die Druckqualität relevant sind.

Zunächst werden die beiden Eingangs- und Ausgangs-Spekrogramme \hat{X}_2 und \hat{X}_3 über den Schwellwert $K = -30 \text{ dB}$ nicht nur visuell sondern auch datentechnisch von Frequenzanteilen, die dem Sensorrauschen zuzuordnen sind, befreit. Amplituden mit $\hat{X} < K$ werden daher durch einen sehr kleinen einheitlichen Hilfswert $\beta \ll K$ wie folgt ersetzt.

$$\begin{aligned}\hat{X}_2 &= \begin{cases} \hat{X}_2 & \text{für } \hat{X}_2 \geq K \\ \beta & \text{für } \hat{X}_2 < K \end{cases} \\ \hat{X}_3 &= \begin{cases} \hat{X}_3 & \text{für } \hat{X}_3 \geq K \\ \beta & \text{für } \hat{X}_3 < K \end{cases}\end{aligned}\quad (6.5)$$



(a) Absolutes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_2 bei PU02 (b) Absolutes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_3 bei PU11

Abbildung 6.13 Aufbereitete absolute Pegelspekrogramme

Aus der Differenz beider aufbereiteten Ergebnismatrizen der absoluten Pegel-Spekrogramme \hat{X}_2 und \hat{X}_3 an zwei unterschiedlichen Orten im Übertragungssystem, kann nun das orts- und frequenzaufgelöste lineare Verzerrungsmaß ermittelt werden.

$$\hat{X}_{32} = \hat{X}_3 - \hat{X}_2 \quad (6.6)$$

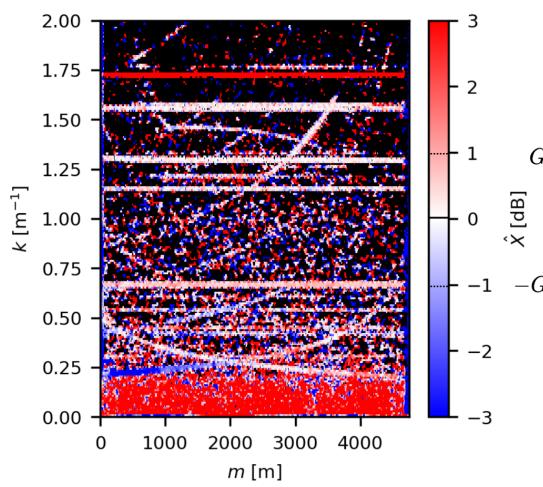


Abbildung 6.14 Spektrogramm mit orts- und frequenzaufgelöstem linearen Verzerrungsmaß \hat{X}_{32}

Das resultierende Spektrogramm zeigt alle gedämpften Frequenzanteile in blau und alle verstärkten Anteile in rot. Alle exakt unveränderten Anteile sind schwarz dargestellt. Sie entsprechen den abgeschnittenen Amplituden $< -30 \text{ dB}$.

Offensichtlich ist die lineare Verzerrung nicht für alle im Signal enthaltenen Informationen einheitlich frequenzabhängig. Es gibt Muster, die konstant bleiben obwohl im selben Frequenzbereich andere Muster verstärkt oder gedämpft werden. Somit wird deutlich, dass das Übertragungsverhalten der Informationen entlang der Druckmaschine von der jeweiligen Ursache abhängig sein muss.

Merke: Mit Hilfe des relativen Orts-Frequenz Pegel-Spektrogramm, welches das lineare Verzerrungsmaß entlang der Druckmaschine ausdrückt, können die ursprünglichen Pegel-Spektrogramme an den jeweiligen Messstellen bzgl. bestimmter Grundursachen gefiltert bzw. differenziert werden.

Als nächstes wird ein Verstärkungs- bzw. Dämpfungsschwellwert mit $G = 1$ definiert, was einer Verstärkung bzw. Dämpfung von $\approx \pm 25\%$ relativ zum Eingangspiegel entspricht.

Die Frequenzanteile bzgl. \hat{X}_3 , die sich zwischen \hat{X}_2 und \hat{X}_3 stärker als der Schwellwert G verstärken, erhält man durch folgende Maskierung. Das resultierende gefilterte Spektrogramm \hat{X}_3^a dient als Zwischenschritt für die weiteren Filterungen.

$$\hat{X}_3^a = \begin{cases} \hat{X}_3 & \text{für } \hat{X}_{32} \geq G \\ \beta & \text{für } \hat{X}_{32} < G \end{cases} \quad (6.7)$$

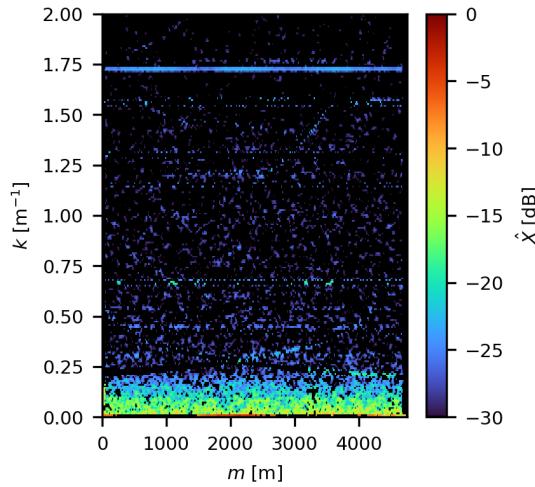


Abbildung 6.15 Gefiltertes Pegel-Spektrogramm \hat{X}_3^a

Die Frequenzanteile bzgl. \hat{X}_2 , die zwischen \hat{X}_2 und \hat{X}_3 stärker als der Schwellwert $-G$ gedämpft werden, und daher örtlich vor \hat{X}_2 verursacht sein müssen, erhält man über

$$\hat{X}_2^b = \begin{cases} \hat{X}_2 & \text{für } \hat{X}_{32} \leq -G \\ \beta & \text{für } \hat{X}_{32} > -G \end{cases} \quad (6.8)$$

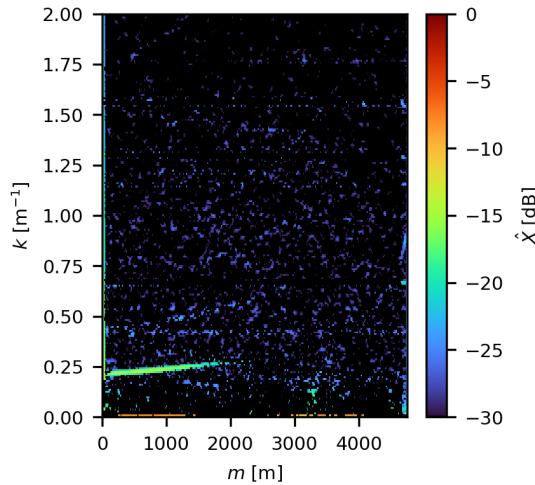


Abbildung 6.16 Gefiltertes Pegel-Spektrogramm \hat{X}_2^b

Die Frequenzanteile bzgl. \hat{X}_3 , die sich zwischen \hat{X}_2 und \hat{X}_3 verstärken aber bereits bei \hat{X}_2 vorhanden waren, erhält man Schritt für Schritt über

$$\begin{aligned}\hat{X}_3^c &= \begin{cases} \hat{X}_3 & \text{für } \hat{X}_2 > \beta \\ \beta & \text{für } \hat{X}_2 = \beta \end{cases} \\ \hat{X}_3^c &= \begin{cases} \hat{X}_3^c & \text{für } \hat{X}_3^a > \beta \\ \beta & \text{für } \hat{X}_3^a = \beta \end{cases} \\ \hat{X}_3^c &= \begin{cases} \hat{X}_3 & \text{für } \hat{X}_3^c > \beta \\ \beta & \text{für } \hat{X}_3^c = \beta \end{cases}\end{aligned}\tag{6.9}$$

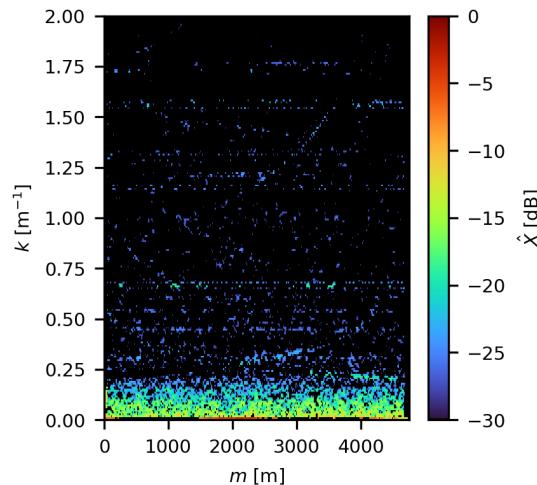


Abbildung 6.17 Gefiltertes Pegel-Spektrrogramm \hat{X}_3^c

Die verstärkten Frequenzanteile bzgl. \hat{X}_3^a , die bei \hat{X}_2 noch nicht vorhanden waren, erhält man über die Umkehr der \hat{X}_2 Maske über

$$\hat{X}_3^d = \begin{cases} \hat{X}_3^a & \text{für } \hat{X}_2 = \beta \\ \beta & \text{für } \hat{X}_2 > \beta \end{cases}\tag{6.10}$$

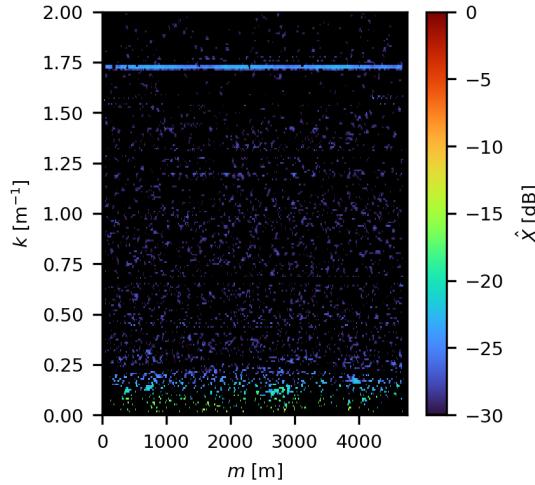


Abbildung 6.18 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_3^a

Alle innerhalb des Intervalls $[-G, G]$ konstant bleibenden Frequenzanteile bzgl. \hat{X}_2 erhält man über

$$\hat{X}_2^e = \begin{cases} \beta & \text{für } \hat{X}_{32} \leq -G \\ \hat{X}_2 & \text{für } -G < \hat{X}_{32} < G \\ \beta & \text{für } \hat{X}_{32} \geq G \end{cases} \quad (6.11)$$

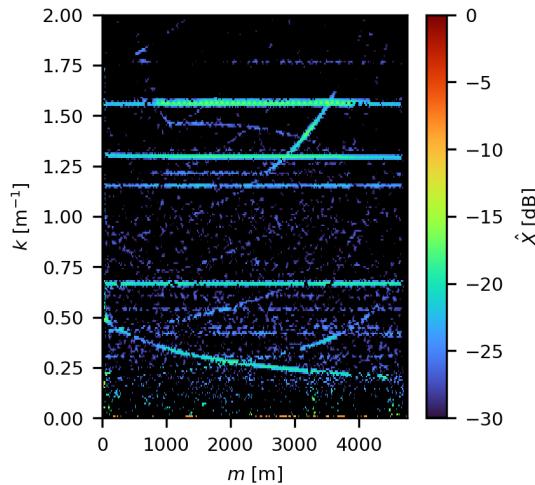


Abbildung 6.19 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_2^e

6.3.2.4 Zuordnung spezifischer Quelle-Senke Verbindungen

Auf Basis der Hypothesen zum Übertragungsverhalten verschiedener Störungsarten entlang der Druckmaschine (siehe Kapitel 6.3.2.1) und der Beobachtung, dass sich tatsächlich deutlich unterschiedliche Muster in den einzelnen gefilterten Pegel-Spekrogramme abzeichnen, werden diese zu verschiedenen Abschnitten in der Prozesskette zugeordnet, oder anders ausgedrückt eine *Quelle-Senke Zuordnung* durchgeführt.

- \hat{X}_3^a : Zwischenergebnis, das alle verstärkten Frequenzanteile zwischen \hat{X}_2 und \hat{X}_3 beinhaltet. Es wird *nicht* direkt zugeordnet, da es die Effekte von mindestens zwei unterschiedlichen Ursachen beinhaltet.
- \hat{X}_2^b : Einmalige äußere Krafteinwirkung auf die Bahn, die *örtlich vor* \hat{X}_2 stattgefunden haben muss.
- \hat{X}_3^c : Das im Material selbst gespeicherte Potential für laterale Bahnlaufstörungen aufgrund einer nicht idealen Bahn (insbesondere der Materialeigenschaften), die bei \hat{X}_2 bereits zu messbaren Seitenbewegungen führen und sich bis \hat{X}_3 noch weiter verstärken.
- \hat{X}_3^d : Einmalige äußere Krafteinwirkung auf die Bahn, die *örtlich nach* \hat{X}_2 stattgefunden haben muss, z.B. durch Bahnführungselemente zwischen \hat{X}_2 und \hat{X}_3 .
- \hat{X}_2^e : Dauerhaft in die Bahnkante geschriebene Informationen, die aus vorgelagerten Prozessen, insbesondere aus der Fertigrollenwicklung (hier findet der Bahnkantenbeschchnitt statt) oder im Transport (Kratzer auf Rollenstirnseite) entstanden sind.

Zur Übersicht zeigt Tabelle 6.20 die Bedeutung der einzelnen gefilterten Pegelspektrogramme im Kontext der Differenzierung der Bahnkantenmessung.

Gemeinsam genutzter Kanal	Informationsarten	Hypothese	Lineare Verzerrung	Differenzierte Informationen	Gefiltertes Pegel-Spekrogramm (Senke)	Grobe Zuordnung zu Verursachungsarten in der Prozesskette (Quelle)
Bahnkante	Bahnkantenbeschaffenheit	1	Konstant	zur Bahn ortsfeste und unveränderliche Bahnkantenstörungen	\hat{X}_2^e	Rollenwicklungsprozess, Lagerung und Transport
	Seitliche Bahnbewegung	2 a)	Verstärkung	Zur Bahn ortsfeste materialspezifische Bahnlaufstörungen	\hat{X}_3^c	Papierherstellung und Papierlagerung
		2 b)	Dämpfung	temporäre Bahnlaufstörungen durch äußere Ursache	\hat{X}_2^b	Bahnabschnitt "Abwicklung" in Druckmaschine
					\hat{X}_3^d	Bahnabschnitt "Druck" in Druckmaschine

Abbildung 6.20 Zuordnung spezifischer Quelle-Senke Verbindungen

Abbildung 6.21 zeigt den Ablauf des Demultiplexing Konzeptes über die Maskierung der Spektrogramme noch einmal als Übersicht.

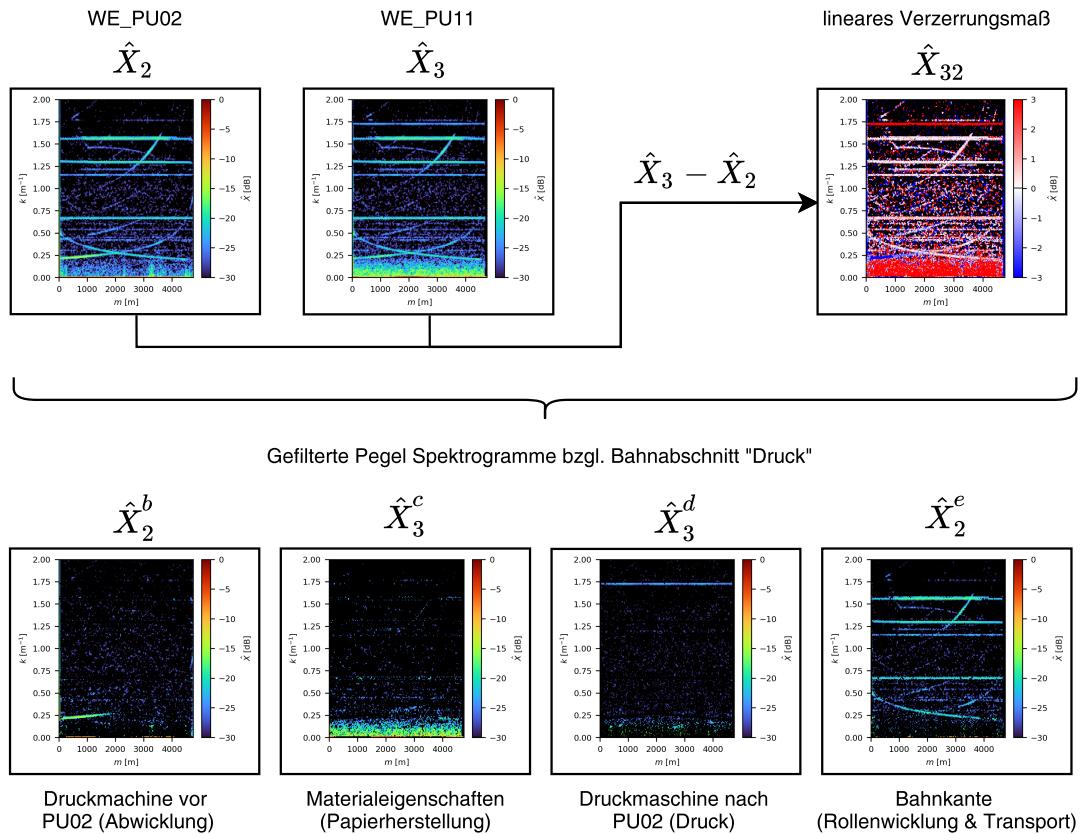


Abbildung 6.21 Übersicht einer exemplarischen Anwendung des Demultiplexing Konzeptes bzgl. des Bahnabschnittes „Druck“ zur Differenzierung von Informationen im gemeinsam genutzten Übertragungskanal „Bahnkante“

Das vorgestellte Konzept zur Differenzierung von Informationen erinnert in der Funktion stark dem Prozess des Demultiplexing in der Nachrichtentechnik. Hier wird ebenfalls das über einen Übertragungskanal übermittelte Gesamtsignal wieder in seine Einzelbestandteile zerlegt, um sie anschließend einzeln zu interpretieren. Das vorgestellte Konzept ist jedoch anders geartet, wie die bekannten Verfahren. Es unterscheidet nicht auf Basis einzelner typischer Dimensionen wie beispielsweise der Zeit oder der Frequenz, sondern trennt die Signalanteile ort- und frequenzaufgelöst hinsichtlich ihrer linearen Verzerrung (Veränderung der Amplitude) entlang der durch die verteilten Sensoren definierten Bahnabschnitte.

6.3.3 Synthese prinzipieller Orts-Frequenzsignaturen

Die realen Bahnkanten Spektrogramme zeigen charakteristische Orts-Frequenzsignaturen, die sich offensichtlich nicht nur durch ihre lineare Verzerrung unterscheiden, sondern auch

durch ihre spezifischen Muster. Beides zusammen deutet jeweils auf eine sehr spezifische Ursache im Gesamtprozess hin.

Zur Rekonstruktion einiger prinzipieller Signaturen wird zunächst ein entsprechendes Wickelmodell entworfen (siehe Kapitel 6.3.3.1), das eine Manipulation der Bahn oder des Wickels in Form von Störfunktionen erlaubt (siehe Kapitel 6.3.3.2). Auf diese Weise können verhältnismäßig einfach prinzipielle rollengeometrische Wickelphänomene nachgebildet und anschließend als virtueller Wickel visualisiert werden.

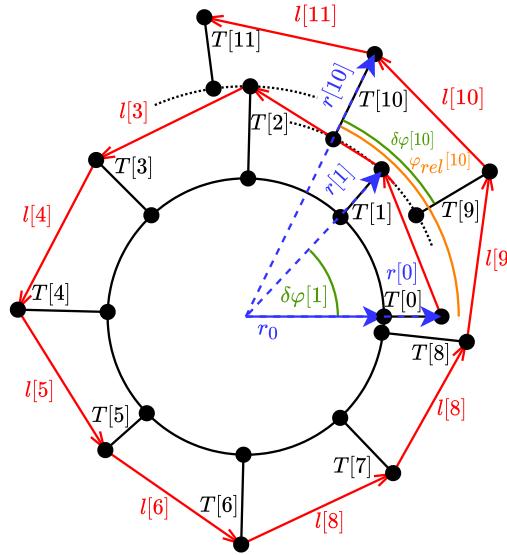
Darauf aufbauend kann die gestörte Bahn bzw. Rolle anschließend auch wieder virtuell abgewickelt und ihre spezifischen Eigenschaften (z.B. die Bahnkante) in einem Spektrogramm visualisiert werden. Über einen direkten Vergleich der beiden Darstellungsformen, als Wickel bzgl. der aufgewickelten Bahndaten und als Spektrogramm bzgl. der abgewickelten Bahndaten, kann der Zusammenhang zwischen den visuellen Merkmalen in einem Rollenwickel und den daraus resultierenden Orts-Frequenzsignaturen aufgezeigt werden. So wie sie bei einer inline Beobachtung der Bahn in einer Druckmaschine ebenfalls zu erwarten sind (siehe Kapitel 7).

6.3.3.1 Die finite Wickelspirale

Zur Modellierung der Wickelstörungen bedarf es zunächst einer virtuellen Hülse, über die eine virtuelle Bahn, wie bei einer Archimedischen Spirale, elementweise zu einer Rolle aufgewickelt wird. Das in dieser Arbeit genutzte Wickelmodell ist in seiner Funktion ähnlich zu dem von PFEIFFER [72] und berücksichtigt keine mechanischen Eigenschaften oder Kräfte⁹⁸. In Erweiterung zu seinem Modell ist eine elementweise Manipulation der Bahn in radialer, lateraler und tangentialer Richtung als Bahn oder in aufgerollter Form als Wickel möglich. Über eine Darstellung in einem Polarplot der manipulierten Daten kann so die Stirnseite der Rolle vollständig visualisiert werden, wodurch sich die visuellen Merkmale der Störungen im Rollenwickel offenbaren.

Zunächst wird eine Bahn mit einer Gesamtlänge L , einer elementweise variablen Dicke $T[i]$ und einer Abtastrate f_s definiert. Wickelt man sukzessive jedes Bahnelement $i \in \mathbb{N}$ $[0, \frac{L}{f_s} - 1]$ mit der spezifischen Länge $l[i]$ um eine Hülse mit dem Radius r_0 , erhält man schließlich eine Wickelspirale, für die sich elementweise ein Radius $r[i]$ und ein Drehwinkel $\varphi[i]$ ergibt. In der Abbildung 6.22 sind alle relevanten Variablen für die ersten 11 Elemente einer exemplarischen Wicklung als Schema dargestellt.

⁹⁸Die meisten in der Literatur bekannten Wickelmodelle zielen auf eine Simulation des Wickelaufbaus und der im Wickel entstehenden Spannungen ab. Sie berücksichtigen zwar i.d.R. Kräfte, lassen aber häufig keine direkte Manipulation der Einzelemente zu (siehe Tabelle mit 14 verschiedenen Wickelmodellen in [25, S.22]). Sie alle sind zur Modellierung der einfachen geometrischen Wickelstörungen nicht hilfreich.



Beispiel i=0:	Beispiel i=1:	Beispiel i=10:
$\delta\varphi[0] = 0$	$\delta l[1] = \frac{l[1] - l[0]}{r_0}$	$\delta\varphi[10] = \frac{l[10] - l[9]}{r[1]}$
$\varphi[0] = 0$	$\varphi[1] = \varphi[0] + \delta\varphi[1]$	$\varphi[10] = \varphi[9] + \delta\varphi[10]$
$lc[0] = 1$	$lc[1] = 1$	$lc[9] = 2$
$\varphi_{rel}[0] = 0$	$\varphi_{rel}[1] = \varphi[1] - (1 - 1)2\pi$	$\varphi_{rel}[10] = \varphi[10] - (2 - 1)2\pi$
$r[0] = r_0 + T[0]$	$r[1] = r_0 + T[1]$	$r[10] = r[1] + T[10]$

Abbildung 6.22 Die Finite Wickelspirale aller relevanten Variablen und eine Tabelle mit exemplarischen Berechnungen für die drei Elemente $i = 0$, $i = 1$ und $i = 10$

Der Algorithmus zum elementweisen Aufwickeln der Bahn führt die Schritte 1. bis 5. für alle Bahnelemente i aus und startet bei $i = 1$, wobei für $i = 0$ die Startwerte in der Tabelle in Abbildung 6.22 gelten. Außerdem gilt für alle Bahnelemente der ersten Lage mit $lc[i] = 1$, dass der jeweils unterliegende Radius $r[\hat{i}]$ für diese Elemente r_0 entspricht.

1. Berechnung des absoluten und differenziellen Drehwinkels $\varphi[i]$ bzw. $\delta\varphi[i]$ über die äquidistante Elementlänge $\delta l[i] = \frac{1}{f_s}$

$$\delta\varphi[i] = \frac{\delta l[i]}{r[\hat{i}]} = \frac{l[i] - l[i-1]}{r[\hat{i}]} \quad (6.12)$$

$$\varphi[i] = \varphi[i-1] + \delta\varphi[i] \quad (6.13)$$

2. Berechnung der aktuellen Lagenanzahl $lc[i]$, beginnend mit 1

$$lc[i] = \left\lfloor \frac{\varphi[i]}{2\pi} \right\rfloor + 1 \quad (6.14)$$

3. Berechnung des relativen Drehwinkels $\varphi_{rel}[i] \in [0, 2\pi]$

$$\varphi_{rel}[i] = \varphi[i] - (lc[i] - 1) 2\pi \quad (6.15)$$

4. Berechnung des aktuellen Radius $r[i]$ auf Basis des zuvor ermittelten Radius des darunterliegenden Elementes $r[\hat{i}]$ und der Dicke des aktuellen Bahnelementes $T[i]$.

$$r[i] = r[\hat{i}] + T[i] \quad (6.16)$$

Als einfache Approximation an die bis dahin gewickelte Rollenform, wird das aktuelle Element i auf den Radius $r[\hat{i}]$, des darunterliegenden Elements \hat{i} gelegt. Das Element \hat{i} ist aus der Elementmenge I der vorherigen Lage, das mit dem nächstgelegenen relativen Drehwinkel zum aktuellen relativen Drehwinkel $\varphi_{rel}[i]$ (k). Aufgrund der verhältnismäßig geringen absoluten Materialdicken und den später modellierten Dickenvariationen zu den verwendeten finiten Elementlängen, ist diese Annäherung ausreichend.⁹⁹

$$\begin{aligned} I &= \text{where} (lc == lc[i] - 1, i(lc), \text{false}) \\ k &= \text{argmin} (|\varphi_{rel}[I] - \varphi_{rel}[i]|) \\ \hat{i} &= I[k] \end{aligned} \quad (6.17)$$

6.3.3.2 Prinzipielle Störungen

Eine an [78] angelehnte Gruppierung von Wickelstörungen ist die nach der Richtung der Abweichung, relativ zu einem perfekt zylindrischen Wickel. Abbildung 6.23 zeigt die in dieser Arbeit berücksichtigten Gruppen in radialer, lateraler und tangentialer Richtung schematisch. Die Störungen können (vgl. Abbildung 5.1 S.105) auf die Rolle oder auf die Bahn bezogen sein.

⁹⁹Der größtmögliche Fehler beträgt für jedes Element $\frac{r[i] - r[i-1]}{2}$.

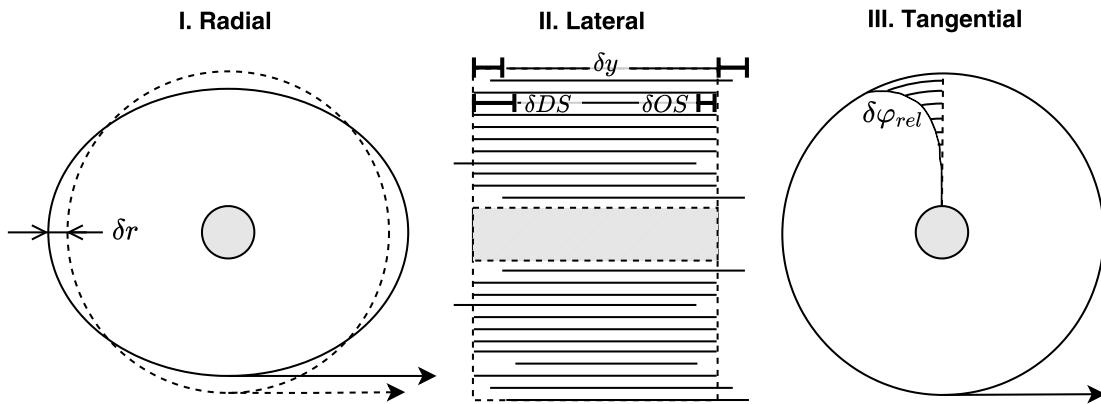


Abbildung 6.23 Gruppierung typischer rollengeometrischer Wickelphänomene nach der Richtung der Abweichung

- I. *Radiale Abweichungen* gruppieren Phänomene, bei denen die radiale Abweichung δr über die ganze Rollenbreite drehwinkelabhängig φ_{rel} variiert. Im Bezug auf die Bahn sind als Ursache hier auch Abweichungen in der Materialdicke δT über die gesamte Bahnlänge L relevant (siehe Kapitel 4.4.3). Neben der radialen Deformation des Wickels wird in diese Gruppe auch eine exzentrische Abwicklung der Rolle durch eine nicht ideal zentrierte Einspannung der beiden Spannzapfen hinzugezählt, da es zu einem ähnlichen Phänomen in der Abwicklung kommt.
- II. *Laterale Abweichungen* gruppieren Phänomene, bei denen die seitliche Position der Bahn δy oder die Bahnkanten δOS bzw. δDS (nachfolgend verallgemeinert durch δWE zusammengefasst) in seitlicher Richtung variieren. Falls die Abweichungen ihren Ursprung auf der bereits gewickelten Rolle haben, wie z.B. durch eine radiale Quetschung des Wickels oder einer Beschädigung der Rollenstirnseite während des Transports, sind sie systematisch vom Radius r und dem Drehwinkel φ_{rel} abhängig. Entstehen die Effekte bei abgewickelter Bahn, wie z.B. bei einer Störung der Bahnkante durch ein vibrierendes Schneidmesser (siehe Kapitel 4.4.1), variieren die Abweichungen systematisch über die Bahnlänge L .
- III. *Tangentielle Abweichungen* gruppieren Phänomene, bei denen Lagenverschiebungen im Wickel in oder entgegengesetzt der Wickelrichtung stattfinden. Diese Effekte entstehen typischerweise durch Auf- und Abwickelvorgänge. Sie können in der Praxis mit dem sogenannten J-Linien Test sichtbar gemacht und quantifiziert werden (siehe [54] [25]).¹⁰⁰ Alternativ bewirkt eine unterschiedliche Bahndehnung in der Aufwicklung derselben Bahn eine andere tangentiale Lage derselben Störung auf dem Wickel und damit auch bzgl. des Drehwinkels φ bzw. $\varphi_{rel}(r)$.

¹⁰⁰Hierbei zeichnet sich bei entsprechender Markierung auf der Rollenstirnseite die radial aufgelöste tangentiale Lagenverschiebung als gebogene Linie ab. Das Ergebnis eines solchen Tests ist in Abbildung 6.23 in III. ange deutet.

Diese systematischen Abweichungen in der Rollengeometrie können als entsprechende Störfunktionen formuliert und zur gezielten Manipulation der finiten Wickelspirale genutzt werden. Je nach Richtung der Abweichung werden verschiedene Störfunktionen verwendet. Zur Manipulation der Rolle werden Fensterfunktionen genutzt, bei denen die Parameter parallel über alle relativen Drehwinkel φ_{rel} und über alle Radien r gleichzeitig manipuliert werden. Zur Manipulation der Bahn werden Störfunktionen mit der Länge L genutzt, so dass die Bahnelemente i sequentiell manipuliert werden, z.B. in Form einer bestimmten periodischen Störfunktion.

Richtung	Störung der Bahn	Störung der Rolle
Radiale Abweichungen	$\delta T(i)$	$\delta r(\varphi_{rel}, r), \delta T(\varphi_{rel}, r)$
Laterale Abweichungen	$\delta y(i), \delta WE(i)$	$\delta y(\varphi_{rel}, r), \delta WE(\varphi_{rel}, r)$
Tangentiale Abweichungen	$\delta l(i)$	-

Tabelle 6.6 Übersicht prinzipieller Störfunktionen, die auf die Rolle oder die Bahn angewandt werden

Für jede Gruppe seien nachfolgend jeweils zwei beispielhafte prinzipielle Störfunktionen mit exemplarischen Störamplituden aus Tabelle 6.6 für wenige Lagen und bei stark vergrößerter Materialdicke dargestellt.¹⁰¹

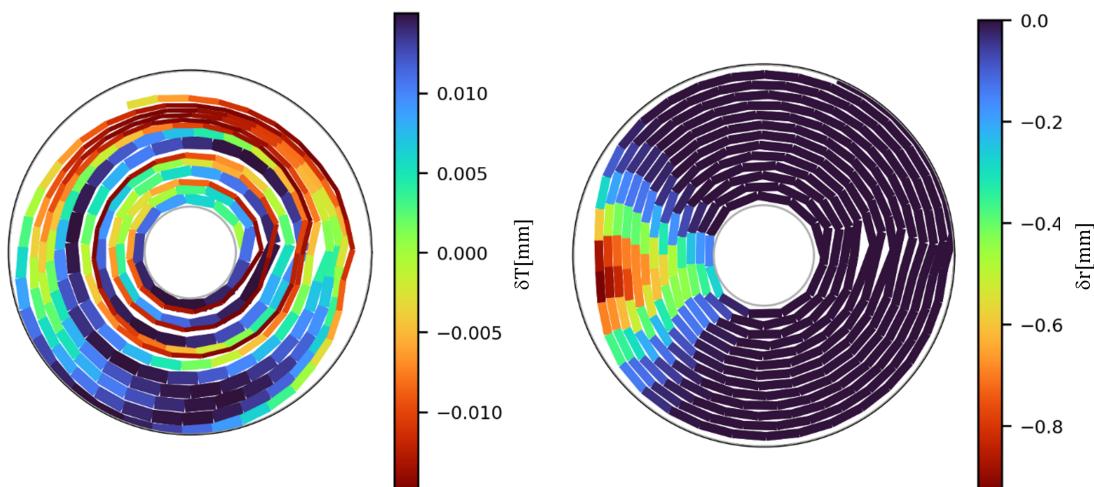


Abbildung 6.24 Modellierung radaler Störungen durch eine periodische Materialdickenschwankung $\delta T(i)$ (links) und einer einzelnen lokalen Quetschung des Wickels als Fensterfunktion, dessen Auswirkung zum Kern hin linear abnimmt $\delta r(\varphi_{rel}, r)$ (rechts)

¹⁰¹Die Ungenauigkeiten der radialen Lagensposition in der Nähe $\varphi_{rel} = 0$ resultieren aus dem harten Lagensprung durch die Approximation in Gleichung 6.17, bei der bei der Suche des unterliegenden Elementes nur das Intervall $\varphi_{rel} \in [0, 2\pi]$ betrachtet wird. Das letzte Element, der noch weiter darunterliegenden Lage wird also nicht berücksichtigt, obwohl es ggf. das näher liegende Element bzgl. des Drehwinkels φ_{rel} wäre.

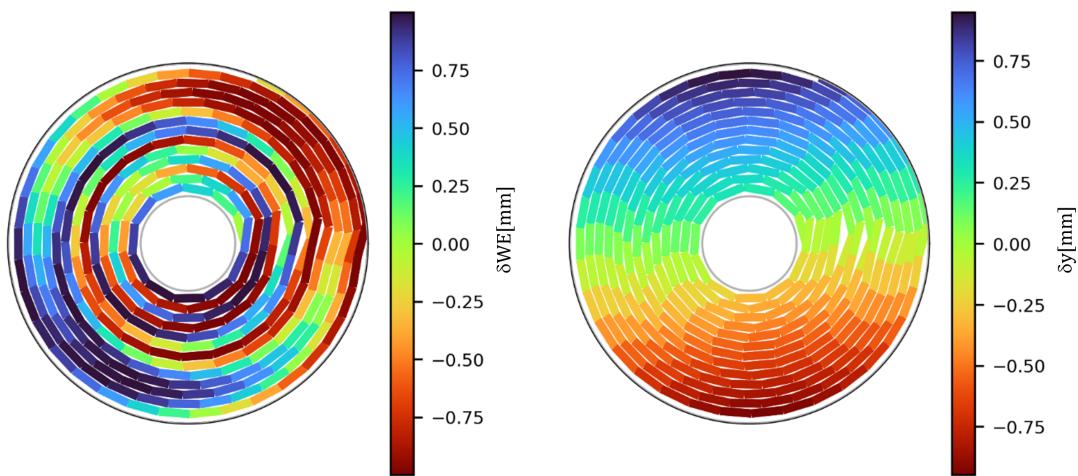


Abbildung 6.25 Modellierung lateraler Störungen durch periodische Bahnkantenstörung $\delta WE(i)$ (links) und einem zum Drehwinkel φ_{rel} und dem Radius r gekoppelten Seitenfehler der Bahn $\delta y(\varphi_{rel}, r)$, der z.B. durch eine exzentrische Einspannung der gegenüberliegenden Rollenseite entsteht (rechts)

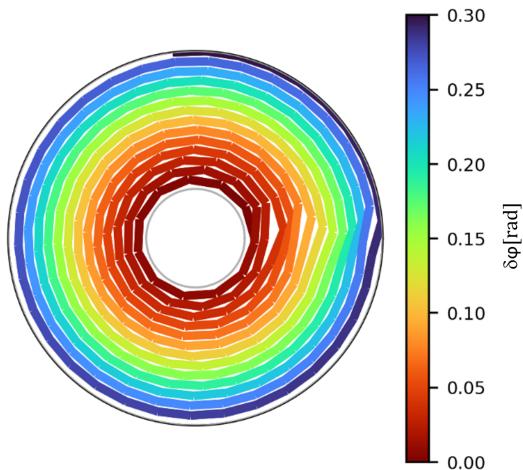


Abbildung 6.26 Modellierung einer tangentialen Störung durch eine gleichmäßige Dehnung aller Bahnelemente mit $\delta l(i)$, was im Vergleich zur ungedehnten Bahn zu einem linear ansteigenden Lagefehler jedes einzelnen Bahnelementes bzgl. des Drehwinkels $\delta \varphi(i)$ auf dem Wickel führt (links)

7 Modellierte Informationsbeispiele

Nachfolgend werden einige prinzipielle Wickelstörungen mit Hilfe des finiten Wickelmodells modelliert und jeweils einmal als Wickel und einmal als Spektrogramm bzgl. der wieder abgewickelten Bahn dargestellt. Beide Darstellungsformen offenbaren unterschiedliche visuelle Merkmale, die jedoch systematisch miteinander zusammenhängen.

Das Spektrogramm stellt das Signal der modellierten Störung im Bahnlauf der Druckmaschine dar, wie es jeweils direkt nach der Abrollung auftreten würde. Die absoluten Amplituden der Abweichungen im Bahnlauf sind nur exemplarisch und für die Zuordnung der Bahnlaufstörungen zu den Ursachen nur sekundär relevant. Im Mittelpunkt stehen vielmehr die charakteristischen Orts-Frequenzsignaturen in den Spektrogrammen.

Alle in diesem Kapitel modellierten Wickel entsprechen einer typischen Fertigrolle aus dem MSDIRPP Datensatz mit einer Bahnlänge $L = 5500\text{ m}$, einer Materialdicke $T = 0,3\text{ mm}$ und einem Hülsendurchmesser von $D_{\text{Hülse}} = 0,3\text{ m}$ ($r_0 = 0,15\text{ m}$). Die Ortsauflösung der Bahn wird, wenn nicht explizit anders angegeben mit $f_s = 100/\text{m}$ definiert, um die Kreisform für die Darstellung im Wickelmodell ausreichend gut zu approximieren.

7.1 Radiale Störungen

Radiale Abweichungen δr im Wickel können über eine nachträgliche Manipulation der Radien r bzgl. bestimmter Drehwinkel φ_{rel} modelliert werden. Dies entspricht prinzipiell einer geometrischen Verformung des Rollenradius, z.B. durch eine äußere Krafteinwirkung. Je nach Störfunktion für $\delta r(\varphi_{\text{rel}}, r)$ ergeben sich unterschiedliche Rollenformen und Orts-Frequenzmuster im Spektrogramm. Radiale Abweichungen wirken in der Rollengeometrie bei der Abwicklung primär auf die Bahnspannung. Durch Asymmetrien wie z.B. Inhomogenitäten im Papier (CD-Profil), nicht symmetrisch zentrierte Einspannung der Rolle auf die Spannzapfen am Abwickler der Druckmaschine oder nicht perfekt ausgerichtete Walzen, können sich diese Störungen aber potentiell auch in Querrichtung (CD) auswirken (siehe S.40).

7.1.1 Exzentrizität

Abbildung 7.1 zeigt zunächst die Simulation einer exzentrisch eingespannten Fertigrolle in der Abrollung der Druckmaschine. Die Exzentrizität kann z.B. durch eine beschädigte Hülseninnenkante, oder durch unsanftes Einschieben der Spannzapfen verursacht werden. Die Exzentrizität kann durch eine einfache sinusförmige radiale Störung pro Umdrehung des Wickels simuliert werden (oben). Die Darstellung des Wickelmodells (links) zeigt diese radiale Störung relativ zu einem idealen Wickel (grauer Kreis). Das Spektrogramm (rechts) zeigt die daraus resultierende charakteristische Störung im Radius, wenn der Wickel wieder abgerollt wird. Es ist davon auszugehen, dass sich eine solche nicht ideale Abwicklung in derselben Charakteristik direkt auf die Bahnspannung oder im seitlichen Bahnlauf¹⁰² in der Druckmaschine auswirkt.

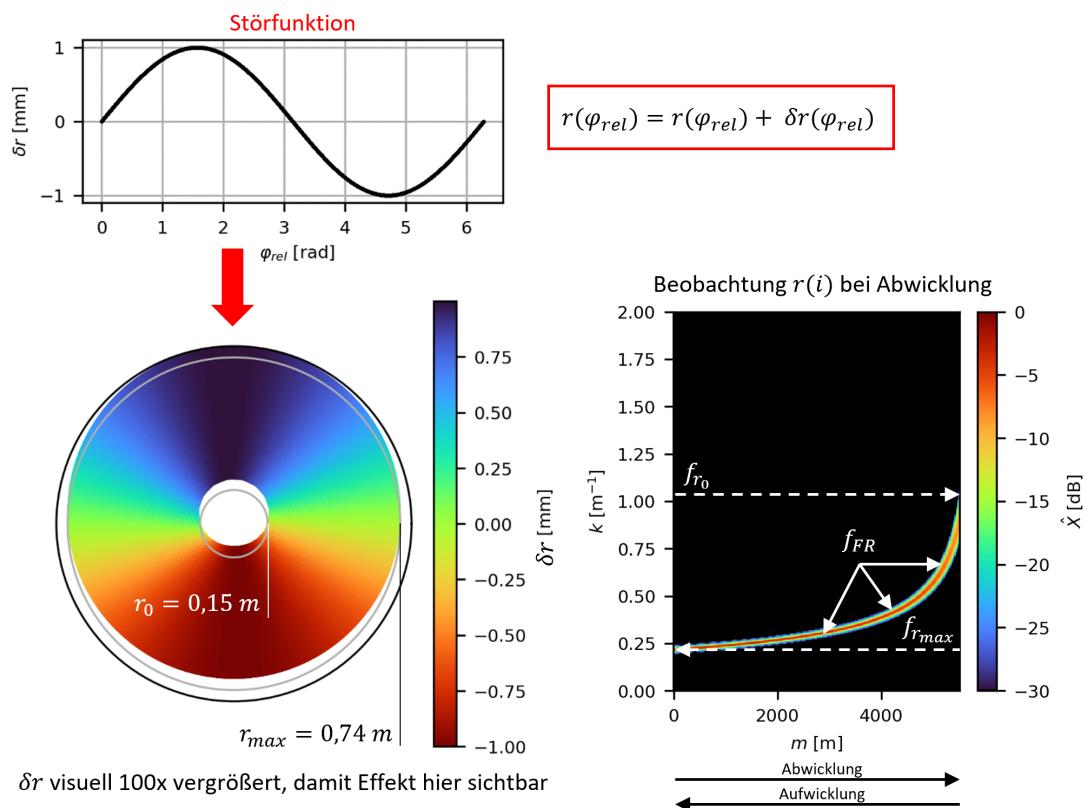


Abbildung 7.1 Simulation einer exzentrisch eingespannten Fertigrolle in der Abwicklung (links), durch eine einfach periodische Störfunktion (Sinus) pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{\text{rel}})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm exakt mit der Drehfrequenz des Wickels und formt einen kontinuierlich verlaufenden Frequenz-Chirp f_{FR} (rechts)

¹⁰²z.B. durch eine einseitige Exzentrizität des Wickels

Die Orts-Frequenzsignatur im Spektrogramm zeigt die veränderliche Drehfrequenz der Fertigrolle (FR) über den Rollenzyklus und wird im weiteren Verlauf der Arbeit mit f_{FR} gekennzeichnet. Die zum kontinuierlich abnehmenden Rollendurchmesser passende ansteigende Drehfrequenz, formt einen charakteristischen Frequenz-Chirp im Spektrogramm als einzelne kontinuierliche Linie. Zu Beginn der Bahnbeobachtung bei 0 m passt die Drehfrequenz f_{FR} zum Außenradius der Rolle r_{max} . Am Ende der Abrollung bei 5500 m passt die Drehfrequenz zum Radius der Hülse r_0 .

Die Wellenzahl k auf der y-Achse im Spektrogramm hängt mit den Geometrieparametern Radius r , Durchmesser D oder Umfang U bzw. Wellenlänge λ wie folgt zusammen und kann entsprechend umgerechnet werden.¹⁰³

$$k = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{U} = \frac{1}{D\pi} = \frac{1}{2r\pi} \quad (7.1)$$

Abbildung 7.2 zeigt die Modellierung einer gegenüberliegend gequetschten Rolle, z.B. durch eine Klemmung während des Transports. Die radiale Deformation wird durch eine mit dem Durchmesser ansteigenden Amplitude zweier Sinusschwingungen pro Rollenumdrehung als Störfunktion simuliert. Die Orts-Frequenzsignatur weist in diesem Fall nur den ersten Oberton (2. Harmonische) der Fertigrollengrundfrequenz ($2f_{FR}$) auf, da der Radius sinusförmig zweimal pro Umdrehung vom Ideal abweicht.

¹⁰³In den Spektrogrammen werden bestimmte Frequenzmuster mit f bezeichnet, obwohl es sich genau genommen nicht um "Frequenzen" mit einem Zeitbezug handelt, sondern um Örtsfrequenzen" mit einem Ortsbezug. Im Sinne der Leserlichkeit wird dennoch der Buchstabe f und der Begriff „Frequenz“ benutzt.

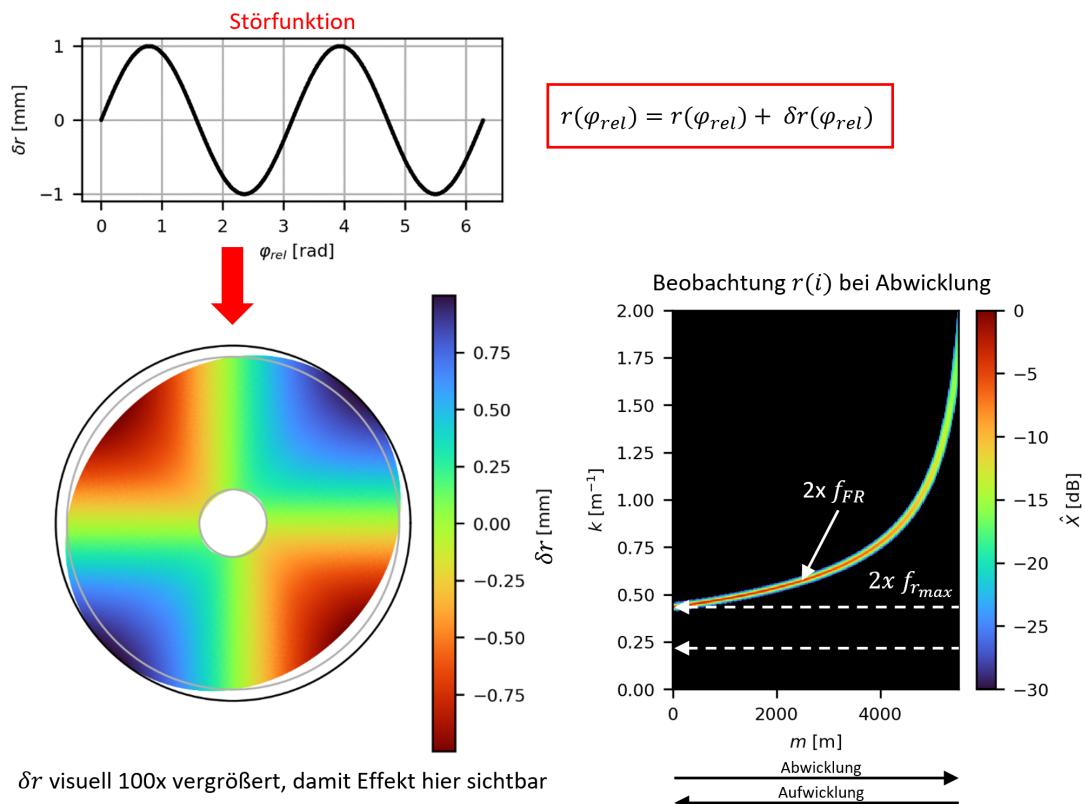


Abbildung 7.2 Simulation einer zweiseitig gequetschten Fertigrolle (links) durch eine zweifach periodische Störfunktion (Sinus) pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrrogramm mit der doppelten Rollendrehfrequenz $2f_{FR}$ (rechts)

Diese Systematik setzt sich bei weiteren Störungen pro Umdrehung entsprechend fort, siehe Abbildung 7.3.

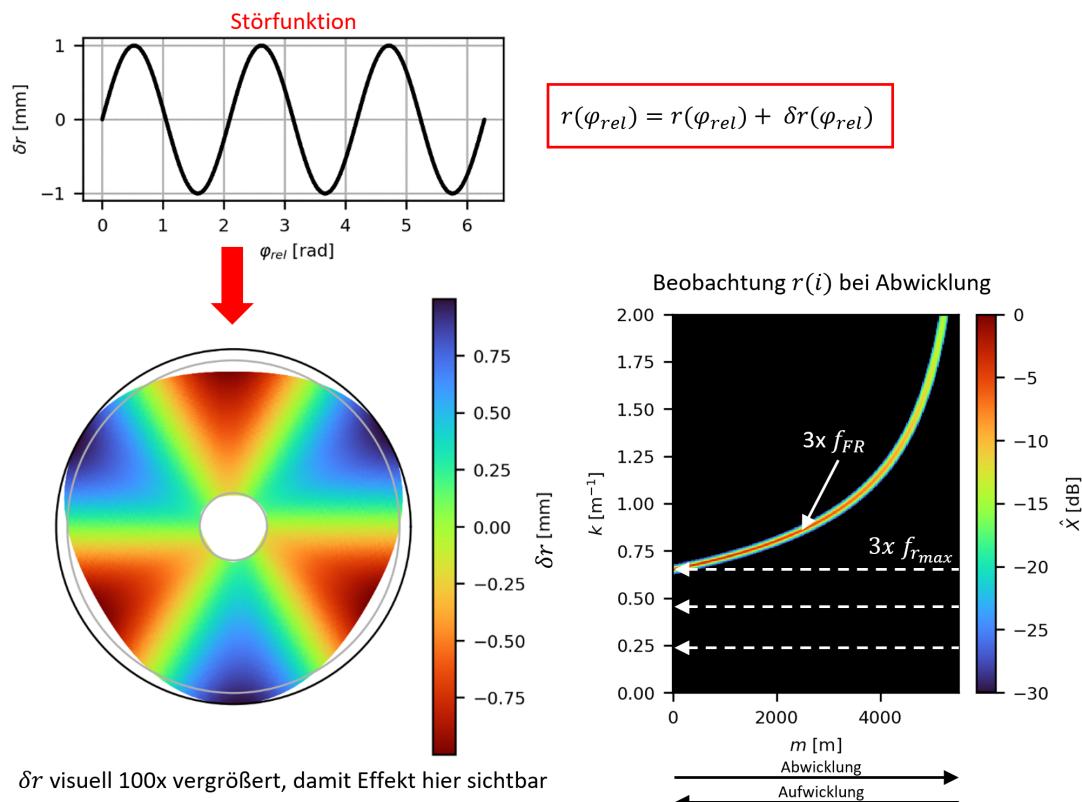


Abbildung 7.3 Simulation einer dreiseitig gequetschten Fertigrolle (links) durch eine dreifach periodische Störfunktion (Sinus) pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit der dreifachen Rollendrehfrequenz $3f_{FR}$ (rechts)

7.1.2 Lokale Deformation

Abbildung 7.4 zeigt eine weitere typische radiale Wickelstörung in Form einer einzelnen lokalen Deformation, wie sie durch das Absetzen des Wickels auf dem Umfang entsteht. Die Störung führt zu einer nicht sinusförmigen Deformation der Rolle. Zur Modellierung wird als Störfunktion eine sehr schmale Fensterfunktion für $\delta r(\varphi_{rel}, r)$ verwendet (oben). Das Spektrogramm zeigt nun zusätzlich zur Fertigrollengrundfrequenz f_{FR} viele Obertöne mit abnehmender Amplitude für steigende Frequenzen (2x bis 8x).

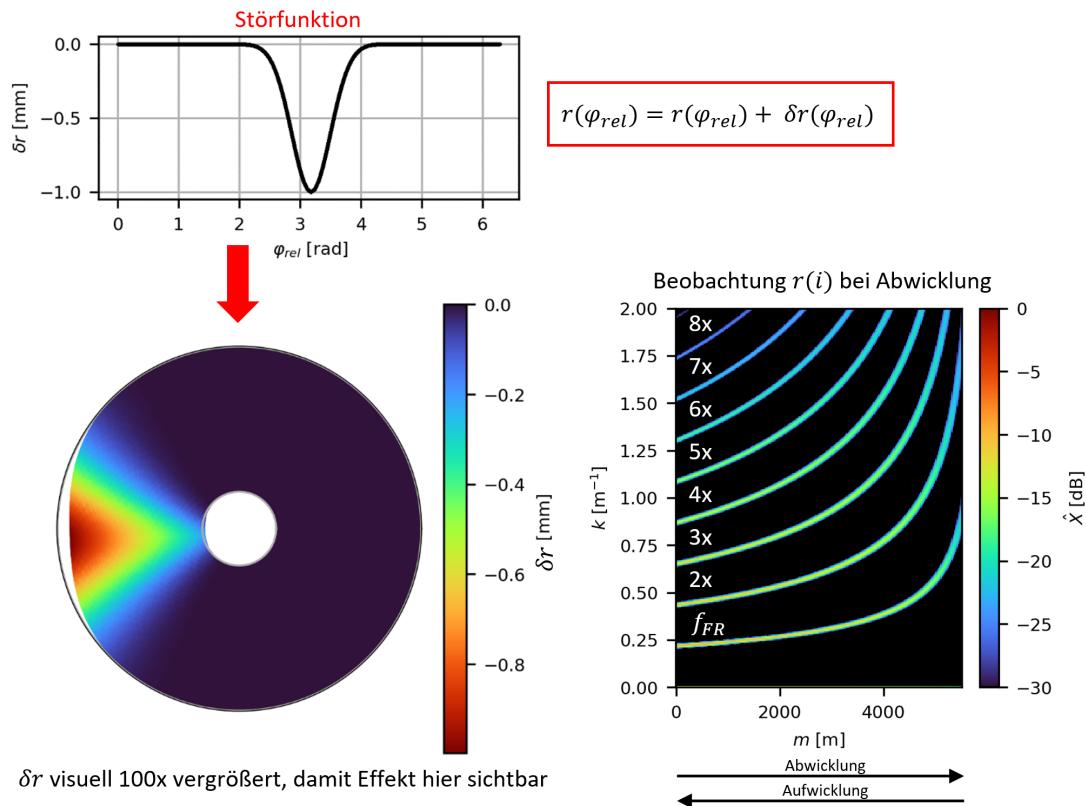


Abbildung 7.4 Simulation einer einzelnen lokalen Deformation der Fertigrolle (links) durch eine entsprechend schmalbandige Störfunktion pro Umdrehung $\delta r(\phi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit vielen Obertönen der Rollengrundfrequenz f_{FR} (rechts)

7.1.3 Konstant periodische Materialdickenschwankung

Eine weitere potentielle Ursache für radiale Störungen im Wickel sind periodische Dicken schwankungen im Material, welche sich beim Aufwickeln ungleichmäßig über den relativen Drehwinkel ϕ_{rel} aufsummieren. Abbildung 7.5 zeigt das Ergebnis einer Modellierung einer sinusförmigen Dickenschwankung mit einer Amplitude von $0,015\text{ mm}^{104}$ und einer Wellenlänge von $\lambda = 1\text{ m}$. Zur Verdeutlichung der Unrundheit des Wickels wird die radiale Störung δr visuell um Faktor 20 verstärkt dargestellt. Da die verdickten Bahnelemente (wie in der Realität) mehr Fläche einnehmen als die dünneren, erscheint der Wickel insgesamt bläulich.

¹⁰⁴entspricht einer Toleranz in der Materialdicke von 5 % bzgl. der Soll-Dicke von $T = 0,3\text{ mm}$

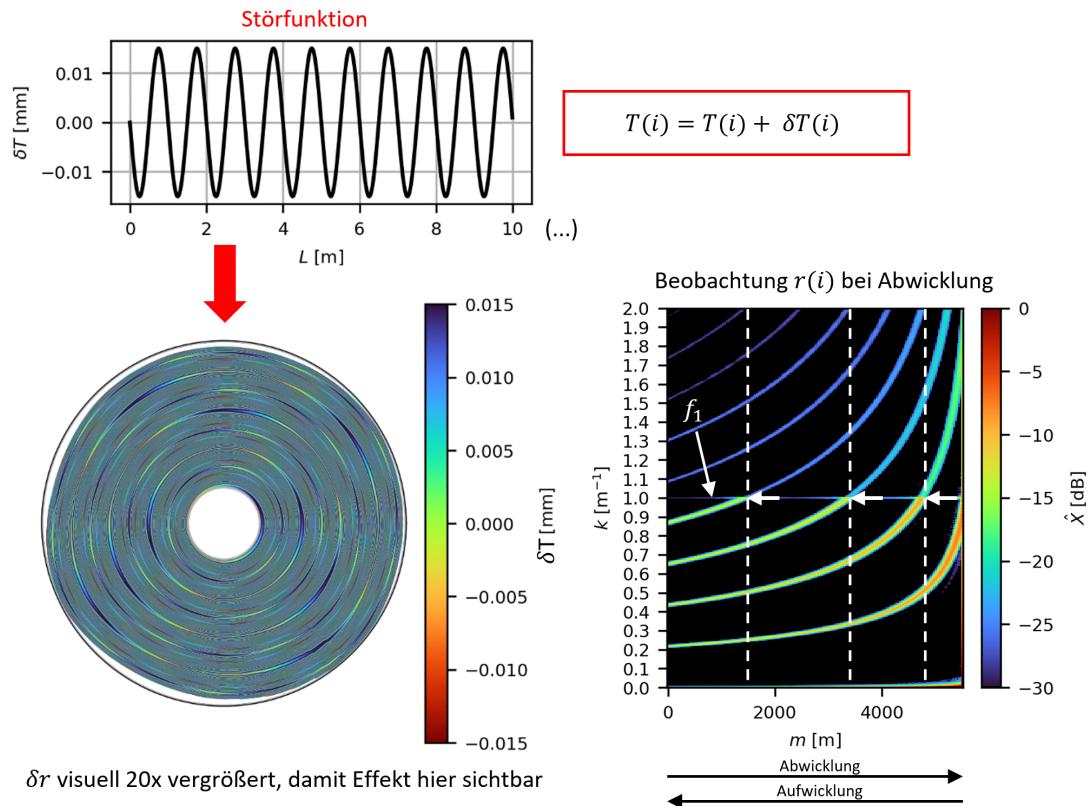


Abbildung 7.5 Simulation einer unrunden Fertigrolle (links) durch eine konstant periodische Materialdickenschwankung $\delta T(i)$ (mit der Frequenz f_1), die auf die ideale Bahn addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit einer systematischen Verstärkung der Obertöne, exakt bis zur Störfrequenz f_1 der ursächlichen Materialdickenschwankung (rechts)

Im Spektrogramm fällt auf, dass die Obertöne der Rollendrehfrequenz nur bis zu der Frequenz der simulierten Dickenvariation f_1 große Amplituden aufweisen. Die aufsummierten Lagen formen mehrere Wellenberge mit mehreren aber unterschiedlich starken Maxima pro Umdrehung. Sie sind aber nicht höherfrequenter als die ursächliche Störfrequenz. Oberhalb der Störfrequenz f_1 sind die Obertöne deutlich schwächer ausgeprägt.

In einer Aufwicklungssituation, z.B. in einem Rollenwickler¹⁰⁵ führt diese systematische Deformation dazu, dass es zu sehr plötzlichen Schwingungsanregungen kommt (weiße Pfeile an gestrichelter Linie). In dem Beispiel in 7.5 kommt es in einem Wickelzyklus aufgrund der Dickenvariation also dreimal zu einer schlagartigen zusätzlichen Schwingungsanregung durch den neu hinzukommenden Oberton. Kritisch sind also Rollendurchmesser, bei denen Obertöne der Rollendrehfrequenz mit der Frequenz der Materialdickenschwankung über-

¹⁰⁵hierbei muss das Spektrogramm in Abbildung 7.5 von rechts nach links gelesen werden

einstimmen. Derselbe Effekt wird auch in [124] und [123] erwähnt, aber nur rudimentär erläutert.

7.2 Laterale Störungen

Laterale Abweichungen in der Bahnlage im Wickel oder in der Bahnkante erzeugen je nach Ursache charakteristische Ringmuster auf der Rollenstirnseite. Einzelne Muster werden in der Literatur in unterschiedlichem Detailgrad beschrieben (siehe Kapitel 4.4.1).

Nachfolgend wird dargestellt, wie die Ringstrukturen auf der Rollenstirnseite mit Orts-Frequenzsignaturen im Spektrogramm zusammenhängen. Durch die Gegenüberstellung wird deutlich wie die Strukturen in den Rollenstirnseiten entstehen und welche Systematik den Ringmustern zugrunde liegt. Über den Vergleich zwischen Wickelmodell und Spektrogramm wird deutlich, dass über die Orts-Frequenz Spektrogramme der Bahnkantensignale die verschiedenen in der Bahnkante enthaltenen Informationen wesentlich besser voneinander differenziert werden können als bei einer visuellen Beobachtung der Rollenstirnseite, wie z.B. in [78] oder [104] vorgeschlagen wird. Hauptgrund ist, dass die beiden Dimensionen Ort (Laufmeter) und Frequenz im Spektrogramm unabhängig von der Rollendrehfrequenz aufgelöst sind.

Grundsätzlich ist das Aufwickeln einer Materialbahn um einen Hülsenkern aber ein ähnlicher Vorgang wie der Algorithmus der Frequenzanalyse mit unterschiedlichen Analysefrequenzen k (siehe Kapitel 3.2.2). Ganz ähnlich zur STFT wird bei der visuellen Beobachtung der Rollenstirnseite im Prinzip auch eine optische Frequenzanalyse durchgeführt, wobei die Fensterlänge in diesem Fall dem radialen Auslösevermögen in der visuellen Betrachtung der Stirnseite entspricht. Bei einem über den Radius konstanten Auflösungsvermögen ergibt sich bei kleinen Radien ein kürzeres Analysefenster als bei großen Radien. Die niedrigste Analysefrequenz ist durch den äußeren Rollenradius vorgegeben und die höchste Analysefrequenz durch den Hülsenradius. Der auf diese Weise vom Radius und der radialen Auflösung vorgegebene Bahnabschnitt wird mit der zum jeweiligen Rollenradius passenden Wickelfrequenz aufgewickelt. Kommt es bei periodischen Abweichungen in der Bahnkante zwischenzeitlich zu einer Superpositionierung über mehrere Lagen hinweg, wird dies in der Rollenstirnseite visuell als Ringmuster sichtbar. Die radiale Breite des Ringes hängt davon ab über wie viele Lagen hinweg eine Superpositionierung der Störung vorliegt.

7.2.1 Konstant periodische Bahnkantenstörungen

Abbildung 7.6 zeigt zunächst die Modellierung einer konstant periodischen Bahnkantenstörung durch eine Untermesservibration mit der Frequenz $f_1 = 1,4/\text{m}$. Eine solche Bahnkantenstörung führt bekanntermaßen zu konzentrischen Ringmustern auf der Rollenstirnseite [104, RD-50, SD-12], [89], [72].

Zur Verdeutlichung der zugrundeliegenden Systematik hinter den Ringmustern wird einmal pro Umdrehung virtuell ein lokaler 1 mm tiefer Einschnitt in die Rollenstirnseite hinzugefügt, um die Rollendrehfrequenz und deren Obertöne im Spektrogramm zu visualisieren (ähnlich Abbildung 7.4). Der Ort des Einschnittes ist im Wickelmodell (links) mit einem schwarzen Pfeil markiert. In diesem Bereich erscheint der Wickel insgesamt rötlicher. Die Information der Untermesservibration ist bei $f_1 = 1,4/\text{m}$ im Spektrogramm als rote horizontale Linie gut erkennbar und entspricht einer konstanten Untermesservibration bei einem Messerdurchmesser von $D_{LB} = 0,24\text{ m}$ und einem Overspeed $\Delta v = 5\%$.

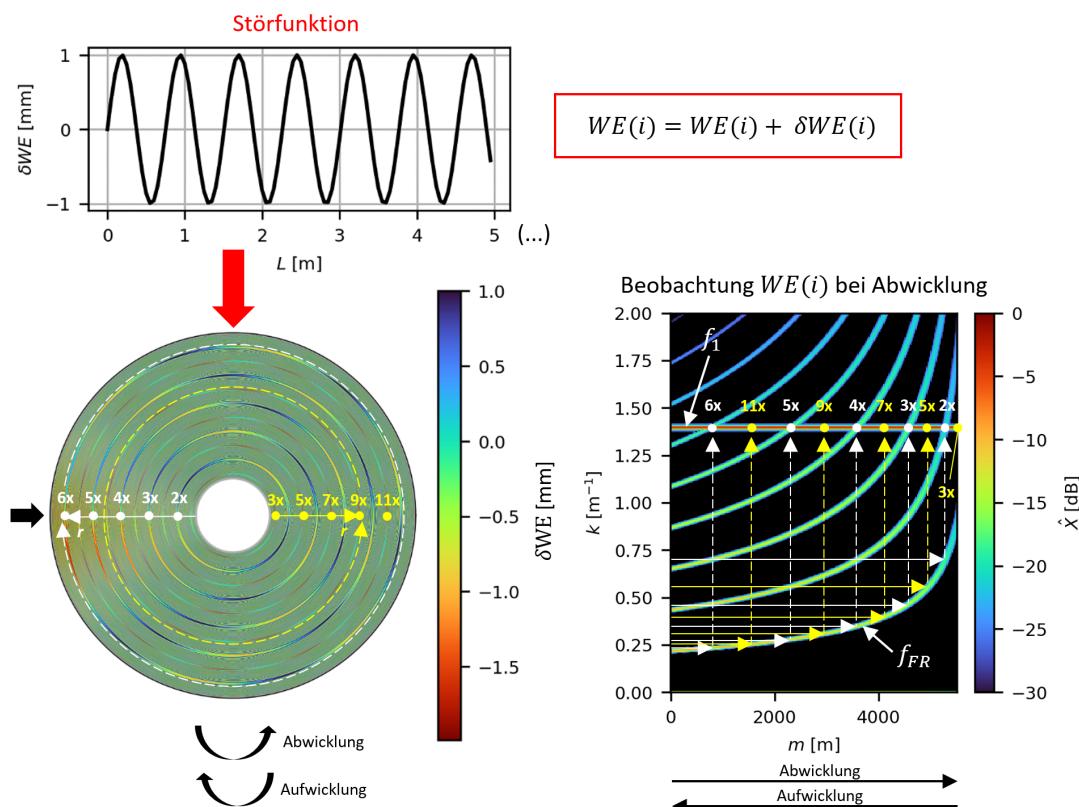


Abbildung 7.6 Modellierung einer konstant periodischen Bahnkantenstörung durch eine axiale Untermesservibration, die zu konzentrischen Ringstrukturen auf der Rollenstirnseite führen (links) und eine horizontale Orts-Frequenzsignatur f_1 im Spektrogramm bilden (rechts)

Zur Verdeutlichung der Ringstrukturen im Wickel werden dieselben Daten in Abbildung 7.7 ergänzend auch noch einmal in einem kartesischen Koordinatensystem, also bzgl. des Radius r und dem relativen Drehwinkel φ_{rel} visualisiert.

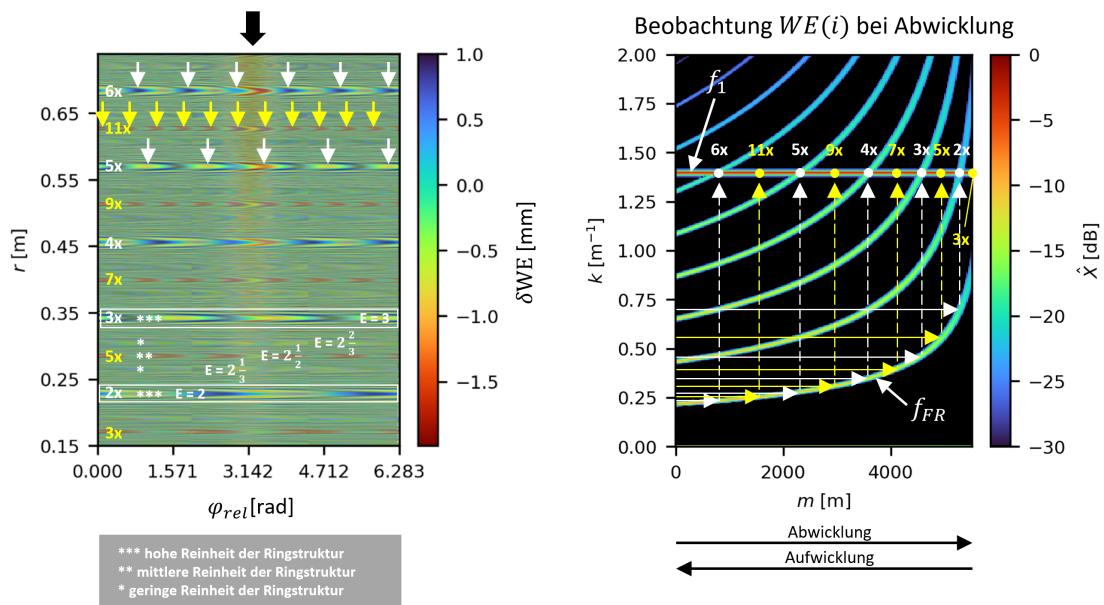


Abbildung 7.7 Systematischer Zusammenhang zwischen den Ringstrukturen auf der Rollenstirnseite (links) in einem kartesischen Koordinatensystem bzgl. Drehwinkel φ_{rel} und Radius r und der Orts-Frequenzsignatur im Spektrogramm (rechts) am Beispiel einer konstant periodischen Untermesservibration (f_1)

Auf der Rollenstirnseite (siehe Abbildung 7.6 und 7.7 (jeweils links)) sind fünf voll ausgeprägte (****) konzentrische Ringe mit zueinander gleichen Abständen zu sehen (2x, 3x, 4x, 5x, 6x). Im Spektrogramm kreuzt die dafür verantwortliche konstante Störfrequenz f_1 genau fünf mal die verschiedenen Obertöne (2x, 3x, 4x, 5x, 6x) der Fertigrollengrundfrequenz f_{FR} .

Die Ringe weisen eine periodische Struktur über den Drehwinkel φ_{rel} auf. Beispielsweise besitzt der äußerste voll ausgeprägte Ring 6 Perioden N_P (6x weiße Pfeile). Nach ca. 800 m abgewickelter Bahn wird dieser Ring abgewickelt. Zu diesem Zeitpunkt kreuzt die dafür verantwortliche Störfrequenz f_1 genau die 6. Harmonische der Rollendrehfrequenz (weißer Punkt bei 6x). Der Rollenradius zu diesem Zeitpunkt entspricht genau der Wellenzahl, die sich über eine Projektion der x-Koordinate dieses Kreuzpunktes auf die Rollengrundfrequenz f_{FR} an der y-Achse ablesen lässt (gestrichelte und durchgezogene Pfeile).

Die Ringmuster mit mittlerer Reinheit (**) zwischen den fünf voll ausgeprägten Ringen markieren Radien, bei denen die Messerfrequenz genau mit einer Zwischenfrequenz ($b = \frac{1}{2}$)

der Rollengrundfrequenz übereinstimmen (gelbe Markierungen). Diese Ringmuster sind visuell deutlich schwächer ausgeprägt, da bei den Zwischenfrequenzen nicht jede Lage in Superposition liegt sondern nur jede zweite. Ringmuster auf Drittelfrequenzen ($b = \frac{1}{3}$ bzw. $b = \frac{2}{3}$) sind mit (*) markiert und sind noch schwächer ausgeprägt.

Der Ring, der durch die Übereinstimmung mit der Zwischenfrequenz $(5 + \frac{1}{2})f_{FR}$ hervorgerufen wird, hat 11 Perioden. Die beiden nächstgelegenen voll ausgeprägten Ringe besitzen 5 und 6 Perioden. Durch Addition dieser beiden Perioden ergeben sich genau die 11 wahrnehmbaren Perioden im Ring dieser Zwischenfrequenz. Neben der Reinheit des Ringes zeigt auch die Anzahl der Perioden in diesem Ring genau an, ob die Störfrequenz mit einem ganzzahligen Vielfachen der aktuellen Rollenfrequenz ($N_P f_{FR}$) oder mit einer Zwischenfrequenz $((N_P + b)f_{FR})$ übereinstimmt. Wobei die Ringe visuell immer schwächer werden, je größer der Nenner von b wird. In Abbildung 7.7 werden die Ringe mit $E = (N_P + b)f_{FR}$ markiert.

Durch den Umstand, dass durch die konstante radiale Auflösung in einer visuellen Betrachtung mit abnehmenden Radius, die optisch analysierbare Bahnlänge¹⁰⁶ immer kleiner wird, bleiben die Ringe bei einer konstant periodischen Störung genau gleich breit, obwohl sich die Steilheit der Überkreuzung verringert. Je steiler die Überkreuzung, desto kürzer ist die Superpositionierung und umgekehrt. In Übereinstimmung mit [72] kann über das finite Wickelmodell außerdem bestätigt werden, dass die konkav geformten Perioden innerhalb der Ringe stets in Abwicklungsrichtung spitz zulaufen. Dementsprechend kann auch die Wicklungsrichtung direkt aus der Struktur der Ringmuster auf der Rollenstirnseite abgelesen werden.

7.2.2 Nicht konstant periodische Bahnkantenstörungen

Das nächste Beispiel in Abbildung 7.8 zeigt die Simulation einer nicht konstant periodischen Bahnkantenstörung f_1 durch eine exzentrische Abwicklung und deren potentielle Beeinflussung der Schnittqualität in einem Klinikroller. Es wird angenommen, dass die Störung aus der Abwicklung zunächst auf den Bahnlauf im Klinikroller übertragen und von dort aus über die feststehende Schneidpartie, als nicht konstant periodische Störung in die Bahnkante geschnitten wird. Bei Abwicklung der Rolle in der Druckmaschine kommt es zur Umkehrung der Bahnlaufrichtung und einer entsprechenden Spiegelung der Ortsfrequenzsignatur dieser Störung. Über die zusätzliche Einkerbung auf der Rollenstirnseite von 1 mm werden wieder sämtliche Obertöne zur Orientierung visualisiert.¹⁰⁷

¹⁰⁶ähnlich der Fensterlänge in einer STFT

¹⁰⁷Auf eine Zeitreihendarstellung der jeweiligen Störfunktionen wird von nun an zur Vereinfachung verzichtet.

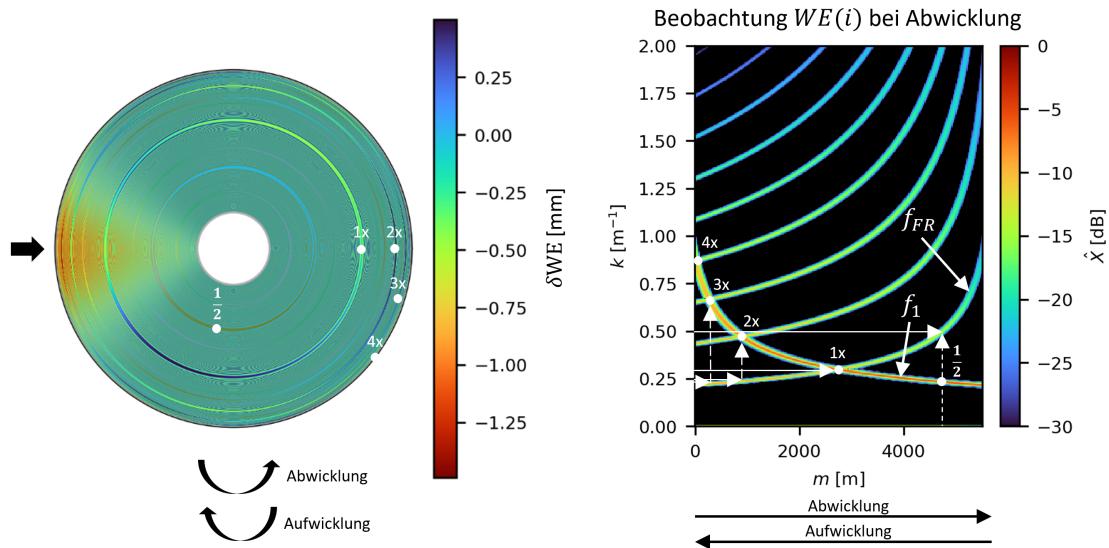


Abbildung 7.8 Gespiegelte Rollendrehfrequenz als Störfrequenz f_1 in der Bahnkante, welche eine Exzentrizität in vorausgegangener Umrollung der Fertigrolle simuliert

Durch die Kreuzungspunkte (weiße Punkte) mit der Rollendrehfrequenz und dessen Overtöne ergibt sich in diesem Fall eine Ringanordnung mit nach außen hin abnehmenden Abständen. Je flacher die Frequenzen sich kreuzen, desto breiter werden die Ringe, da die Superpositionierung länger anhält und sich je nach Radius über mehr Lagen erstreckt.

Das nächste Beispiel in Abbildung 7.9 demonstriert, wie durch dieselbe Systematik in der Fertigrollenwicklung bei einer deformierten Mutterrolle (hier eine exzentrische Deformation), ebenfalls systematische Ringmuster auf der Rollenstirnseite der Fertigrolle entstehen können (siehe auch RD-49).¹⁰⁸ Der Frequenzverlauf im Spektrogramm wird in diesem speziellen Fall mit f_{MR} bezeichnet, da er durch die Mutterrolle (MR) verursacht wird. Die modellierte Fertigrolle stammt aus dem ersten Set der Fertigrollenwicklung, bei dem der Durchmesser der Mutterrolle stets größer ist als die Fertigrolle, sodass zu keinem Zeitpunkt ein identischer Durchmesser zwischen Mutterrolle in der Abwicklung und der Fertigrolle in der Aufwicklung vorliegt. Dementsprechend werden auch keine ganzzahligen Obertöne gekreuzt (siehe Spektrogramm). Sehr wohl aber Zwischenfrequenzen wie z.B. $\frac{1}{2}f_{FR}$. Die entstandenen Ringe sind entsprechend schwächer ausgeprägt (** für $b = \frac{1}{2}$ und * für $b = \frac{1}{3}$ bzw. $b = \frac{2}{3}$).

¹⁰⁸Durch die Störung in der Abwicklung aufgrund der Deformation, wird zunächst der Bahnlauf im Maschinenroller und damit auch der Schneidprozess im Takt der Störung beeinflusst und so fest in die Bahnkante geschnitten.

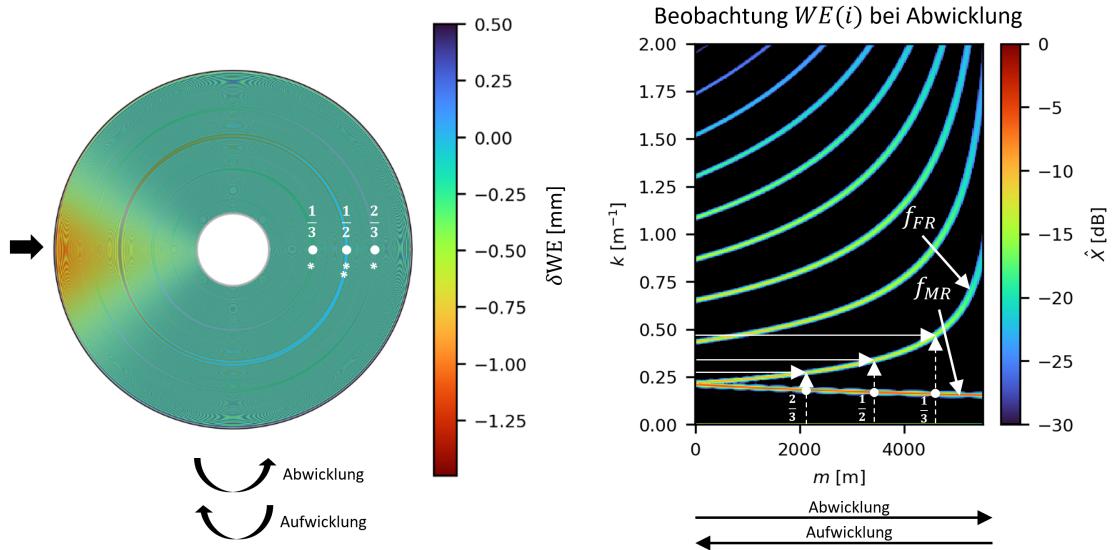


Abbildung 7.9 Eine in die Bahnkante geschnittene Mutterrollendrehfrequenz f_{MR} mit Überschneidungen bei Halb- ($b = \frac{1}{2}$) und Drittelfrequenzen ($b = \frac{1}{3}$ bzw. $b = \frac{2}{3}$) der Rollengrundfrequenz führen zu mittel (***) und sehr schwach (*) ausgeprägten Ringmustern im Wickel (links)

Mit diesem Wissen lässt sich über die Rollenstirnseite theoretisch ablesen aus welchem Set eine Fertigrolle stammt, da sich die Ringmuster bei unterschiedlichen Durchmessern der Mutterrolle systematisch unterscheiden. Über das Spektrogramm ist dies ebenfalls möglich, jedoch erst nach der Abwicklung der Rolle in einem Folgeprozess.

Einen aus den vorherigen Beobachtungen abgeleiteten Sonderfall zeigt Abbildung 7.10 mit einer Störfrequenz f_1 , welche niemals einen rationalzahligen Vielfachen der Rollendrehfrequenz kreuzt. Er kann dementsprechend nicht über die Stirnseitenmethodik detektiert werden, da die Störung keine Ringmuster erzeugt. Dieser konstruierte Fall, mit einer parallel zur Fertigrollenfrequenz f_{FR} und dessen Obertönen verlaufenden Störung, veranschaulicht damit exemplarisch eine grundsätzliche Schwäche der Rollenstirnseitenbeobachtung und macht gleichzeitig die Stärke der Bahndatenvizualisierung in einem Spektrogramm deutlich.

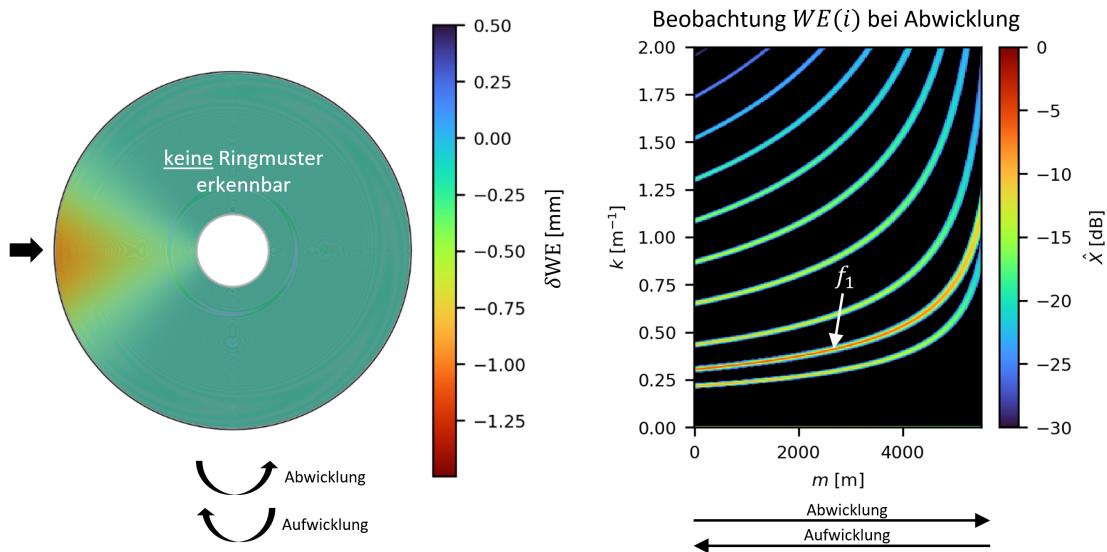


Abbildung 7.10 Eine zur Rollendrehfrequenz parallel verlaufende Störfrequenz f_1 im Spektrogramm (rechts) hinterlässt keine Ringmuster auf der Rollenstirnseite (links)

Ein weiterer Nachteil der Stirnseitenbeobachtung wird in Abbildung 7.11 verdeutlicht. Hier liegen mehrere Frequzinformationen in der Bahnkante vor und es kommt infolge dessen zu gleichzeitigen Überkreuzungen mit unterschiedlichen Obertönen und/oder Zwischenfrequenzen der Fertigrolle. Dadurch überlagern sich die vielen Informationen in den einzelnen Ringen. Eine visuelle Differenzierung der Einzelstörungen ist dann kaum mehr möglich. Im Spektrogramm sind die Informationen unverändert gut differenzierbar, was die Überlegenheit des Spektrogrammes nochmals verdeutlicht.

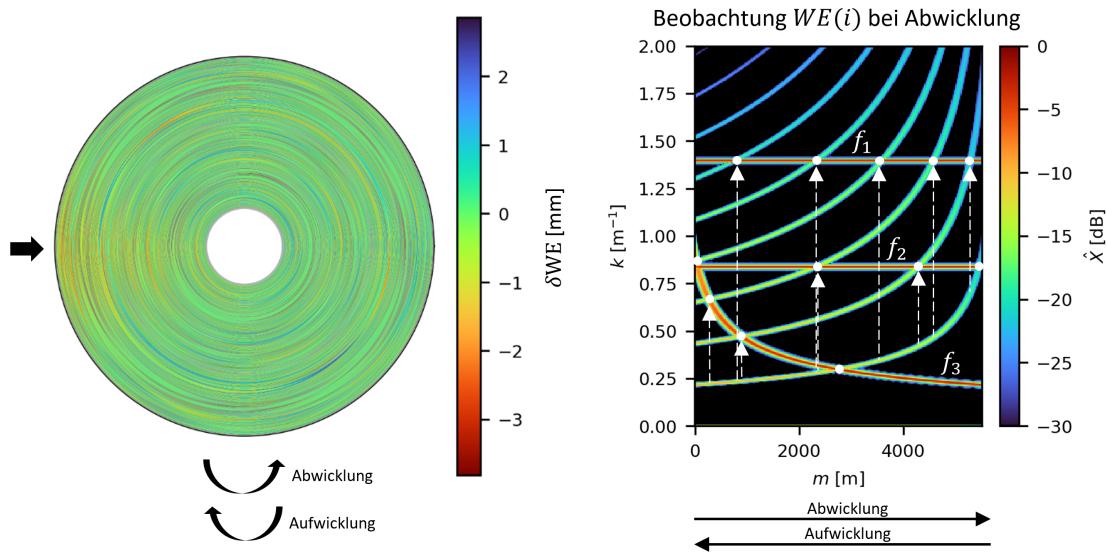


Abbildung 7.11 Überlagerung mehrerer Bahnkantenstörungen (f_1 , f_2 und f_3) führen zu sehr schwer interpretierbaren Ringmustern im Wickel (links); Im Spekrogramm (rechts) bleiben alle Informationen gut differenzierbar

7.2.3 Sprünge und Phasenversatz

Über die typischen Ringmuster hinaus gibt es weitere prinzipielle laterale Abweichungen, die völlig andere charakteristische Orts-Frequenzmuster im Spekrogramm erzeugen. Ein Beispiel ist ein Kratzer auf der Rollenstirnseite, der beispielsweise während des Rollenhandlings entstanden sein könnte. Im Wickelmodell in Abbildung 7.12 ist eine solche Einkerbung über eine sehr schmale Fensterfunktion modelliert. Die Kerbe verläuft über die Rollenstirnseite in axialer Richtung mit nach innen linear abfallender Tiefe (Amplitude). Am Außenradius ist die Einkerbung exakt 1 mm tief. Bei einer Abtastrate von $f_s = 10/\text{m}$ in der inline Beobachtung der Bahnkante entsteht im Spekrogramm eine Netzartige Orts-Frequenzsignatur, die an die Rollendrehfrequenz gekoppelt ist.

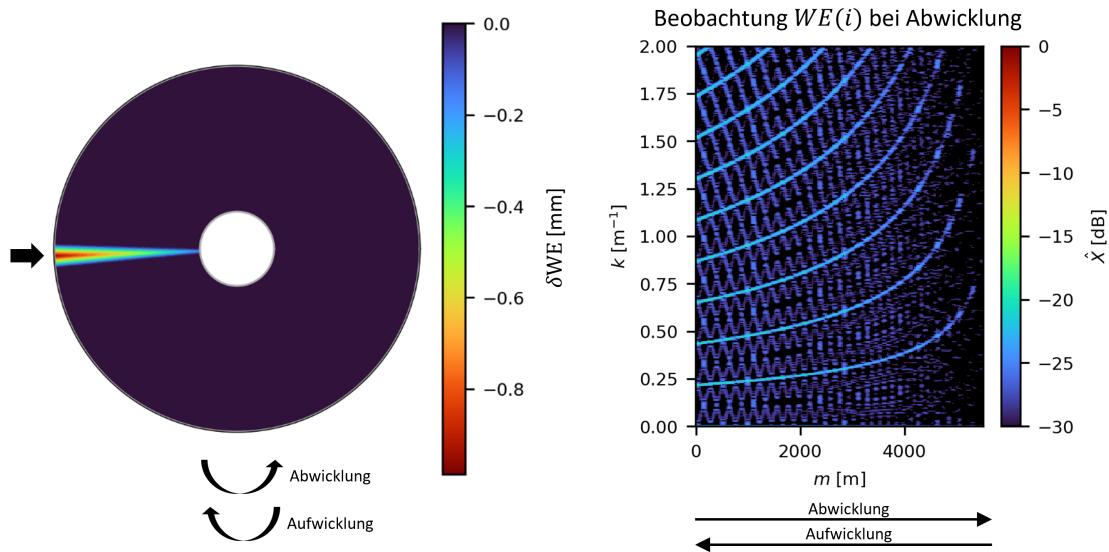


Abbildung 7.12 Modellierung einer lokal sehr begrenzten impulsartigen Bahnkantenstörung pro Rollenumdrehung (Kratzer) auf der Rollenstirnseite (links) führt zu extrem vielen Obertönen, welche in Kombination mit einer Unterabtastung ($f_s = 10/\text{m}$) wiederum zu vielen Aliasfrequenzen im Basisband führen, wodurch schließlich eine Gitternetzstruktur im Spektrogramm (rechts) sichtbar wird

Der wiederkehrende Impuls im Bahnkantensignal erzeugt sehr viele Obertöne, bis in sehr hohe Frequenzbereiche hinein. Durch das Nyquist-Shannon-Theorem werden alle Frequenzanteile $f_i > \frac{f_s}{2}$ als Aliasfrequenzen ins Basisband gespiegelt. Durch den Alias-Effekt und die unterschiedliche Lage (Regel- und Kehrlage) der gespiegelten Frequenzlinien erscheint eine charakteristische Gitternetz-Struktur im Spektrogramm. Sie setzt sich aus allen, zum Teil mehrfach gespiegelten Obertonlinien zusammen. Dadurch, dass sich die Störung aus sehr vielen Obertönen zusammensetzt, ist jede Einzellinie im Spektrogramm deutlich schwächer ausgeprägt als der Kratzer tief ist.¹⁰⁹

Bei plötzlichen Sprüngen im lateralen Bahnlauf oder in der Bahnkante, die nicht mit der Rollendrehfrequenz zusammenhängen, ergeben sich völlig andere Muster im Wickel und im Spektrogramm. Eine typische Ursache ist z.B. eine plötzliche Bahnzugänderung, die durch eine Veränderung der Bahngeschwindigkeit hervorgerufen werden könnte (siehe RD-56). Hier zeichnet sich dann auf der Rollenstirnseite ein dünner Ring über eine oder wenigen Lagen ab. Wenn der laterale Bahnlauf sich plötzlich und danach anhaltend verändert, entsteht nur eine einzelne sichtbare Kante in der Rollenstirnseite, siehe Abbildung 7.13. Der Sprung führt im Spektrogramm zu einer nach hohen Frequenzen hin gedämpften vertikalen Linie. Durch den Sprung werden kurzzeitig sehr viele Frequenzen gleichzeitig angeregt. In

¹⁰⁹1 mm entsprächen 0 dB

diesem Fall ist der Sprung unabhängig von der Rollendrehfrequenz, weshalb das Amplitudenmaximum dieser Signatur im Gleichanteil liegt und sich kontinuierlich über sehr viele Frequenzen abschwächt. Die anderen Muster (f_{FR} und f_1) bleiben von dem Sprung offensichtlich unbeeinflusst. Die gute Differenzierbarkeit der Effekte im Spektrogramm zeigt sich auch hier wieder.

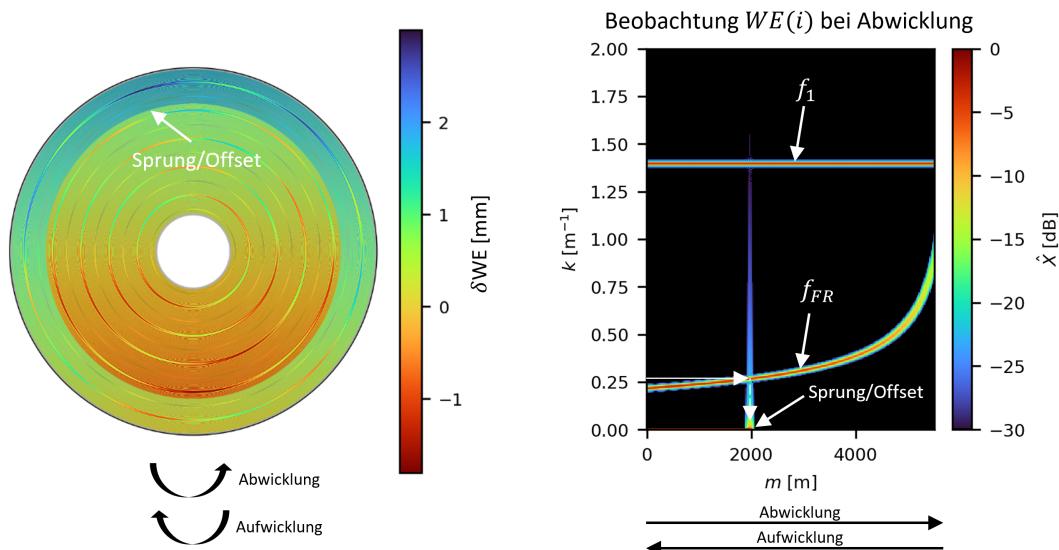


Abbildung 7.13 Modellierung einer plötzlichen aber dauerhaften Änderung (Sprung) im lateralen Bahnlauf zeigt sich als Offset im Wickel (links) und als vertikale Linie im Spektrogramm (rechts)

Kommt es bei einer bestimmten Störfrequenz zu einem plötzlichen Phasenversatz, kann dies auch in einem Amplitudenspektrum der betreffenden Störfrequenz und damit der Ursache zugeordnet werden. Auch dann, wenn in dem Signal mehrere unterschiedliche Störfrequenzen enthalten sind. Abbildung 7.14 demonstriert eine kurzzeitige Unterbrechung einer Untermesservibration f_1 bei 2000 m. Ein solcher Phasensprung im Messersignal könnte z.B. durch eine kurzzeitige Blockade, ein plötzliches Voreilen der Messer, einer reduzierten Reibung oder durch eine kurzzeitige Veränderung in der Überlappung der Messer verursacht werden. Als Beispiel für eine davon völlig unabhängige laterale Bahnlaufstörung wird wieder das Frequenzmuster einer exzentrischen Rollenabwicklung f_{FR} überlagert. Der Phasensprung zeichnet sich im Spektrogramm eindeutig nur ausgehend von der Signatur des Untermessers ab und beeinflusst die Signatur der Exzentrizität (f_{FR}) nicht. Die vertikal verlaufende Signatur ist damit eindeutig als Phasensprung bzgl. der Störfrequenz f_1 zuordnbar. In der Rollenstirnseitenansicht ist eine derart kurzzeitige Störung praktisch unmöglich visuell zu erfassen.

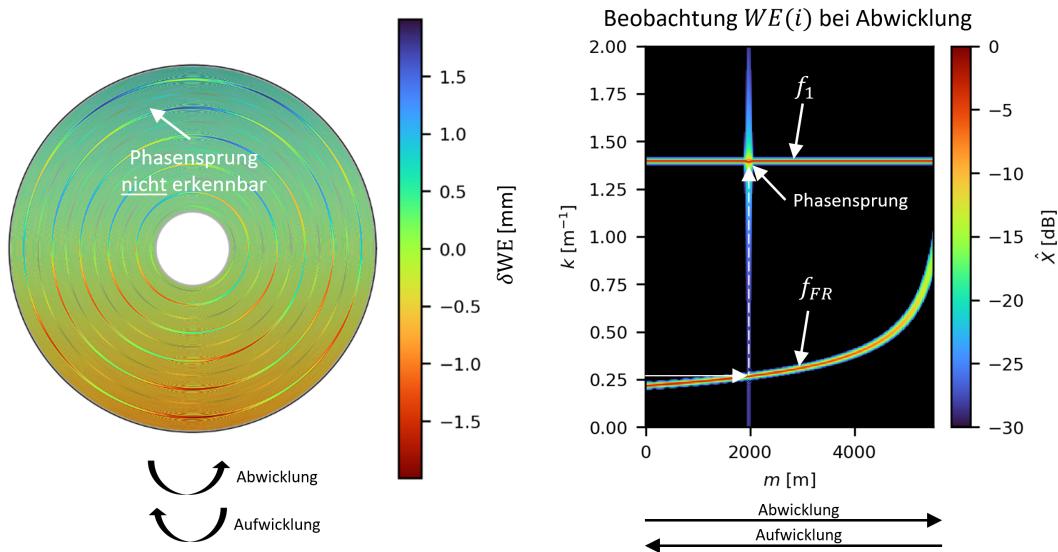


Abbildung 7.14 Kurzzeitiger Phasensprung in der Messervibration erzeugt im Spektrogramm eine vertikale Signatur, die eindeutig von der ursächlichen Messerfrequenz (f_1) ausgeht (rechts); Auf der Rollenstirnseite (links) ist der Phasensprung dagegen visuell nicht erkennbar

7.3 Tangentiale Störungen

7.3.1 Bahndehnung im Wickelprozess

Im Rollenwicklungsprozess kommt es durch Nip induzierte Walkvorgänge im Walzenbett typischerweise zu einer Längsdehnung der Bahn [25]. Dies führt im Wickel zu einer charakteristischen tangentialen Lageverschiebung. Der Effekt kann mit der sogenannten *J-Linien Prüfmethode* sichtbar gemacht werden. Für die Prüfmethode muss die Rolle in der Aufrollung immer wieder angehalten werden, um eine Referenzlinie auf der Stirnseite aufzutragen, die sich bei Weiterführung der Wicklung tangential entgegen der Rotationsrichtung verschiebt. Eine alternative Möglichkeit der Markierung ohne Wickelstopp, zeigt GÜLDENBERG in [25, S.77-79].¹¹⁰

Aus den Beobachtungen in 7.2.1 drängt sich ein weiterer Ansatz für die J-Linien Prüfmethode auf. Bekannte periodische Bahnkantenabweichungen (laterale Störungen) könnten potentiell ebenfalls als Markierung zur Visualisierung der J-Linie genutzt werden. Die Ringstrukturen hochfrequenter Bahnkantenvariationen (z.B. durch ein vibrierendes Untermesser) erzeugen systematische Muster auf der Stirnseite, welche optisch ausgewertet

¹¹⁰Mithilfe eines Inkjet-Druckkopfes werden hier abhängig vom Rollenradius periodische Markierungen auf die Bahnkante gedruckt.

und miteinander verglichen werden können. Eine konstant periodische Bahnkantenstörung sollte bei identischen Wickelparametern stets dieselben Ringstrukturen, mit identischer tangentialer Position der periodischen Strukturen innerhalb der Ringe aufweisen. Weichen die tangentialen Positionen der Perioden relativ zu einer Referenzrolle voneinander ab, lässt sich daraus theoretisch eine relative tangentielle Lagenverschiebungen zwischen diesen beiden Rollen optisch ermitteln, ohne dass die Stirnseite dafür zusätzlich markiert und der Wickelvorgang zwischendurch gestoppt werden muss.

Die modellierten Beispiele in Abbildung 7.15 demonstrieren diesbezüglich wie deutlich sichtbar sich die periodischen Strukturen der Ringmuster tangential entgegen der Rotationsrichtung verdrehen, wenn die Bahn eine zusätzliche Bahndehnung von nur $\Delta\epsilon = 0,01\%$ während des Wickelvorgangs erfährt (rechts). Die linke Rolle zeigt die Referenzrolle ohne zusätzliche Dehnung.

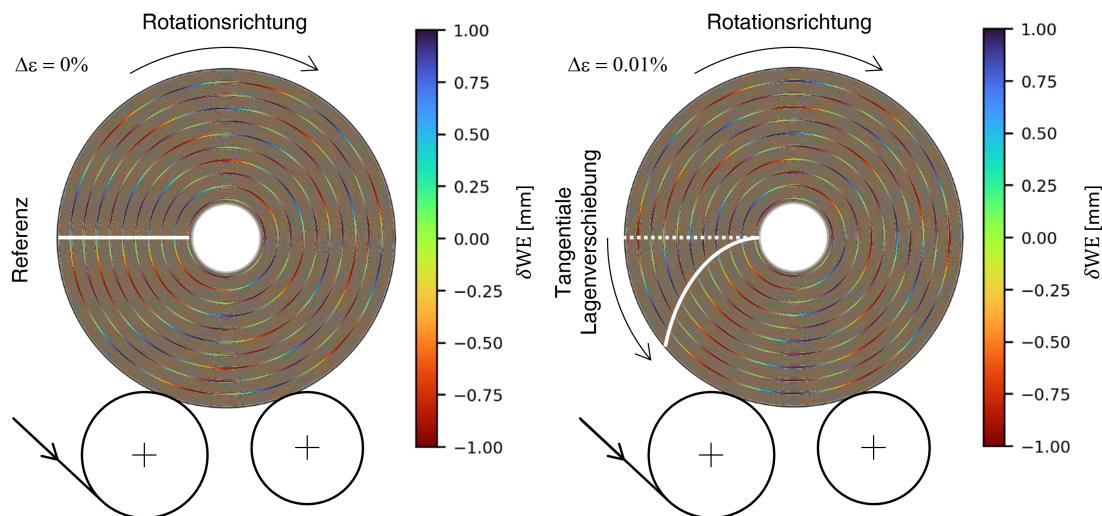


Abbildung 7.15 Veranschaulichung einer tangentia- len Lagenverschiebung über das Verdrehen einer konstant periodischen Bahnkantenstörung (z.B. Untermesser); Referenzrolle ohne Nip induzierte tangentiale Lagenverschiebung (links); Nip induzierte tangentiale Lagenverschiebung simuliert durch eine zusätzliche Bahndehnung $\Delta\epsilon = 0,01 \%$ (rechts)

Das Ringmuster der Untermesservibration wird durch die simulierte Bahndehnung nachträglich in die Länge gezogen. Dadurch sinkt die Frequenz dieser Störung im Bahnkanten-signal minimal. Die Veränderung in den Rollenstirnseiten ist sehr deutlich zu beobachten. Im Spektrogramm kann ein derart kleiner Unterschied in der tangentialen Lagenposition bzw. in der Bahnänge über ein minimales Absenken der Störfrequenz nicht direkt de-

taktiert werden. Auf eine Darstellung des Spektrogrammes wird daher an dieser Stelle verzichtet.¹¹¹

7.3.2 Bahndehnung in Druckmaschine

Das nächste Beispiel in Abbildung 7.16 demonstriert einen Fall, bei dem kleinste Frequenzabweichungen mit einem zu dieser Abweichung verhältnismäßig kurzen Analysefenster ($N = 112$ m), im Gegensatz zum vorherigen Beispiel, sehr wohl im Spektrogramm sichtbar werden.

Nicht ideale Walzen in Rolle-zu-Rolle Prozessen können den Bahnlauf durch vielfältige Ursachen (Lagerschäden, Unrundheit, Nichtparallelität etc.) konstant periodisch stören. Im folgenden Beispiel werden zwei aufeinanderfolgende und vollkommen identische, nicht ideal rotierende Kühlwalzen in der Druckmaschine angenommen. Sie besitzen einen Durchmesser $D = 0,168$ m (siehe Tabelle 8.2 (S.229)). Beide Walzen besitzen exakt dieselben Störfrequenzen (Drehfrequenz der Walze) mit der sie den Bahnlauf periodisch beeinflussen. Es wird angenommen, dass die aufgeprägte Störfrequenz mit steigender Bahndehnung entlang der Druckmaschine effektiv abnimmt. Sie dehnt sich also mit der Bahn. Für die Druckzylinder wird derselbe Effekt in der verwendeten Druckmaschine durch eine Zylinderstaffelung¹¹² kompensiert. Bei nichtdruckenden Walzen gibt es eine solche Staffelung nicht. Nicht ideal rotierende Walzen übertragen daher, ähnlich wie Druckzylinder, ebenfalls Informationen auf die Bahn. Diese sind aber je nach Bahndehnung vom Ort der Übertragung bis hin zur Beobachtung minimal in der Frequenz verschoben.

¹¹¹Es wäre ein deutlich längeres Analysefenster nötig, was im Gegenzug zu einer deutlichen Verschlechterung in der Zeitauflösung führen würde.

¹¹²ansteigende Druckzylinderdurchmesser entlang der Druckmaschine

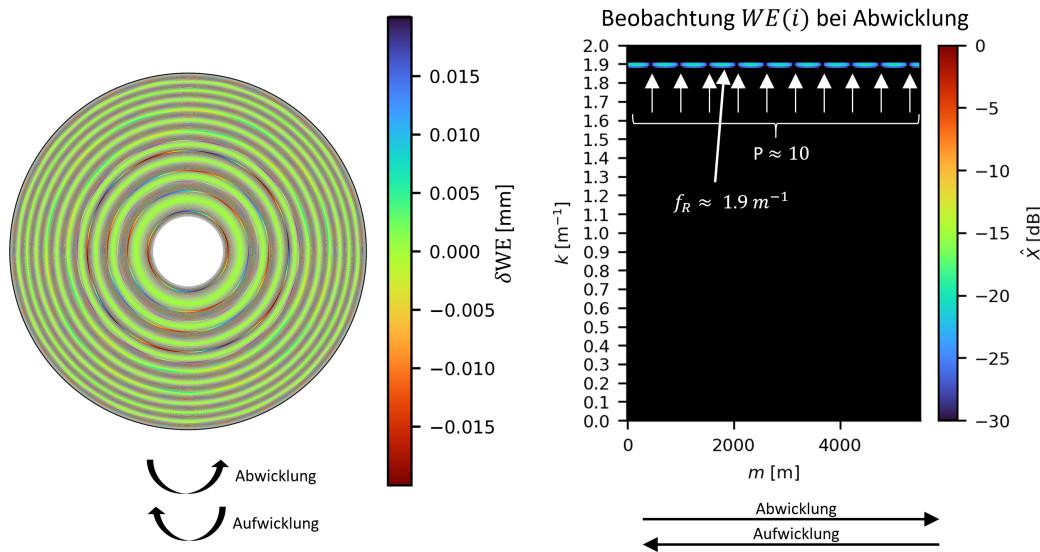


Abbildung 7.16 Die Überlagerung zweier identischer Drehfrequenzen auf eine unterschiedlich stark gedehnte Bahn ($\Delta\epsilon = 0,1\%$) erzeugt sehr kleine Frequenzabweichungen zwischen beiden Störfrequenzen, die sich als Schwebungseffekt im Spektrogramm zeigen (rechts); bei Wiederaufwicklung einer so gestörten Bahn entsteht ein konzentrisches Ringmuster auf der Rollenstirnseite (links)

Auf der wieder aufgewickelten Rolle (links) ist der Schwebungseffekt nicht direkt identifizierbar. Scheinbar überlappen sich die beiden Ringmuster und bilden zusammen ein Gesamtmuster aus, bei dem unterschiedlich breite Ringstrukturen auftreten.

Im Spektrogramm zeigt sich für die beiden überlagerten Störfrequenzen eine gestrichelte Linie, die eindeutig auf nahegelegene Frequenzen hindeutet. Die aufgeprägten Informationen sind durch eine Bahndehnung von $\Delta\epsilon = 0,1\%$ fast identisch in der Frequenz. Durch die begrenzte Frequenzauflösung im Spektrogramm können diese minimalen Unterschiede nicht über die Frequenzachse aufgelöst werden und erzeugen deshalb ein Schwebungsmuster in Form einer gestrichelten Linie (siehe 3.40). Bei bekannten Walzendurchmessern kann über die Periodenlänge dieses Schwebungsmusters die Frequenzdifferenz und schließlich die Bahndehnung zwischen den beiden Walzen wie folgt hergeleitet werden.

Zunächst kann aus dem Spektrogramm die Frequenz der Überlagerungsschwingung $f_R \approx 1,9/m$ abgelesen werden. Die Länge der Schwingungsperiode $P_{Schwebung}$ lässt sich über die Anzahl der Knotenpunkte $P \approx 10$ über die gesamte Bahnlänge der Rolle ermitteln.

$$P_{Schwebung} \approx \frac{5500 \text{ m}}{10} = 550 \text{ m} \quad (7.2)$$

Die Schwebungsfrequenz $f_{Schwebung}$ ergibt sich dann aus

$$f_{Schwebung} = \frac{1}{550 \text{ m}} = 0,0018/\text{m} \quad (7.3)$$

Die gesuchte Bahndehnung $\Delta\epsilon$ ergibt sich dann aus dem Verhältnis der beiden Frequenzen.¹¹³

$$\Delta\epsilon = \frac{0,0018/\text{m}}{1,9/\text{m}} = 0,00095 \approx 0,1 \% \quad (7.4)$$

Umgekehrt wäre bei einer bekannten Bahndehnung zwischen zwei bekannten Walzendurchmessern das relative Abnutzungsverhalten dieser Walzen direkt aus einer Bahnlaufstörung ablesbar. Dies wäre im Kontext prädiktiver Instandhaltung, z.B. bei Presseuren in Tiefdruckmaschinen potentiell interessant.

Merke: Eine gestörten Bahn oder ein gestörter Wickel lässt sich sowohl durch eine optische Betrachtung der Rollenstirnseite, als auch durch eine Visualisierung inline erhobener Bahndaten in einem Orts-Frequenz Spektrogramm systematisch analysieren. In beiden Repräsentationsformen zeigen sich die Informationen zu den Grundursachen der Störungen als spezifische Merkmale. Die direkte Gegenüberstellung zwischen Wickelmodell und Spektrogramm schafft eine Verbindung zum Stand der Forschung, in dem zu vielen bekannten Bahn- und Wickeldefekten in der Regel nur durch exemplarische Fotos und relativ grob beschrieben, die visuellen Merkmale im Rollenwickel dokumentiert sind. Durch das hier verwendete Wickelmodell können einige der Effekte sehr gut rekonstruiert und dadurch besser untersucht werden. In der Regel sind die Informationen im Spektrogramm jedoch deutlich einfacher auszuwerten, als durch die visuelle Betrachtung der Rollenstirnseite. Insbesondere dann, wenn sich mehrere und verschieden stark ausgeprägte und nicht konstante Störfrequenzen überlagern, womit in der Realität stets zu rechnen ist. Aus diesem Grund wird nachfolgend ausschließlich das Spektrogramm zur Analyse realer Bahn- und Maschinendaten genutzt.

¹¹³Die Ungenauigkeit resultiert in diesem Beispiel aus der relativ groben ganzzahligen Zählung der Knotenpunkte der Schwebung im Spektrogramm.

8 Reale Informationsbeispiele

In diesem Kapitel werden die realen Messdaten der Fallstudie auf Grundlage des eigenen Ansatzes (siehe Kapitel 5) und mit Hilfe der zuvor entwickelten Methoden (siehe Kapitel 6), sowie auf Basis der in der Literatur beschriebenen Phänomene (siehe Kapitel 4), systematisch untersucht.

Für einige Schwankungseffekte im Bahnlauf und im Register lassen sich aufgrund ihres jeweiligen Übertragungsverhaltens in der Druckmaschine, in Kombination mit ihrer ebenso spezifischen Orts-Frequenzsignatur, kausale Wirkzusammenhänge zwischen der messbaren Auswirkung im Druckprozess zu konkreten Verursachungsmechanismen in verschiedenen Teilprozessen entlang der gesamten Prozesskette herleiten.

Auf Grundlage der Arbeitshypothesen (siehe Kapitel 6.3.2.1) und mit Hilfe des Filterns von Informationen in den Spektrogrammen (siehe Kapitel 6.3.2) können die Signale bzgl. unterschiedlicher Grundursachen (Bahnkantenstörung, Materialstörung, Bahnlaufstörung) differenziert werden. Dieser Prozess schränkt die potentiellen Ursachen bzgl. ganz bestimmter Teilprozesse ein. Die individuelle Orts-Frequenzsignatur liefert darüber hinaus wichtige Hinweise zur Identifizierung der jeweils zugrundeliegenden Prozessstörung bzw. dem konkreten Verursachungsmechanismus. Die Beobachtungen aus den modellierten Informationsbeispielen (siehe Kapitel 7) dienen als Orientierungshilfe.

Zur besseren Fokussierung werden in den Unterkapiteln bevorzugt die gefilterten Spektrogramme dargestellt, sodass die dargestellte Informationsmenge bereits (bzgl. des relevanten Übertragungskanals) erheblich reduziert ist. Trotz der Informationsfilterung treten in einigen Rollen mehrere unterschiedliche Effekte gleichzeitig auf. Entsprechende Markierungen und Erläuterungen erklären welcher Effekt gerade im Fokus steht.

Aufgrund der Komplexität und Individualität der jeweiligen ursächlichen Prozessstörungen, wird auf eine Auseinandersetzung mit entsprechenden Lösungsstrategien zur Vermeidung der jeweiligen Störungsursachen bewusst verzichtet. Ziel dieses Kapitels ist es exemplarische aber dafür kausale Zuordnungen für charakteristische Prozessschwankungen im Bahnlauf bzw. im Register innerhalb des Druckprozesses zu den jeweiligen Grundursachen im Gesamtprozess zu liefern.

Einige der diskutierten Bahnlaufstörungen zeigen sich in einer ähnlichen aber nicht immer gleichen Charakteristik auch als Passerschwankungen. Für jede der drei grundlegenden Störungsarten in der Bahn (Bahnkantenstörung, materialinduzierte Bahnlaufstörungen, extern induzierte Bahnlaufstörungen) wird jeweils ein konkretes Beispiel erläutert, welches sich auch auf das Register auswirkt. Die drei ausgewählten Beispiele sind in der Fallstudie hinsichtlich ihrer Häufigkeit und der Amplitude die bedeutsamsten Ursachen für Registerschwankungen.

8.1 Bahnkantenstörungen - Validierung Hypothese 1

Die in Kapitel 6.3.2.1 formulierte **Hypothese 1:** besagt:

Reine Bahnkantenstörungen übertragen sich über mehrere Walzen unverändert.

Ihre lineare Verzerrung ist annähernd Null.¹¹⁴

Alle nachfolgenden Informationsbeispiele sind fest in der Bahnkante gespeichert. Sie lassen sich über die vollständig konstant bleibenden Amplituden bzw. verlustfreie Übertragung entlang der Druckmaschine über das gefilterte Spektrogramm \hat{X}_1^e bzgl. des Bahnabschnitts „Abwicklung“ bzw. \hat{X}_2^e für den Bahnabschnitt „Druck“ identifizieren. Jede Störung wird zunächst in seiner Orts-Frequenzsignatur beschrieben. Anschließend werden diese auf Grundlage einer Diskussion kausalen Ursachen innerhalb der Fertigrollenwicklung oder dem Rollentransport zugeordnet. Jedes einzelne Informationsbeispiel dient damit auch zur Validierung der Hypothese 1.

8.1.1 Vibration der Fertigrolle im Maschinenroller

8.1.1.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störung ist über eine Bahnkantenvariation im gefilterten Pegelspektrrogramm \hat{X}_2^e nachweisbar. Sie weist eine Orts-Frequenzsignatur auf, die durch einen oder mehrere konvex ansteigende Frequenzverläufe charakterisiert ist.

Abbildung 8.1 zeigt fünf unkommentierte Beispielrollen mit dieser Information.

¹¹⁴Minimale Ungenauigkeiten durch Bahndehnung und Querkontraktionsverhalten seien hier vernachlässigt.

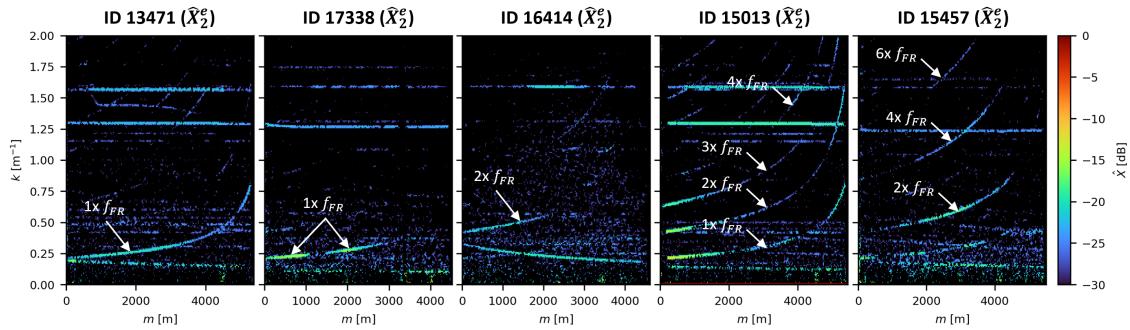


Abbildung 8.1 Fünf Beispielrollen mit Fertigrollendrehfrequenz in der Bahnkante

8.1.1.2 Ursachen Zuordnung

Die Bahnkantenstörung wird einer Vibration der Fertigrolle im Walzenbett des Maschinenrollers zugeordnet, die durch die Rolle selbst verursacht wird. Über den Bahnlauf im Maschinenroller wird die Prozessstörung im Walzenbett bis zurück auf die Schneidpartie übertragen und dort über die Bahnlaufvariationen als entsprechende Variation des Schnittpunktes in die Bahnkante geschnitten.

Siehe auch [104, RD-10, RD-17, RD-29, RD-34, SD-1] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.1.1.3 Kausale Argumentationskette

Zunächst wird eine einzelne Beispielrolle (ID 12839) in Abbildung 8.2 gezeigt. Mit Hilfe der Umrechnung 7.1 (S.157) kann man exemplarisch nachvollziehen, dass die Start-Frequenz f_{voll} und die End-Frequenz f_{leer} genau mit dem tatsächlichen Start-Durchmesser D_{voll} und dem End-Durchmesser D_{leer} der Fertigrolle im Abwickler der Druckmaschine übereinstimmen. Links wird das gefilterte Spektrogramm \hat{X}_2^e gezeigt, das die reinen Kanteninformationen zeigt und rechts den Rollendurchmesser an der Abwicklung RD_{UW} .

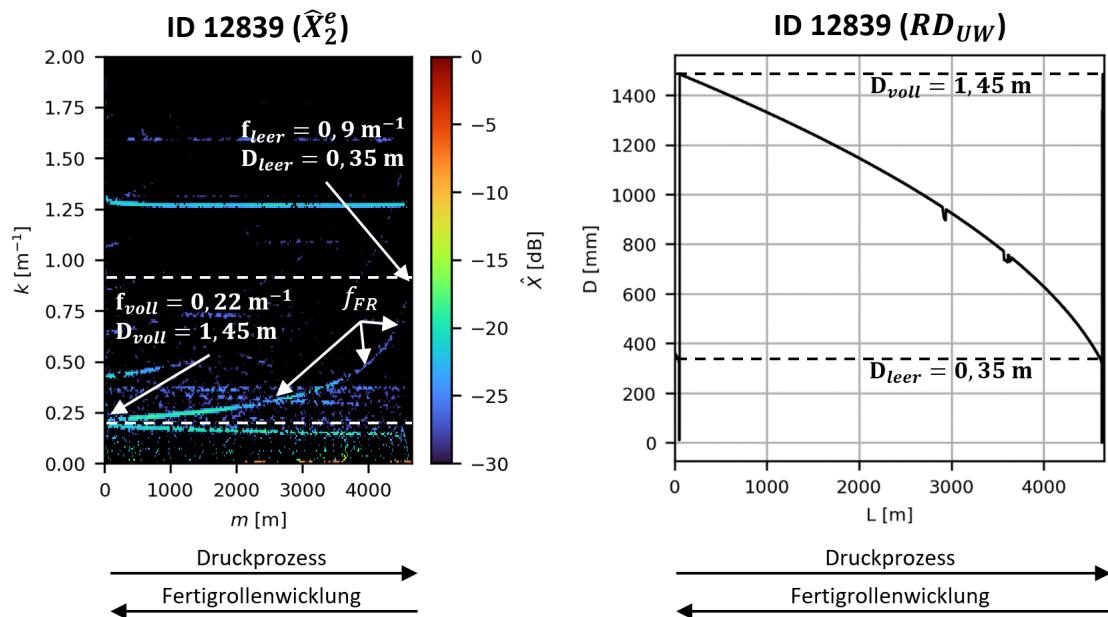


Abbildung 8.2 Vergleich des Frequenzverlaufs der Fertigrollendrehfrequenz (links) mit dem Verlauf des Rollendurchmessers am Abwickler der Druckmaschine (rechts)

Der Rollendurchmesser am Abwickler wird mit Hilfe eines relativ grob auflösenden Abstandssensors RD_{UW} gemessen. Leichte Unrundheiten können damit nicht aufgelöst werden. Der Hülsendurchmesser $D_{Hülse}$ beträgt für diese Fertigrolle $0,33\text{ m}^{115}$. Der Außen-durchmesser der vollen Fertigrolle D_{voll} liegt bei $1,45\text{ m}$. Da immer ein kleiner Rest auf der Rolle verbleibt, ist der letzte gemessene Durchmesser, mit $D_{leer} = 0,35\text{ m}$ etwas größer als die Hülse.

Über diese Beobachtung hinaus, entspricht der Frequenzverlauf f_{FR} (links) des realen Rollenbeispiels exakt den Frequenzmustern der modellierten radialen Störungen in der Fertigrolle (siehe Kapitel 7.1 (S.155)).

Beide Beobachtungen zusammen genommen beweisen exemplarisch, dass die Ursache des Effektes (aufgrund des Orts-Frequenzmusters) direkt von der Fertigrolle selbst ausgehen muss.

⇒ Ursache muss in der Fertigrolle selbst liegen.

Theoretisch verlaufen Drehfrequenzlinien einer Rollenaufwicklung in Wickelprozessrichtung von hohen Frequenzen (leere Hülse) zu niedrigen Frequenzen (volle Rolle). Weil die

¹¹⁵Diese Information stammt aus den Metadaten des Datensatzes, welche originär aus der Papierfabrik stammen.

hier untersuchten Bahnkantenmessungen jedoch in der Druckmaschine durchgeführt wurden, sind Informationen aus der Fertigrollenwicklung bzgl. der Ortsachse gespiegelt. Die Fertigrollendrehfrequenz verläuft dann in Druckprozessrichtung genauso wie die Abwicklungs frequenzen der Fertigrolle in der Druckmaschine, nämlich von niedrigen Frequenzen zu hohen Frequenzen. In Abbildung 8.2 sind die jeweiligen Prozessrichtungen als Pfeile unter den Spektrogrammen dargestellt. Theoretisch können sich also die Informationen aus diesen beiden Wickelprozessen in den Spektrogrammen überdecken.

⇒ **Theoretisch können sich Drehfrequenzmuster aus der Auf- und Abwicklung überlagern.**

Eine Verursachung am Abwickler der Druckmaschine kann aber ausgeschlossen werden, da sich der Effekt ausschließlich auf die Bahnkante auswirkt und dort kein Prozess oder ein Störeinfluss bekannt ist, der nur auf die Bahnkante wirkt.

Abgrenzend dazu wirken sich abwicklungsinduzierte Bahnlaufstörungen, die durch eine radial deformierte oder exzentrisch eingespannte Rolle im Abwickler der Druckmaschine angeregt werden, ausschließlich auf den Bahnlauf aus und nicht auf die Bahnkante (siehe 8.3.1 (S.217)).

⇒ **Eine Verursachung in der Druckmaschine kann ausgeschlossen werden.**

Da die gezeigten Beispiele, genau wie der Großteil aller Rollen aus der Fallstudie, in einem einzigen Prozessschritt (Fertigrollenwicklung) von der Mutterrolle zur Fertigrolle konfektioniert werden, handelt es sich in den aller meisten Fällen konkret um die *Drehfrequenzmuster der Fertigrolle im Walzenbett des Maschinenrollers*.

⇒ **Die Ursache muss im Walzenbett des Maschinenrollers liegen.**

Die verschiedenen Ausprägungen der Orts-Frequenzmuster weisen in ihrer Struktur auf radial deformierte bzw. entsprechend zur Rollenrotation passende Vibrationen der Rolle im Walzenbett hin, die in der Literatur bekannt sind (siehe Kapitel 4.4.2 (S.86)). Die folgenden Beispiele in Abbildung 8.3 zeigen drei Beispielrollen mit unterschiedlichen Ausprägungen des gleichen Effektes.

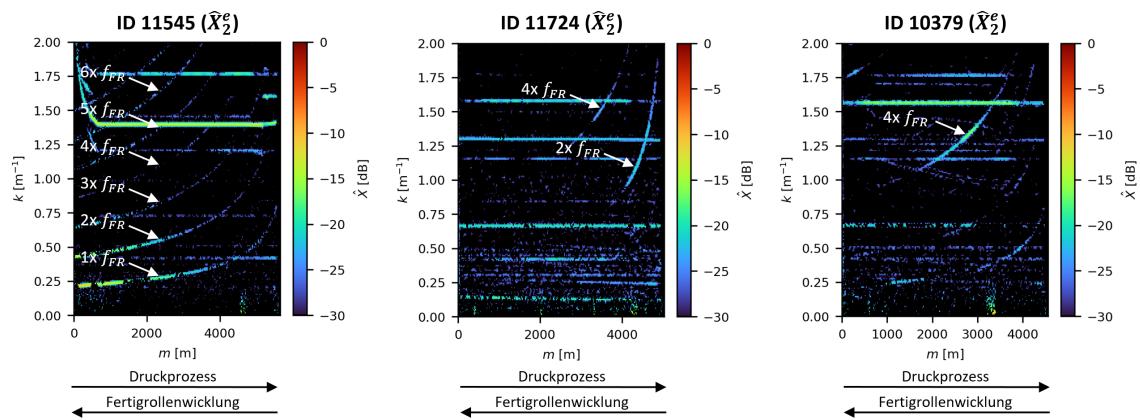


Abbildung 8.3 Fertigrollendrehfrequenzmuster in verschiedenen Ausprägungen

Das Beispiel links zeigt besonders viele Obertöne, was auf eine stark lokale radiale Deformation (Delle) bzw. einen starken Schlag oder Ruck in der Abwicklung einmal pro Umdrehung hindeutet (siehe Abbildung 7.4 (S.160)).

Das Beispiel in der Mitte weist über die komplette Wicklung keinen Grundfrequenzanteil auf. In Wickelprozessrichtung (von rechts nach links) zeigt sich zunächst ausschließlich der 2. Oberton, was einem ovalen Wickel entspricht. Danach wechselt es direkt zum 4. Oberton, was einer vierfachen Deformation bzw. Ablenkung der Rolle pro Umdrehung im Walzenbett entspricht. Eine solche systematische Abfolge von Vibrationsfrequenzen über einen Wicklungszyklus hinweg, ist aus Untersuchungen zu Rollenvibrationen im Walzenbett von Maschinenrollern bekannt.

Das Beispiel rechts zeigt exemplarisch eine relativ häufig auftretende Variante aus der Fallstudie, bei dem der 4. Oberton bzgl. der Amplitude zwischenzeitlich stark ansteigt und dann wieder abnimmt. Dieser Amplitudenpeak ist ein Indikator dafür, dass die Rolle im Laufe des Wicklungsprozess durch eine Resonanzzone gelaufen ist. Auffällig ist außerdem, dass die Resonanz häufig im ersten Drittel der Rollenwicklung auftritt und nicht immer dann, wenn ein Oberton eine bestimmte kritische Frequenz durchläuft. Mutmaßlich hat dies etwas mit der Masse des Wickels zu tun. Das heißt, dass der Wickel offensichtlich nur in einem bestimmten Gewichtsbereich anfällig für diese Vibration ist. Ohne weitere Informationen zum Maschinenroller kann diese Hypothese an dieser Stelle aber nicht weiter aufgelöst werden.

In jedem Falle verrät das spezifische Spektrum der Drehfrequenzmuster, also die Kombination aus Grundfrequenz und Obertöne, etwas über die Charakteristik der Rollenvibration im Walzenbett, die durch eine nicht ideale Rotation der Rolle selbst verursacht wird.

⇒ Die verschiedenen Ausprägungsvarianten der Linienmuster deuten auf **Vibrationen der Fertigrolle im Walzenbett**.

Als exemplarischer Beweis, dass der Bahnkanteneffekt vollständig unabhängig von Bahnlaufvariationen ist und damit ausschließlich in die Bahnkante übertragen wurde, reicht in Abbildung 8.4 ein Blick auf die Bahnspannungsvariationen bei WT_{PU12} bzgl. derselben drei Rollen wie in Abbildung 8.3. Die Messwalze WT_{PU12} liegt in unmittelbarer Nähe zum zweiten Bahnkantensor WE_{PU11} , welcher zur Berechnung der \hat{X}_2^e Spektrogramme genutzt wurde. Die charakteristischen Frequenzverläufe zeigen sich eindeutig nicht im Bahnlauf. Auf die vielen anderen Frequenzmuster wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

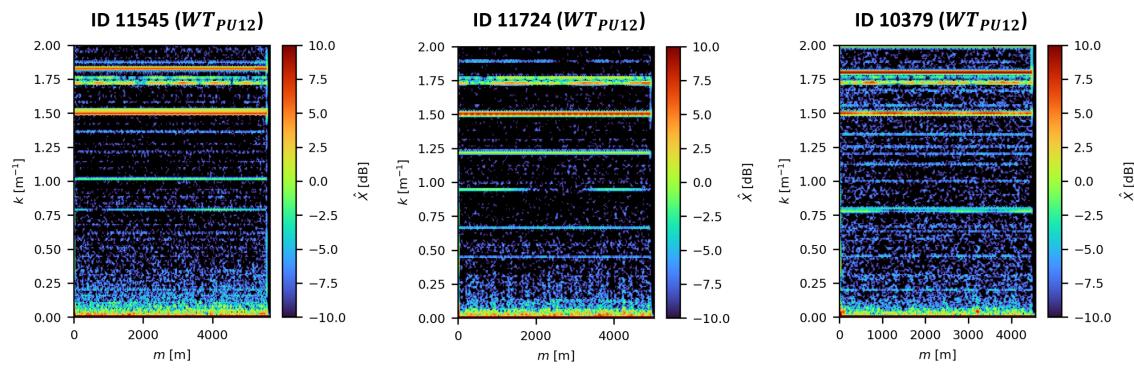


Abbildung 8.4 Fertigrollendrehfrequenz mit verschiedenen Ausprägungen

⇒ Der Effekt ist unabhängig zu **Bahntransportstörungen**.

Die **Vibrationen der Rolle im Walzenbett** können sich offensichtlich stark genug auf den Bahnlauf bzw. auf die Bahnspannung im gesamten Rollenschneider auswirken, sodass sie bis zurück auf die Schneidpartie wirken. Nur der Schneidprozess ist in der Lage die Prozessschwankung als Signal in den Übertragungskanal Bahnkante zu übertragen. Genau diese Beobachtung wurde durch die praktischen Versuche in Kapitel A.3 an einem exemplarischen Klinikroller nachgewiesen. Wobei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen wird, dass der Klinikroller vom Aufbau und in der Funktionsweise stark vergleichbar zu einem typischen Maschinenroller ist, der zur Fertigrollenwicklung genutzt wird. Er ist nur kleiner.

⇒ **Rollenvibrationen im Walzenbett können sich tatsächlich grundsätzlich bis zurück auf die Schneidpartie auswirken.**

Falls es beim Papierhersteller zu einer zusätzlichen Umrollung auf einem Klinikroller kommt, werden die Informationen aus dem vorherigen Wicklungsprozess (z.B. Fertigrollenwicklung auf einem Maschinenroller) aus der Bahnkante gelöscht, da im Klinikroller

die Bahnkante in der Regel neu beschnitten wird. Es verbleiben dann nur die neuen Informationen aus dem Umrollprozess des Klinikrollers in der Bahnkante. Ein entsprechendes Beispiel ist in 8.2.1 für eine gesplicete Fertigrolle beschrieben, die offensichtlich auf einem Klinikroller gefertigt wurde.

⇒ Bei zusätzlicher Umrollung auf einem Klinikroller werden durch den erneuten Bahnkantenbeschnitt alle bisherigen Informationen in der Bahnkante gelöscht und es verbleiben nur die Störungen aus dem Wickelprozess des Klinikrollers in der Bahnkante.

8.1.2 Deformierte Mutterrolle

8.1.2.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störung ist über eine Bahnkantenvariation im gefilterten Pegelspekrogramm \hat{X}_2^e nachweisbar. Sie weist eine Orts-Frequenzsignatur auf, die durch einen oder mehrere konkav abfallende Frequenzverläufe charakterisiert ist.

Abbildung 8.1 zeigt fünf unkommentierte Beispielrollen mit dieser Information.

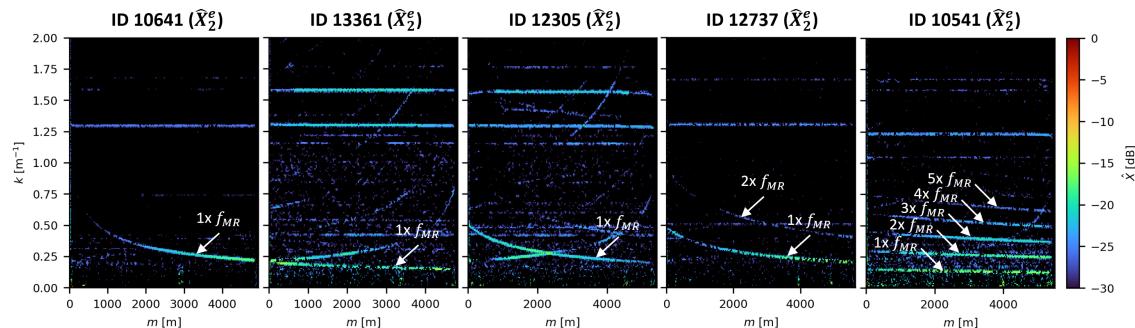


Abbildung 8.5 Fünf Beispielrollen mit Mutterrollendrehfrequenz in der Bahnkante

8.1.2.2 Ursachen Zuordnung

Die Bahnkantenstörung wird einer nicht ideal rotierenden Mutterrolle in der Abwicklung des Maschinenrollers zugeordnet, die durch eine radiale Deformation in der Zwischenlagerung der Mutterrolle nach der Popewicklung bis zur Fertigrollenwicklung verursacht wird. Über die so verursachten periodischen Bahnspannungsvariationen im Bahnlauf des Maschinenrollers werden die Bahnlaufstörungen nach der Abwicklung der Mutterrolle bis auf die Schneidpartie übertragen und dort als entsprechende Variation des Schnittpunktes in die Bahnkante.

Siehe auch [104, RD-10 (bzgl. Mutterrolle), RD-17 (bzgl. Mutterrolle), RD-49, WD-38, WHD-8 (bzgl. Bahnlauf Maschinenroller), SD-1] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.1.2.3 Kausale Argumentationskette

Die Signaturen f_{MR} im \hat{X}_2^e Spektrogramm stimmen exakt mit der umgekehrten Mutterrollendrehfrequenz in der Abwicklung des Maschinenrollers überein. Als Nachweise werden in Abbildung 8.6 sechs exemplarische Rollen aus derselben Liefercharge gezeigt, die in einer bestimmten Sortierung einen kontinuierlichen Frequenzverlauf ausbilden, der exakt zum Drehfrequenzverlauf einer einzigen Mutterrolle passt.¹¹⁶

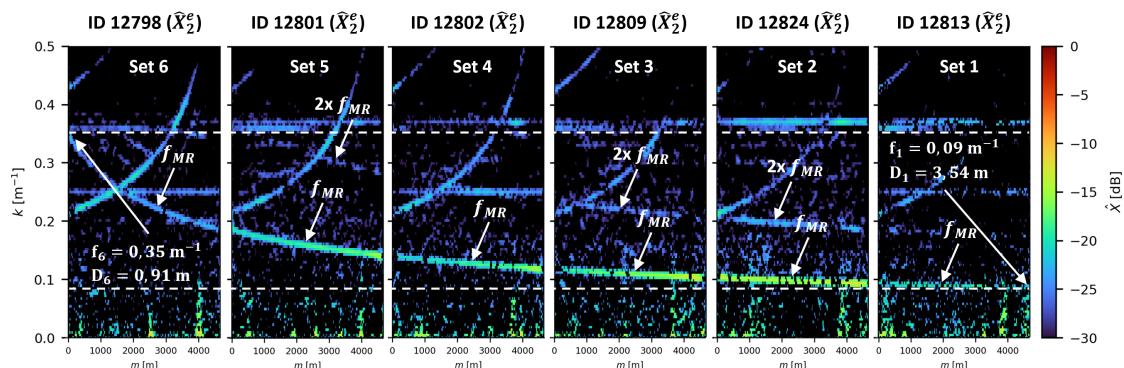


Abbildung 8.6 Die Mutterrollendrehfrequenz f_{MR} erstreckt sich bei einer entsprechenden Anordnung der Rollen über die einzelnen Rollensets als ein kontinuierlicher abfallender Frequenzverlauf

Aufgrund fehlender Metainformationen kann leider nicht festgestellt werden, ob die dargestellten Rollen tatsächlich aus direkt aufeinanderfolgenden Rollensets derselben Mutterrolle stammen. Jedoch weisen die 36 Rollen aus derselben Liefercharge (3) desselben Auftrages (631) allesamt nur diese sechs verschiedenen Varianten des abfallenden Frequenzmusters auf. Diese deterministische Variantenvielfalt ist neben der Tatsache, dass sich das Frequenzmuster bei entsprechender Rollensortierung exakt fortsetzt, ein starker Indikator dafür, dass in diesem Fall je Mutterrolle genau sechs Rollensets gefertigt werden. Die Spektrogramme sind entsprechend durchnummiert. Das mutmaßliche Set 1 ist das jeweils erste produzierte Rollenset und das Set 6 das letzte. Der vom Frequenzmuster abgeleitete maximale Mutterrollendurchmesser beträgt demnach $D_1 = 3,45\text{ m}$ und der minimale Durchmesser $D_6 = 0,91\text{ m}$. Die Durchmesser sind plausibel. Im 2., 3. und 5. Set ist neben der Grundfrequenz zusätzlich auch ein 1. Oberton sichtbar, was auf eine nicht perfekt sinusförmige Störung in der Abwicklung deutet. Da der Oberton nicht über alle

¹¹⁶Da der Verlauf im niedrigen Frequenzbereich liegt, wird an dieser Stelle eine entsprechende Spektrogramm Parametrisierung gewählt ($w = 224\text{ m}$ und eine y-Achsenausschnitt von $0/\text{m}$ bis $0,5/\text{m}$).

Rollen hinweg gleichmäßig verläuft, stammen die Rollen wahrscheinlich von verschiedenen CD-Positionen oder sogar von einer ganz anderen Mutterrolle, die offensichtlich etwas anders deformiert ist.

⇒ Das Orts-Frequenzmuster stimmt mit der Mutterrollendrehfrequenz überein.

Die periodischen Bahnspannungsschwankungen aus der Mutterrollenabwicklung im Maschinenroller werden zwar in die Bahnkante geschnitten, aber offensichtlich nicht dauerhaft als Bahnspannungsvariation in die Fertigrolle mit eingewickelt und so in den Folgeprozess übergeben. Als Nachweis für diese Aussage genügt ein Blick auf die Bahnspannungsschwankungen am Abwickler der Druckmaschine WT_{UW} in Abbildung 8.7. Es sind dieselben sechs Rollen wie in Abbildung 8.6. Es ist kein entsprechendes Muster der Mutterrollendrehfrequenz zu beobachten. Auf die anderen hier sichtbaren Effekte soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

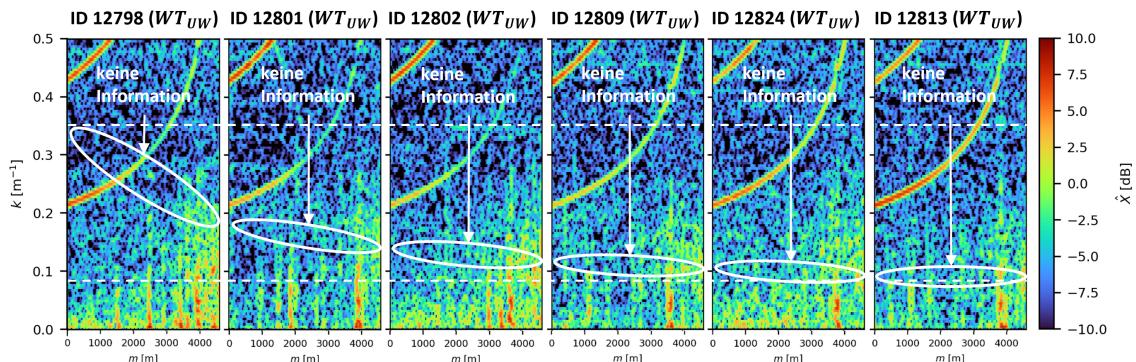


Abbildung 8.7 Kein Nachweis über Mutterrollendrehfrequenz in der Bahnspannung im Bahnabschnitt „Abwicklung“ bei WT_{UW}

Unabhängig von dieser Beobachtung kann es zu dem Phänomen kommen, dass etwas später die seitliche Bahnlaufregelung aufgrund der nicht idealen Bahnkante eine in der Frequenz identische seitliche Bahnbewegung induziert, um die Bahn „gerade“ in den Bahnabschnitt „Druck“ einlaufen zu lassen. Dieser Effekt wird in 8.4.1.1 näher beschrieben.

⇒ Die Bahnkantenstörung hat nicht zwangsläufig eine Auswirkung auf den Bahnlauf in der Druckmaschine.

Eine wahrscheinliche Grundursache, die zu dem beschriebenen Effekt führt, ist eine radiale Deformation des Mutterrollenwickels, die auf das hohe Eigengewicht des Wickels während der temporären Lagerung nach der Popewicklung bis zur Fertigrollenwicklung

zurückzuführen ist. Der Effekt ist in der Literatur bekannt und wird beispielsweise in [78] beschrieben (siehe Kapitel 4.4.3 (S.89)).

Die Charakteristik des Obertonspektrums (Anzahl und Kombination) der Mutterrollendrehfrequenz f_{MR} , korrespondiert mit der Art der Abwicklungsstörung. Eine große Anzahl an Obertönen, die von der Grundfrequenz ausgehen, weisen auf eine impulsartige Abwicklungsstörung, welche im Falle einer radialen Wickeldeformation wiederum auf eine starke lokale Deformation hindeutet. Eine entsprechende Verformung entsteht typischerweise durch eine Zwischenlagerung auf dem Wickelumfang. In der Fallstudie tritt dieser Effekt verhältnismäßig selten auf. Ein weiteres Indiz für eine Umfangslagerung ist, dass insbesondere solche Fertigrollen ein Mutterrollenspektrum mit vielen Obertönen aufweisen, bei denen die Mutterrollenfrequenzlinien sehr flach verlaufen. Das bedeutet, dass diese Rollen von den Außenlage der Mutterrolle stammen. Eine von außen aufgeprägte Wickeldeformation sollte an den äußersten Lagen der Mutterrolle am stärksten zu beobachten sein. Abbildung 8.8 zeigt drei exemplarische Fertigrollen, bei denen diese Beschreibung zutrifft.

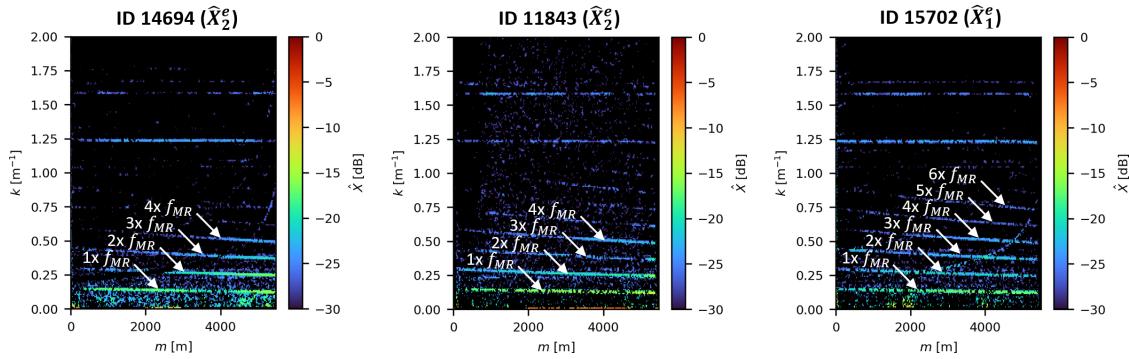


Abbildung 8.8 Obertonspektrum der Mutterrollendrehfrequenz, die zu einer Umfangslagerung der Mutterrolle passen

Deutlich mehr Rollen weisen eine Ausprägungsform auf, bei der nur die Grundfrequenz der Mutterrolle sichtbar ist. Diese Ausprägungsform deutet daraufhin, dass der Wickel nicht genau zentrisch zur Drehachse abgerollt wird und dementsprechend periodische Bahnspannungsschwankungen erzeugt. Diese Wickelexzentrität wird laut [78] häufig durch eine zentrierte axiale Lagerung der Mutterrolle auf der Stahlachse verursacht. Eine axial gewinkelte Einspannung der Mutterrolle im Abwickler des Maschinenrollers ist, anders als bei der Fertigrolleneinspannung in der Druckmaschine (siehe Effekt 8.3.1), eher unwahrscheinlich. Die Drehachse ist über die Tambour-Zapfen, an der das Drehmoment formschlüssig eingeleitet wird, exakt definiert. Der Effekt ist sowohl für Fertigrollen von Außenlagen der Mutterrolle zu beobachten, als auch für Rollen aus inneren Lagen. Diese

Beobachtung kann dadurch begründet werden, dass bei der axialen Lagerung die Gewichtskraft als Linienkraft vom Kern der Mutterrolle auf den gesamten Wickel wirkt. Bei der Umfangslagerung wirkt die Gewichtskraft dagegen als Linienkraft von der Außenlage auf den Wickel. Abbildung 8.9 zeigt drei Beispielrollen aus unterschiedlichen Lagen.

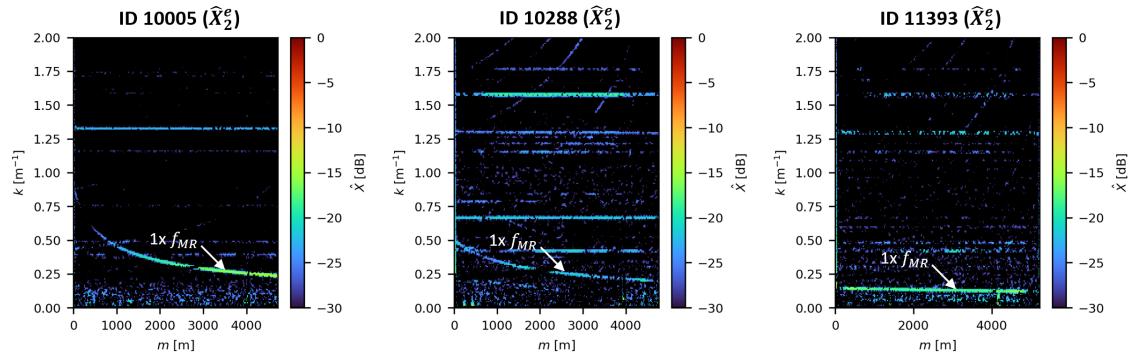


Abbildung 8.9 Obertonspektrum der Mutterrollendrehfrequenz, die zu einer axialen Lagerung der Mutterrolle passen

⇒ Das Obertonspektrum weist potentiell auf die Art der Mutterrolenlagerung hin.

8.1.3 Nicht ideal rotierende Tragwalze im Maschinenroller (V-Muster)

8.1.3.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Prozessstörung ist über eine Bahnkantenstörung in den gefilterten Pegelspekrogrammen \hat{X}_1^e bzw. \hat{X}_2^e nachweisbar. Die Störung weist typischerweise eine Orts-Frequenzsignatur auf, die durch einen oder mehrere V-förmige Frequenzverläufe charakterisiert ist. Sie laufen in zueinander festen Abständen von relativ niedrigen Frequenzen, meist unterhalb der Rollengrundfrequenz f_{FR} , gegen die Nullfrequenz und werden danach wieder hochfrequenter. Der linke Schenkel jedes V-Musters ist in der Frequenz stets abfallend und konkav. Jeder rechte Schenkel ist in der Frequenz stets ansteigend und konvex.

Abbildung 8.10 und 8.11 zeigt zunächst unkommentiert jeweils fünf Beispielrollen der Papierhersteller 4 und 6 mit dieser Information.

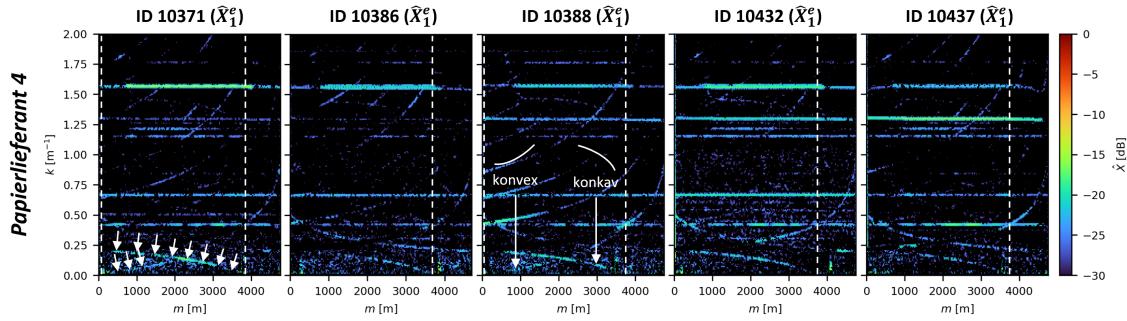


Abbildung 8.10 Fünf Beispielrollen von Papierlieferant 4 mit einem charakteristischen V-Muster in der Bahnkante

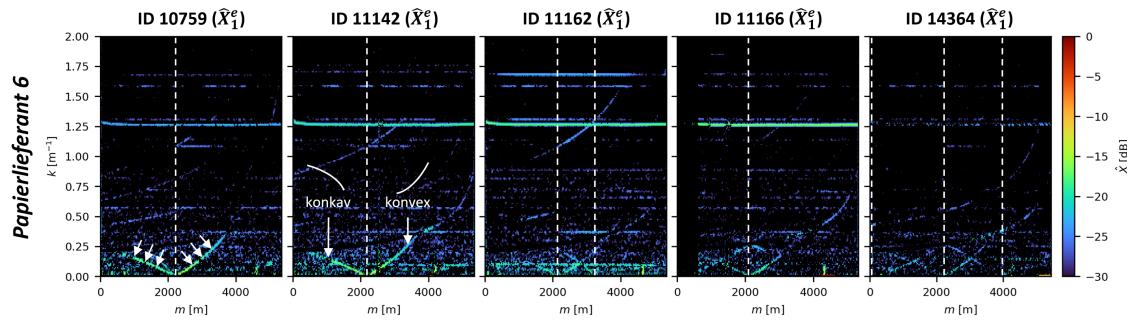


Abbildung 8.11 Fünf Beispielrollen von Papierlieferant 6 mit einem charakteristischen V-Muster in der Bahnkante

8.1.3.2 Ursachen Zuordnung

Die Ursache der Störung wird auf eine Vermischung der Fertigrollenvibration im Walzenbett (siehe 8.1.1) mit einer nicht ideal rotierenden Tragwalze zurückgeführt. Die beiden Schwingungen im Walzenbett addieren sich an ihrer Kontaktstelle. Die zentralen Schwingungsübertragungselemente sind die Papierlagen des Wickels und ggf. die über den Wickel und die hintere Tragwalze gespannte Bahn. Die Bahn und der Wickel sind beides nicht-lineare Schwingungsübertragungselemente. Die addierten Schwingungskräfte am Übertragungselement verzerren sich dadurch nichtlinear. Durch diesen Mechanismus kommt es zur Bildung von Intermodulationsprodukten in der resultierenden Rollenvibration. Diese verzerrte Rollenvibration im Walzenbett wirkt sich analog zu 8.1.1 bis zurück auf die Schneidpartie aus und wird dort als entsprechende Information in die Bahnkante übertragen. Der Effekt kann als Spezialfall bzw. Erweiterung des Effektes 8.1.1 gesehen werden.

Siehe auch [104, RD-34, RD-53, SD-1] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.1.3.3 Kausale Argumentationskette

In den Abbildungen 8.10 und 8.11 kann beobachtet werden, dass sich die grundlegende Ausprägung des V-Musters zwischen den beiden Papierlieferanten deutlich unterscheidet. Die gestrichelte Linie zeigt an, wann das V-Muster gegen die Frequenz Null läuft. Bei Rollen des Papierherstellers 4 läuft das V-Muster häufig bei etwa 3700 m gegen Null und bei Papierhersteller 6, häufig bei etwa 2100 m. Die V-Muster unterscheiden sich in der Charakteristik also je nach Papierhersteller deutlich. Bei den anderen Papierherstellern kann das Muster gar nicht beobachtet werden.¹¹⁷ Insgesamt scheint diese Beobachtung (bzgl. der unterschiedlichen Charakteristik der Muster zwischen den verschiedenen Lieferanten) aber ein plausibler Indikator dafür zu sein, dass der Effekt wohl beim Papierhersteller selbst verursacht wird und nicht in der Druckmaschine oder beim Transport. Eine Verursachung im Transport ist deshalb unwahrscheinlich, weil Transportschäden unabhängig vom Papierhersteller sind und prinzipiell für alle Rollen auftreten können. Außerdem zeigt sich der Effekt ausschließlich als reine Bahnkanteninformation in den \hat{X}_1^e bzw. \hat{X}_2^e Spektrogrammen. Durch diese Tatsache kann eine Ursache in der Druckmaschine grundsätzlich ausgeschlossen werden (siehe 8.1.1). Schlussendlich kann die Ursache auf den Prozess der Fertigrollenwicklung im Maschinenroller eingegrenzt werden.

⇒ **Die Ursache kann auf Maschinenroller eingegrenzt werden.**

Anhand einer exemplarischen Rolle (ID 10371) des Papierlieferanten 4 wird eine potentielle Verursachung des Effektes durch eine Vermischung von der Rollenvibration im Walzenbett mit einer nicht ideal rotierenden Tragwalze überprüft. Die beiden Störsignale werden mit Hilfe des finiten Wickelmodells rekonstruiert und anschließend auf unterschiedliche Weise miteinander verrechnet. Abbildung 8.12 zeigt zunächst von links nach rechts die Bahnkantendaten bzgl. WE_{UW} und WE_{PU2} sowie die daraus gefilterte reine Bahnkantenstörung im \hat{X}_1^e Spektrogramm. Das V-Muster¹¹⁸ ist mit Pfeilen markiert.

¹¹⁷An dieser Stelle sei angemerkt, dass von den anderen Papierlieferanten deutlich weniger Rollen stammen, weshalb diese Beobachtung auch durch einen Mangel an Beispielen begründet sein kann.

¹¹⁸In diesem speziellen Fall sieht man nur den konkaven linken Schenkel.

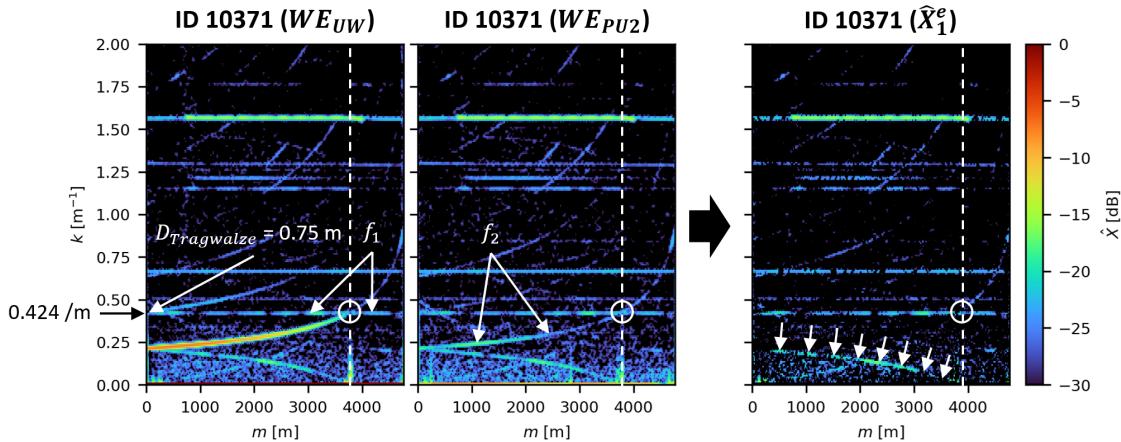


Abbildung 8.12 Beispielrolle ID 10371 von Papierhersteller 4 mit charakteristischem V-Muster in der Bahnkante

Der linke Schenkel des V-Musters läuft genau dort gegen die Nullfrequenz, wo sich die Frequenzlinien f_1 und f_2 kreuzen, die ebenfalls in die Bahnkante geschnitten sind. Die Frequenz f_2 entspricht der Drehfrequenz der Fertigrolle im Walzenbett (siehe f_{FR} in 8.1.1). Die konstante Störfrequenz f_1 entspricht mit 0,424/m exakt der Drehfrequenz der vorderen Tragwalze mit einem Durchmesser von $D_{Tragwalze} = 0,75$ m. Da Daten in der Datenvorverarbeitung ortsspezifisch umgerechnet wurden, sind Drehfrequenzen von nicht ideal rotierenden Walzen in den Spektrogrammen immer konstant, egal welche Beschleunigungsprofile und Bahngeschwindigkeiten in den Einzelprozessen gearbeitet wurden.

Eine plausible Möglichkeit ist, dass sich beide Störungen im Walzenbett vermischen. Es kommt also zu einer gegenseitigen Beeinflussung des Schwingungssignals x_1 mit der Frequenz f_1 für eine nicht ideal rotierende Tragwalze und des Schwingungssignals x_2 mit der Frequenz f_2 für die Fertigrollenvibrationen, die von der Rolle selbst ausgeht. Durch die Vermischung kommt es zu einem völlig neuen Spektrum der Rollenvibration im Walzenbett.

Das wichtigste mechanische Übertragungselement bei dem die beiden Schwingungen in dieser Hypothese aufeinander treffen ist der Wickel selbst. Da die Kraft-Verformungseigenschaften in radialer Richtung eines Wickels nichtlinear sind [53], werden seine Schwingungsübertragungseigenschaften ebenfalls als nichtlinear angenommen. Auch die über den Wickel und die hintere Tragwalze gespannte Bahn wird als nichtlineares Übertragungselement für mechanische Schwingungen angenommen (siehe 3.1.1.2).

Mit Hilfe des finiten Wickelmodells wird eine möglichst einfache Störung aus der Rollenvibration im Walzenbett bzgl. des konkreten Rollenbeispiels ID 10371 über die Bahnänge

$L = 4769$ m, die Materialdicke $T = 0,336$ mm und den Hülsendurchmesser $C = 0,33$ m rekonstruiert. Die Rollenvibration wird über eine exzentrische Störung x_2 mit der Frequenz f_2 der Rolle simuliert. Eine zur Bahn konstant periodische Störung durch eine nicht ideal rotierende Tragwalze, mit einem Durchmesser von $D_{Tragwalze} = 0,75$ mm, ergibt ein Störsignal x_1 mit der konstanten Frequenz f_1 . Dieses Störsignal kann nun auf unterschiedliche Weise mit dem anderen Störsignal verrechnet werden (siehe 3.2.3).

Das Ergebnis einer additiven Überlagerung beider Störsignale x_1 und x_2 ist in Abbildung 8.13 links zu sehen. Beide Ursprungsfrequenzen f_1 und f_2 bleiben vollständig erhalten. Das Ergebnisspektrum der idealen Mischung (Multiplikation) ist rechts zu sehen. Es wird deutlich, dass das vermischtete Signal vollständig verändert ist in der Orts-Frequenz Signatur. Das untere Seitenband (USB) ergibt sich aus der Betragsdifferenz beider Frequenzen. Es weist eine V-förmige Struktur auf, die auf dem linken Schenkel konkav und auf dem rechten Schenkel konvex ist. Die Linie läuft außerdem ebenfalls bei 3700 m durch die Nullfrequenz, genau wie das V-Muster im realen Bahnkantensignal.

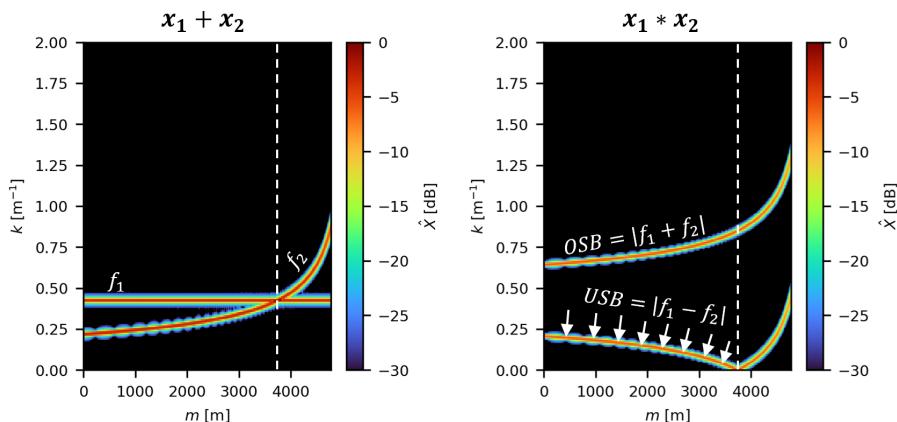


Abbildung 8.13 Ergebnisspektren zweier simulierter Störsignale x_1 und x_2 bei additiver Signalüberlagerung (links) und idealer multiplikativer Signalmischung (rechts)

Bei einer Signaladdition mit anschließender nichtlinearer Verzerrung durch eine nichtlineare, dämpfende Kennlinie $g(x)$ (siehe Abbildung 3.46 (S.71)), wird das nichtlineare Übertragungsverhalten des Wickels bzw. der Papierbahn prinzipiell simuliert. Verschiebt man den Arbeitspunkt der Kennlinie durch den Gleichanteil, ändern sich Anzahl und Intensitäten der einzelnen Intermodulationsprodukte, die sich in diesem Fall als Kurvenschar zeigt. Abbildung 8.14 zeigt die Ergebnisspektren für unterschiedliche Arbeitspunkte in der nichtlinearen Verzerrung. Beispielsweise ist das flach verlaufende V-Muster aus dem Beispiel ID 10371 im ersten Fall, ohne einen Gleichanteil in der Addition beider Schwingungen, gar nicht zu beobachten. Im dritten Beispiel (von links) ist dagegen das V-Muster nicht

zu sehen, welches sich bei den anderen Gleichanteilen bei ca. 2000 m der Nullfrequenz annähert.

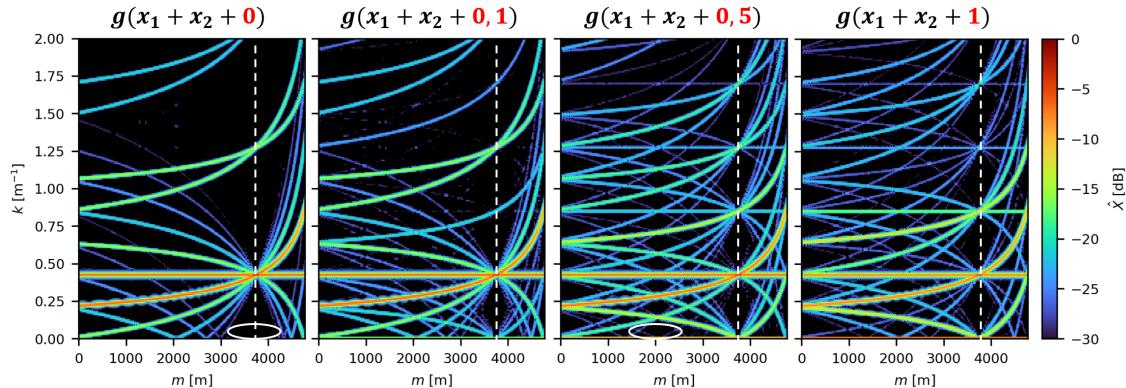


Abbildung 8.14 Ergebnisspektren zweier simulierter Störsignale x_1 und x_2 bei nichtlinearer Verzerrung mit dämpfend nichtlinearer Kennlinie $g(x)$ und verschiedenen Gleichanteilen

Dadurch, dass die Schwingungen von der Fertigrolle und der Tragwalze insbesondere durch die Gewichtskraft der Rolle und der zusätzlichen Anpresskraft der Reiterwalze in Summe tendenziell eher in Gravitationsrichtung wirken, ist ein gewisser Gleichanteil bei der Aufsummierung der Schwingungskräfte plausibel. Mit steigendem Rollengewicht kann sich der Arbeitspunkt der Kennlinie also mutmaßlich auch dynamisch verschieben. Die grundsätzliche Nichtlinearität der Übertragungseigenschaften verändert sich wahrscheinlich ebenfalls dynamisch über den Rollenzyklus, da sich die Wickelhärte über den Wickelaufbau mit jeder neuen Lage leicht verändert. Durch die verschiedenen Beispiele in der Verzerrung wird deutlich, dass die Intermodulationsprodukte von zwei bekannten Eingangsstörungen als eine deterministische Kurvenschar auftritt. Es ist also vorbestimmt an welcher Stelle Intermodulationsprodukte grundsätzlich auftreten können und welche Form sie jeweils annehmen können. Umgekehrt kann man natürlich auch die Eingangsfrequenzen aus den Intermodulationsprodukten ableiten. Welche nichtlinearen Übertragungseigenschaften das System tatsächlich hat, ist an dieser Stelle nicht weiter relevant. Für eine kausale Zuordnung der Auswirkung in der Bahnkante auf die Ursache in der Fertigrollenwicklung genügt folgender Nachweis. Bei einer Addition und anschließender nichtlinearer Verzerrung beider angenommenen Ursprungsfrequenzen treten tatsächlich Intermodulationsprodukte auf, die genau den charakteristischen V-förmigen Mustern entsprechen, die in den realen Bahnkantendaten zu beobachten sind.

Als direkter Nachweis werden einige der simulierten Intermodulationsprodukte f_{IM_O} bis zur 4. Ordnung in Abbildung 8.15 als Schablone auf die modellierten Daten (oben) gelegt und ebenfalls über die realen Bahnkantendaten der Rolle ID 10371 (unten).

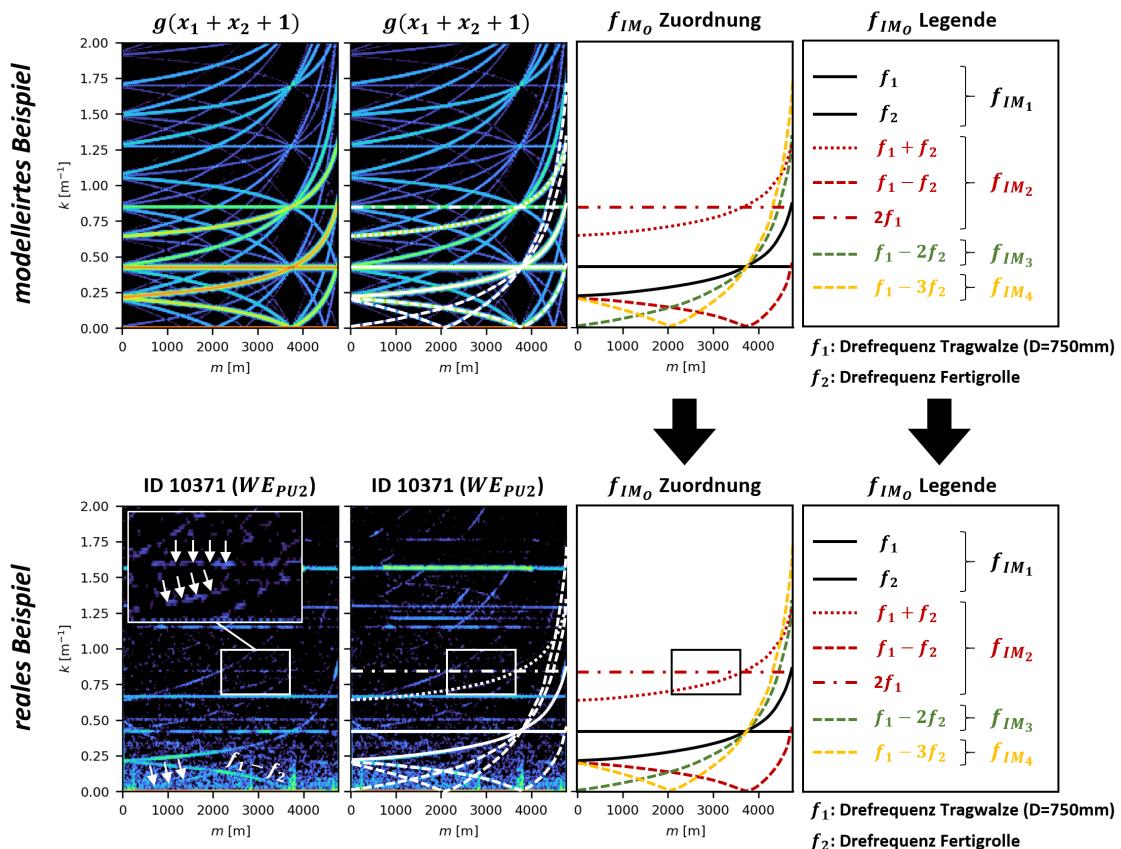


Abbildung 8.15 Abgleich von modellierten Intermodulationsprodukten auf Basis der Eingangsfrequenzen f_1 und f_2 bei nichtlinearer Verzerrung mit dem realen Rollenbeispiel ID 10371

Man erkennt, dass nicht nur das einzelne V-Muster durch die nichtlineare Verzerrung der Rollenvibration mit einer nicht ideal rotierenden Tragwalze erklärt werden kann, sondern auch noch andere Linienstrukturen, die teilweise aber deutlich schwächer ausgeprägt sind.

Die Form der V-Muster, legt Nahe, dass sie in den Rollen von Papierhersteller 6 ebenfalls durch eine Intermodulation der Rollenvibration mit einer oder zwei Tragwalzen verursacht wurden. Über die Form und die Position des V-Musters kann die gesuchte Störquelle also auch hergeleitet werden, obwohl die Störfrequenz unter Umständen im Bahnkantensignal unterdrückt ist. Ein V-Muster aufgrund einer Störung durch eine Reiterwalze müsste durch den typischerweise sehr viel kleineren Durchmesser deutlich spitzer gegen die Nullfrequenz laufen, wodurch die Öffnung des V-Musters deutlich schmäler sein muss. Im Datensatz ist kein Beispiel mit einer entsprechenden Bahnkantenstörung in der Bahnkante zu finden.

⇒ Die Orts-Frequenzsignaturen können als Intermodulationsprodukte einer nichtlinearen Addition von Drehfrequenz der Tragwalze und der Drehfrequenz der Fertigrolle im Walzenbett über das finite Winkelmodell rekonstruiert werden.

Die resultierende Rollenvibration im Walzenbett ist also deutlich komplexer als die einfache in 8.1.1. Sie wirkt sich aber in der gleichen Art und Weise bis zurück auf die Schneidpartie im Maschinenroller aus, wo sie als Störung bzw. Information in die Bahnkante hineingeschnitten wird.

⇒ Auch die modulierten Tragwalzenvibrationen wirken sich bis auf die Schneidpartie zurück aus und schneiden die Störung in die Bahnkante.

8.1.4 Messervibrationen in Fertigrollenwicklung

8.1.4.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störung ist über eine Bahnkantenvariation in den gefilterten Pegelspektrogrammen \hat{X}_1^e bzw. \hat{X}_2^e nachweisbar. Sie weist über den mittleren Teil des Rollenzyklus typischerweise ein in der Frequenz konstantes Linienmuster auf. Sie verändert sich in der Frequenz in der Regel nur zum Anfang und Ende des Rollenzyklus. Sie wird, wenn überhaupt, deutlich höherfrequenter als niedrigerfrequenter. Die Frequenzänderungen treten unabhängig von anderen Bahnkantenstörungen auf. Die Signatur besteht aus zwei voneinander unabhängigen und in der Frequenz häufig leicht versetzten Grundfrequenzen. Die Grundfrequenzlinienmuster treten in der Fallstudie in einem mittleren Frequenzbereich zwischen 1,25/m und 1,75/m auf. Die Störungen sind in den meisten Rollen der Fallstudie die pegelstärksten Informationen in der Bahnkante.

Abbildung 8.16 zeigt fünf unkommentierte Beispielrollen mit dieser Information.

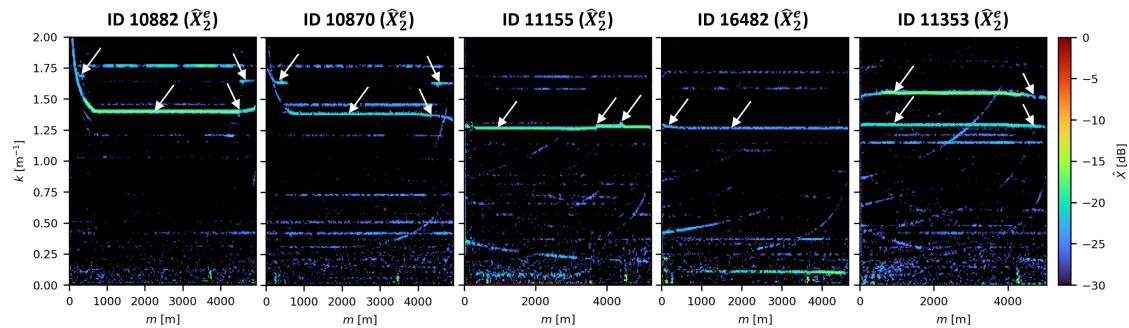


Abbildung 8.16 Beispielrollen mit Störungen durch Messervibrationen in der Bahnkante

8.1.4.2 Ursachen Zuordnung

Die Ursache der Störung wird auf nicht ideal rotierende Ober- und Untermesser der Schneidpartie im Maschinenroller zurückgeführt (Messervibrationen). Die Frequenzen passen unter Berücksichtigung der Durchmesser und Differenzgeschwindigkeit der Rundmesser zur Bahn (Overspeed), exakt zu den Drehfrequenzen der Messer. Die zum Anfang und Ende der Rollenwicklung (in Druckprozessrichtung von rechts nach links) in der Frequenz nicht konstant verlaufenden Linien werden über eine nicht zur Bahn synchronisierte Differenzgeschwindigkeit der Messer in den Beschleunigungs- und Abbremsphasen in der Fertigrollenwicklung zurückgeführt. Sie sind je nach Parametrisierung und den spezifischen Gegebenheiten in der Antriebstechnik der Schneidpartie für jeden Maschinenroller unterschiedlich charakterisiert.

Siehe auch [104, RD-50, SD-12] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.1.4.3 Kausale Argumentationskette

In Abbildung 8.17 werden zwei exemplarische Rollen gezeigt, die aus unterschiedlichen Papierfabriken stammen und daher auch auf verschiedenen Maschinenrollern zu Fertigrollen konfektioniert wurden. Im linken Beispiel (Papierfabrik 6) verläuft die Orts-Frequenzsignatur nicht konstant und im rechten Beispiel (Papierfabrik 4) dagegen konstant.

Die Frequenz einer Messervibration ergibt sich nicht nur aus dem Durchmesser des Rundmessers, sondern auch aus der Differenzgeschwindigkeit der Messerumfangsgeschwindigkeit zur Bahn (Overspeed). Je schneller die Messerrotation relativ zur Bahn, desto höher wird die Störfrequenz, die in die Bahnkante geschnitten wird. Im Scherschneideprinzip eines Tangentialschneiders darf die Umfangsgeschwindigkeit der Messer niemals in die Nähe oder unterhalb der Bahngeschwindigkeit fallen, da es sonst zu BahnrisSEN kommt. Aus

diesem Grund sollten in den realen Beispielen nur solche Linienmuster auftreten, die in der Frequenz ansteigen. Ein Abfall der Frequenz ist, wenn überhaupt, nur in einem sehr geringen Maße möglich. Die Frequenzänderungen müssen außerdem stets unabhängig von anderen Bahnkantenstörungen wie beispielsweise 8.1.3 oder 8.1.2 auftreten.

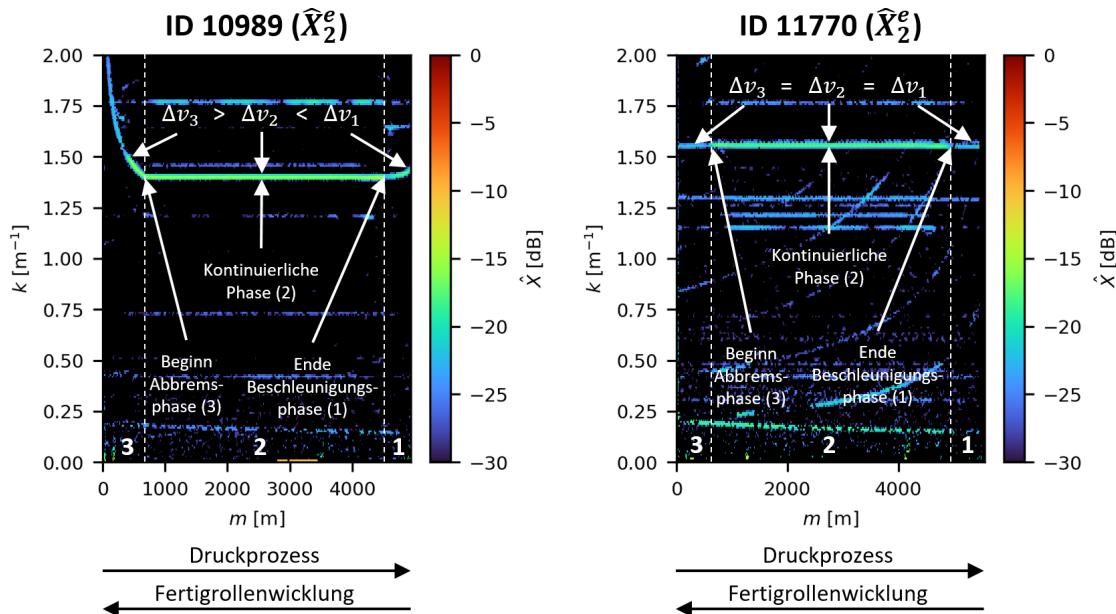


Abbildung 8.17 Rollen zweier unterschiedlicher Papierhersteller mit Bahnkantenstörungen aus Messervibration mit variablem Overspeed (links: Rolle 10989) und konstantem Overspeed (rechts: Rolle 11770)

Die Bahnlaufrichtung der Fertigrollenwicklung und des Druckprozesses verlaufen im Spektrogramm bzgl. der Ortsachse in entgegengesetzter Richtung. Die Orte in der Bahn, an denen sich potentiell die Bahngeschwindigkeiten in der ursprünglichen Fertigrollenwicklung verändert haben, sind mit gestrichelten Linien markiert. Die Geschwindigkeitsphasen sind am unteren Bildrand mit Nummern von rechts nach links durchnummeriert. „1“ steht für die Beschleunigungsphase, „2“ für die Phase in der die Fertigrolle bei konstanter Bahngeschwindigkeit aufgewickelt wird und „3“ für die Phase in denen der Wickelprozess wieder vollständig abgebremst wird, um anschließend das Rollenset aus dem Walzenbett auszustoßen und wieder neue leere Hülsen einzulegen.

Im linken Beispiel steigen die Linien in Phase 1 und Phase 3 in der Frequenz deutlich an, was jeweils für eine Erhöhung der Differenzgeschwindigkeit im Vergleich zu Δv_2 der konstanten Wickelphase 2 spricht. Im rechten Beispiel ist die Differenzgeschwindigkeit über den gesamten Rollenzyklus offensichtlich konstant. Auf diesem Maschinenroller ist die Drehzahl der Messer fest an die Bahngeschwindigkeit gekoppelt. Im rechten Beispiel fällt auf, dass in der konstanten Wickelphase 2 das Liniennuster in der Grundfrequenz deutlich

intensiver ist als in den anderen Phasen. Eine solche Veränderung in der Vibrationscharakteristik kann auch bei vielen Rollen anderer Lieferanten gemacht werden. Aus dieser Beobachtung wird abgeleitet, dass sich die Messervibrationen aufgrund der unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten und ggf. anderen Prozessparametern, wie beispielsweise die Bahnspannung, in den Phasen signifikant unterscheiden können. Genauer wird diese Veränderung in der Vibrationscharakteristik an dieser Stelle nicht weiter untersucht.

Eine Veränderung in der Frequenz der Linienstruktur, unabhängig zu anderen Frequenzmustern ist ein guter Indikator für eine nicht fest zur Bahn synchronisierten Messergeschwindigkeit, die mit der Wickelgeschwindigkeit zusammenhängt. In der Fallstudie konnte in keiner einzigen Rolle ein Fall beobachtet werden, bei dem die Grundfrequenzlinie, relativ zur Frequenz in Phase 2, signifikant abfällt. Diese Beobachtung ist ein Zeichen dafür, dass die Störung wohl von einem nicht ideal rotierenden Messer in der Fertigrollenwicklung ausgeht. Eine Veränderung in der Intensität und dem Obertonspektrum ist außerdem ein Indikator für eine Veränderung der Vibrationscharakteristik was mit verschiedenen Parametern des Schneidprozesses innerhalb des Wickelprozesses zusammenhängen kann.

⇒ Die Zeitpunkte der Frequenzänderungen passen zu den Zeitpunkten von Prozessgeschwindigkeitswechseln in der Fertigrollenwicklung

In der Literatur wird häufig nur von Vibrationen der Untermesser berichtet. In der Fallstudie zeigt sich jedoch, dass Unter- und Obermesser vibrieren und entsprechende Informationen in der Bahnkante hinterlassen. Eine exemplarische Untersuchung einer Rolle (ID 10599) von Papierlieferant 4 (Fabrik 6) zeigt, dass die mutmaßlichen Messervibrationsstörungen tatsächlich mit den Durchmessern der Ober- und Untermesser des Maschinenrollers und den Differenzgeschwindigkeiten der Bahn zusammenpassen. Die rechnerischen Störfrequenzen sind in Tabelle 8.1 aufgeführt. Sie ergeben sich aus einer Multiplikation der geometrischen Drehfrequenzen mit dem Overspeed. Die Signatur des Untermessers sollte demnach bei $k \approx 1,7/m$ und die des Obermessers bei etwa $k \approx 1,4/m$ liegen. Grundsätzlich sind die Frequenzen bei anderen Maschinenrollern in ähnlichen Bereichen zu erwarten, da die Messergeometrie und der Overspeed in einem ähnlichen Wertebereich liegen sollte.

	D [m]	U [m]	λ [m]	k [m⁻¹]	Δv [%]	k [m⁻¹]
Untermesser (LB)	0,240	0,754	0,754	1,326	3%	1,366
Obermesser (TB)	0,200	0,628	0,628	1,592	5%	1,671

Tabelle 8.1 Theoretische Messerfrequenzen des Maschinenrollers von Papierfabrik 4

Abbildung 8.18 zeigt das Obertonspektrum der Messerfrequenzen des Ober- und Untermessers in dem größeren Frequenzbereich bis 5/m, wodurch die beiden Einzelstörungen

noch besser differenziert werden können. Die Grundfrequenz des Untermessers ist in dieser, wie in den allermeisten Rollen der Fallstudie, am stärksten ausgeprägt. Die Signatur des Obermessers ist häufig nicht so stark ausgeprägt. In diesem Beispiel zeigt sich die Vibration hauptsächlich im 1. Oberton (2x TB). Insbesondere in der Phase, in der der Maschinenroller konstant läuft, verschwindet die Grundfrequenz häufig ganz. Die Gründe dafür sind unklar. Offensichtlich vibriert das Messer im konstanten Lauf anders als in der Beschleunigungs- oder Abbremsphase.

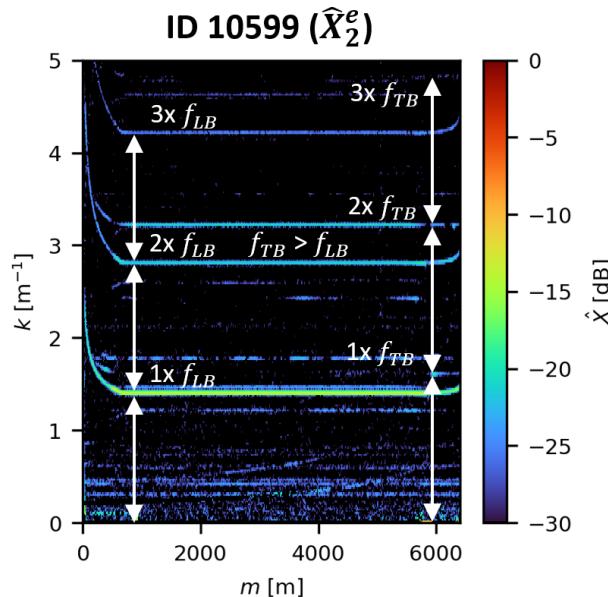


Abbildung 8.18 Beispiel (Rolle 10599) mit Obertönen der Unter- und Obermesser

Grundsätzlich zeigen die Obertöne der Messerfrequenzen an, dass es sich um eine nicht perfekte sinusförmige Schwingung handelt. Potentiell kann dies auf eine ungleichmäßige Abnutzung der Messer hindeuten, die beispielsweise durch eine kleine Fehlstelle an der Klinge verursacht wird, oder auch durch eine gegenseitige Beeinflussung der Messer in Form einer Intermodulation.

⇒ Das Obertonspektrum zeigt die Vibrationscharakteristik und macht Ober- und Untermesser leichter differenzierbar.

8.2 Materialinduzierte Bahnlaufstörungen - Validierung Hypothese 2 a)

Die in Kapitel 6.3.2.1 formulierte **Hypothese 2 a)**: besagt:

Materialspezifische Störungen sind ortsfest zur Bahn und verstärken sich entlang mehrerer Walzen, da sie sich an jedem Bahnführungselement erneut auswirken.¹¹⁹

Alle nachfolgenden Informationsbeispiele sind als ortsfeste Störungen in den Materialeigenschaften gespeichert. Sie lassen sich über die sukzessiv ansteigenden Amplituden bzw. einer verstärkenden linearen Verzerrung im lateralen Bahnlauf entlang der Druckmaschine durch das gefilterte \hat{X}_3^c Spektrogramm im Bahnabschnitt „Druck“ identifizieren. Niederfrequente Schwankungen in den Materialeigenschaften können sich in Form von lateralen Bahnlaufstörungen auswirken und übertragen sich entlang der Druckmaschine viel besser als hochfrequente Störungen. Jede Störung wird zunächst in seiner Orts-Frequenzsignatur beschrieben und anschließend auf Grundlage einer Diskussion, kausalen Ursachen innerhalb der Substratherstellung oder Folgeprozessen zugeordnet, welche nachhaltig die Materialeigenschaften verändern. Jedes einzelne Informationsbeispiel dient damit auch zur Validierung der Hypothese 2 a) und Hypothese 2 c).

8.2.1 Plötzlicher Materialwechsel bei gespliceter Fertigrolle

8.2.1.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störung zeichnet sich durch einen lateralen Bahnlaufimpuls aus, der sich entlang der Druckmaschine sukzessive verstärkt. Die Störung ist dementsprechend über das \hat{X}_3^c Spektrogramm nachweisbar. Durch die Kürze des Effektes zeigt sich der Impuls als kontinuierliches Frequenzspektrum in Form einer vertikalen Linie. Der Amplitudenpeak liegt manchmal im Gleichanteil und manchmal etwas darüber. Zu hohen Frequenzen hin wird der Impuls in jedem Fall stark gedämpft. Der Bahnlaufimpuls tritt nicht irgendwo auf, sondern genau am Übergang zweier konvex abfallender Frequenzverläufe, die fest in die Bahnkante (\hat{X}_2^c) geschnitten sind, analog zu 8.1.2. In der Fallstudie kann bei den meisten Rollen mit diesem Effekt an derselben Stelle auch ein Bahnkantenimpuls festgestellt werden, der in der Regel ein deutlich breiteres Spektrum aufweist.

Abbildung 8.19 zeigt zunächst unkommentiert fünf Beispielrollen mit dieser Information.

¹¹⁹siehe z.B. [118]

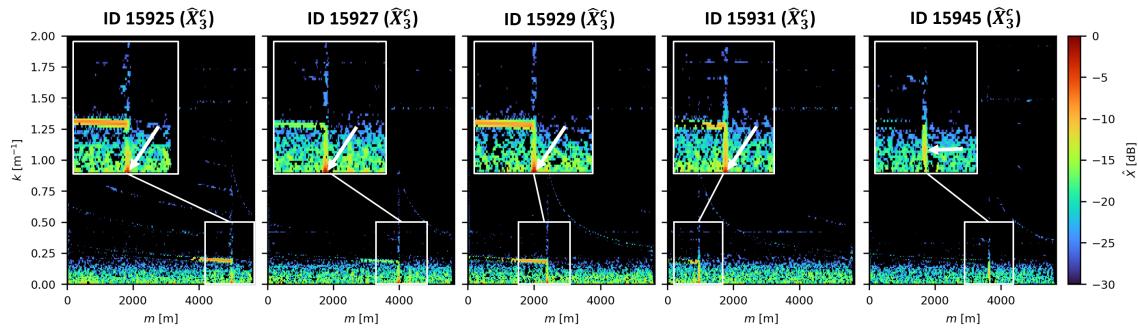


Abbildung 8.19 Fünf Beispielrollen zeigen eine impulsartige Bahnlaufstörung, die durch einen plötzlichen Materialwechsel innerhalb einer Fertigrolle (Splice) verursacht wird und sich als solche entlang der Druckmaschine verstärkt

8.2.1.2 Ursachen Zuordnung

Ein Splice verbindet zwei separate Materialbahnen zu einer durchgängigen Bahn über eine Klebestelle. Typischerweise stammen die Bahnen von unterschiedlichen ursprünglichen Wickeln. Die Abwicklungsdrehfrequenzmuster in der Bahnkante (siehe 8.1.2) geben Informationen zur Geometrie der ursprünglichen Wickel und lassen Rückschlüsse darüber zu, ob die Fertigrolle auf einem Maschinenroller oder einem Klinikroller konfektioniert wurde. Der Übergang beider Abwicklungsdrehfrequenzen markiert den Ort, an dem der Rollenwechsel am Abwickler der Fertigrollenwicklung stattgefunden hat und wo die beiden Bahnen miteinander verbunden wurden. Der signifikante Anstieg der Messerfrequenzen (siehe 8.1.4) deutet auf einen erhöhten Overspeed in den Abbrems- und Beschleunigungsphasen vor und nach dem Rollenwechsel hin und zeigt ebenfalls genau den Ort in der Bahn an, bei dem ein Rollenwechsel in der Fertigrollenwicklung stattgefunden hat. Über den örtlichen Zusammenhang des Bahnlaufimpulses mit den Signaturen in der Bahnkante lässt sich der Impuls im Bahnlauf sicher auf den Wechsel in den Materialeigenschaften am Splice zurückführen.

Jede Bahn besitzt individuelle Materialeigenschaften, die sich entsprechend auf den Bahnlauf auswirken. Ein CD-Profil wirkt sich typischerweise auf den generellen Pfad durch die Maschine aus. Schwankungen in den Materialeigenschaften in MD führen typischerweise zu Schwankungen im seitlichen Bahnlauf, bei ansonsten gleich bleibendem generellen Pfad durch die Maschine. Durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der beiden am Splice miteinander verbundenen Bahnen, kommt es zu einer spezifischen schlagartigen Veränderung im Bahnlaufverhalten. Das spezifische Spektrum des Bahnlaufimpulses hängt also davon ab, ob sich das CD-Profil in den Materialeigenschaften komplett verändert hat und die Bahn nach dem Splice in eine andere Richtung driftet, oder ob es „nur“ zu einem Phasensprung in den Schwankungen der Materialeigenschaften kommt, da zwei

unterschiedliche, aber im CD-Profil dennoch vergleichbare Bahnen, aneinandergeklebt wurden.

Im ersten Fall wirkt sich der Materialwechsel insbesondere auf den Gleichanteil im lateralen Bahnlauf aus. Deshalb liegt der Amplitudenpeak des Bahnlaufimpulses in diesem Fall auch im Gleichanteil.

Im zweiten Fall ändert sich der Gleichanteil im Bahnlauf nicht, da die Bahn nach dem Splice aufgrund eines vergleichbaren CD-Profiles in derselben Position bleibt. Nur die Schwankung im seitlichen Bahnlauf wechselt schlagartig, da die Schwankungen in den Materialeigenschaften der zweiten Materialbahn, mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit, nicht exakt in Phase liegt zu denen der ersten Bahn. Der Amplitudenpeak des Bahnlauf Impulses liegt in diesem Fall daher etwas oberhalb des Gleichanteils.

Der Effekt kann auch als eine definierte Inhomogenität in den Materialeigenschaften gesehen werden (siehe 8.2.2).

Siehe auch [104, WD-38] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.2.1.3 Kausale Argumentationskette

Abbildung 8.20 zeigt anhand einer exemplarischen Rolle (ID 16920), wie man den lateralen Bahnlaufimpuls als Materialstörung durch einen Splice identifizieren kann. Im \hat{X}_3^c Spektrogramm (links) ist die niederfrequente impulsartige Bahnlaufstörung bei 2000 m zu sehen. Im \hat{X}_2^e Spektrogramm (rechts) sind die Hilfsinformationen zu sehen, die fest in die Bahnkante geschnitten sind.

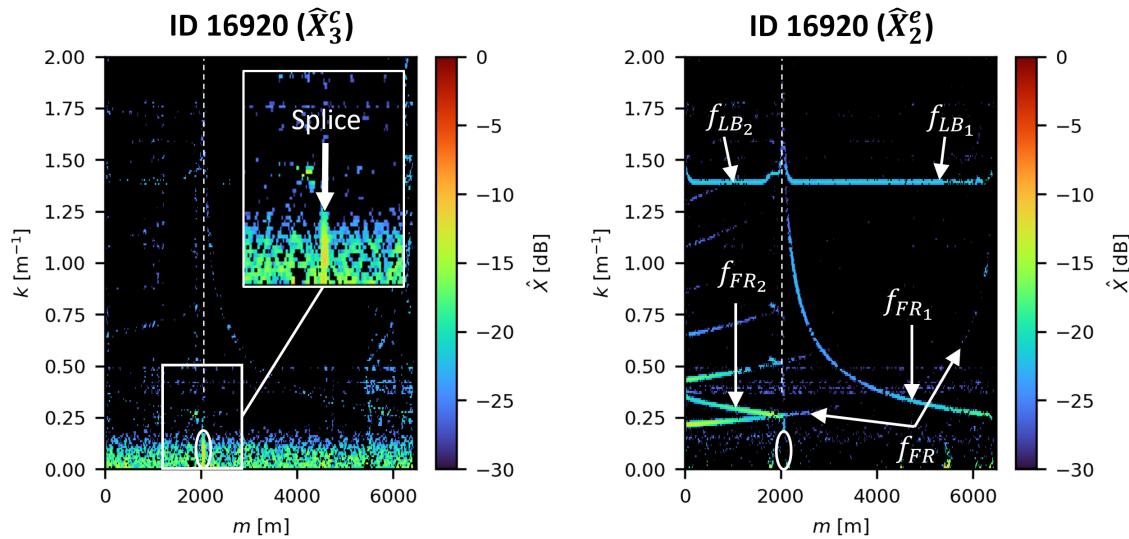


Abbildung 8.20 Splice als impulsartige Bahnlaufstörung (links) und Hilfsinformationen in der Bahnkante (rechts)

Die Frequenzverläufe f_{FR_1} und f_{FR_2} zeigen die Abwicklungsrehfrequenzen der ursprünglichen Rollen im Abwickler der Fertigrollenwicklung (siehe 8.1.2). In diesem Fall wurde die Fertigrolle wohl auf einem Klinikroller verarbeitet, da die Frequenzverläufe zu Durchmessern von Fertigrollen passen aber nicht zu einer Mutterrolle. Die Frequenzverläufe f_{LB_1} und f_{LB_2} zeigen außerdem die Signaturen von vibrierenden Untermessern mit einem signifikanten Frequenzanstieg bei 2000 m (siehe 8.1.4). Aufgrund der Signaturen der Bahnkantenstörungen muss der Splice genau bei 2000 m liegen, obwohl in diesem Fall im \hat{X}_2^e Spektrogramm kein niederfrequenter Impuls zu sehen ist. Er zeigt sich nur im lateralen Bahnlauf.

⇒ Die Informationen aus verschiedenen Übertragungskanälen ergänzen das Bild.

Eine detailliertere Darstellung der Störung wird in Abbildung 8.21 bzgl. der Rolle ID 16920 gezeigt. Die beiden linken Abbildungen zeigen die Bahnkantenmessungen bei WE_{PU2} und WE_{PU11} als Spektrogramm und als Zeitreihe. Die beiden rechten Spektrogramme zeigen die aus diesen Daten gefilterten Informationen bzgl. Materialstörungen (\hat{X}_3^c) und Störungen in der Bahnkante (\hat{X}_2^e).

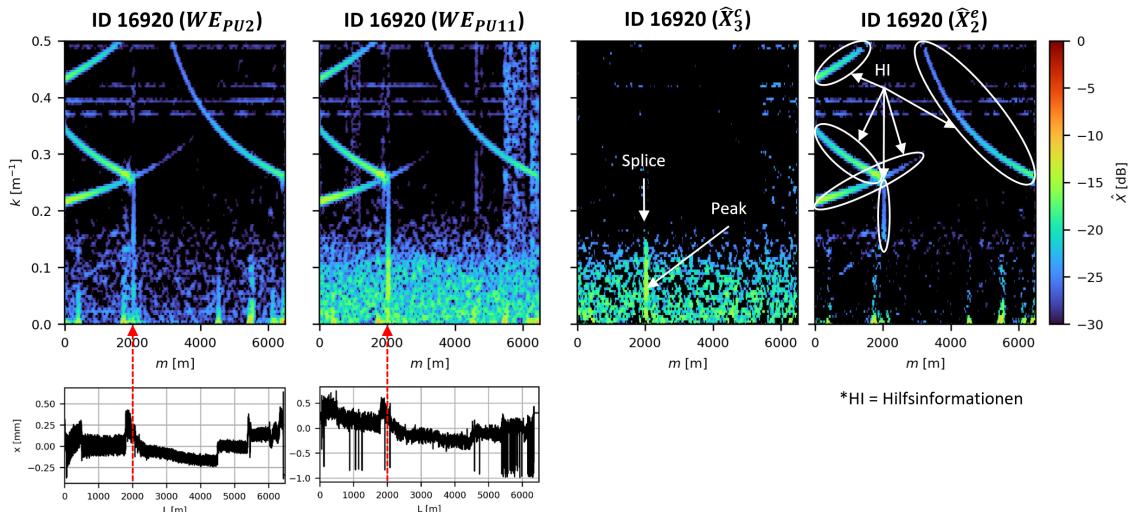


Abbildung 8.21 Durch Kombination verschiedener Informationen aus den beiden Spektrogrammen \hat{X}_3^c und \hat{X}_2^e kann der Impuls als Splice identifiziert werden. Dadurch, dass der Peak nicht im Gleichanteil liegt, kann daraus abgeleitet werden, dass sich das CD-Profil der Materialeigenschaften zwischen den beiden aneinandergeklebten Bahnen nicht besonders unterscheidet. Der Impuls entsteht durch den Phasensprung in den Materialschwankungen.

Die Hilfsinformationen (HI) im gefilterten Spektrogramm \hat{X}_2^e (ganz rechts) zeigen sowohl einen Teil der Abwicklungsdröhfrequenzen der originären Rollen, als auch die durchgängige Drehfrequenz der Fertigrolle selbst (f_{FR}). Außerdem zeigt sich ein hochfrequenter Anteil des Splices (hochfrequentes vertikales Linienmuster) als reine Bahnkantenstörung. Dieser Anteil des Impulses wird einem kleinen Versatz der beiden aneinander geklebten Bahnen zugeordnet oder dem Kleber selbst (RD-20). Das Spektrum des Bahnlaufimpulses im Spektrogramm \hat{X}_3^c (drittes von links), mit dem Amplitudenpeak etwas oberhalb des Gleichanteils, weist auf einen Phasensprung in den Schwankungen der Materialeigenschaften hin. Die Zeitreihen zeigen deutlich, dass die grundsätzliche laterale Bahnposition in etwa gleich bleibt. Das niederfrequente Rauschen vorher und nachher ist in seiner stochastischen Struktur und in der Intensität vergleichbar, was auf ansonsten ähnliche Materialeigenschaftsschwankungen hindeutet. Mutmaßlich stammen die beiden ursprünglichen Rollen von denselben CD-Positionen der Papiermaschine, aber aus unterschiedlichen Rollensets.¹²⁰

⇒ Ein Phasensprung in den Materialschwankungen (bzgl. MD) bei ansonsten gleichbleibenden Materialeigenschaften führt zu einem Impuls mit einem Amplitudenmaximum im niedrigen Frequenzbereich, aber nicht im Gleichanteil.

¹²⁰Der Impuls müsste insbesondere auch im Phasenspektrum sichtbar sein.

Eine genauere Darstellung der Störung wird in Abbildung 8.22 bzgl. der Rolle ID 15927 gezeigt. Die beiden linken Abbildungen zeigen die Bahnkantenmessungen bei WE_{PU2} und WE_{PU11} als Spektrogramm und als Zeitreihe. Die aus diesen Daten gefilterten Informationen bzgl. der Materialstörungen (\hat{X}_3^c) und der Störungen in der Bahnkante (\hat{X}_2^e) zeigen die beiden rechten Spektrogramme.

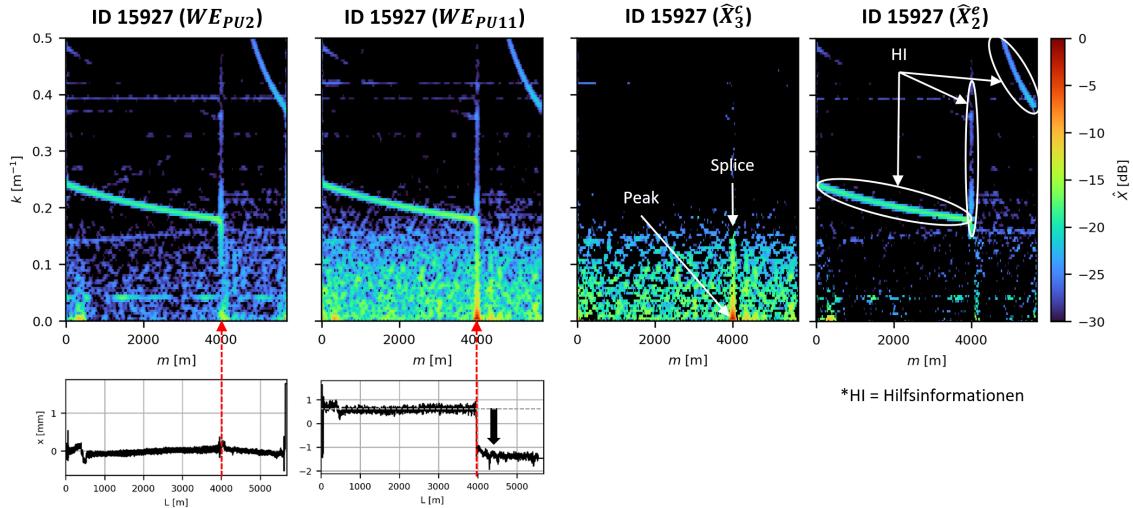


Abbildung 8.22 Durch Kombination verschiedener Informationen aus den beiden Spektrogrammen \hat{X}_3^c und \hat{X}_2^e kann der Impuls als Splice identifiziert werden. Dadurch, dass sich der Peak im Gleichanteil befindet, kann daraus abgeleitet werden, dass sich das CD-Profil der Materialeigenschaften zwischen den beiden aneinandergeklebten Bahnen stark unterscheidet.

Die Hilfsinformationen (HI) im gefilterten Spektrogramm \hat{X}_2^e (ganz rechts) zeigen sowohl einen Teil der Abwicklungsdriftfrequenzen der originären Rollen, als auch einen hochfrequenten Anteil des Splices (hochfrequentes vertikales Linienmuster). Dieser Anteil des Impulses wird einem kleinen Versatz der beiden aneinander geklebten Bahnen zugeordnet oder dem Kleber selbst (RD-20). Das Spektrum des Bahnlaufimpulses im Spektrogramm \hat{X}_3^c (drittes von links), mit dem Amplitudenpeak im Gleichanteil, weist auf einen vollständigen Wechsel im seitlichen Bahnlaufverhalten durch zwei völlig unterschiedliche CD-Profilen hin. Die Zeitreihen zeigen dies sehr deutlich. Das niederfrequente Rauschen vorher und nachher ist in seiner stochastischen Struktur und in der Intensität vergleichbar, was auf ansonsten ähnliche Materialeigenschaftsschwankungen hindeutet. Mutmaßlich stammen die beiden ursprünglichen Rollen von verschiedenen CD-Positionen der Papiermaschine.

Die Beobachtungen stimmen exakt mit dem in der Literatur beschriebenen *weave regeneration* Phänomen überein (siehe Kapitel 4.4.4 (S.92) in [103] im Allgemeinen. In [2] für den Spezialfall des Splices und in [118] für Mehrwalzensysteme).

⇒ Ein vollständiger Wechsel im CD-Profil der Materialeigenschaften führt zu einem Impuls mit einem Amplitudenmaximum im Gleichanteil.

Aufgrund der nichtkonstanten Messerfrequenz in der Rolle ID 16920 (siehe Abbildung 8.20), kann davon ausgegangen werden, dass es sich beim Rollenwechsel in der Klinikroller Abwicklung nicht um einen fliegenden Rollenwechsel bei voller Maschinengeschwindigkeit handelte. Durch einen Geschwindigkeitswechsel kann es im Bahnlauf theoretisch auch zu einem Ruck oder einer Lose¹²¹ in der Bahn kommen. Dieser kann bei einem entsprechenden CD-Profil in den Materialeigenschaften typischerweise eine kurzzeitige seitliche Ablenkung der Bahn bewirken. Dieser Bahnlauffehler wird dann in die Fertigrolle mit eingewickelt (siehe SD-20 und RD-56). Dieser eingewickelte initiale Lagefehler auf der Fertigrolle würde sich ebenfalls als vertikales Frequenzmuster im Bahnlauf der Druckmaschine zeigen. Basierend auf der Hypothese 2 b) müsste sich ein solcher initialer Lagefehler entlang der Druckmaschine tendenziell aber von selbst wieder dämpfen. In keinem Fall aber verstärken. Bei den Rollen der Fallstudie mit diesem Effekt wird lediglich eine Verstärkung des Bahnlaufimpulses entlang der Maschine beobachtet. Daher überwiegt in diesen Fällen offensichtlich der Einfluss aus dem Wechsel in den Materialeigenschaften und es existiert wohl kein initialer Lagefehler im Wickel.

⇒ Eingewickelte seitliche Lagefehler im Splice sind vernachlässigbar.

8.2.2 Inhomogenität der Materialeigenschaften

8.2.2.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störung zeichnet sich durch eine niederfrequente, stochastische, zur Bahn ortsfeste, und entlang der Druckmaschine sich verstärkende laterale Bahnlaufstörung aus. Sie ist über das gefilterte \hat{X}_3^c Spekrogramm nachweisbar. Das Amplitudenmaximum liegt stets im Gleichanteil. Das Spektrum fällt zu höheren Frequenzen hin kontinuierlich ab. Die Bahnlaufstörung tritt in der Fallstudie ausschließlich im Frequenzbereich $k < 0,25/\text{m}$ bzw. $\lambda > 4 \text{ m}$ auf.

Abbildung 8.23 zeigt fünf unkommentierte Beispielrollen mit dieser Information.

¹²¹Durchhängende, nicht gespannte Bahn in einem freien Zug

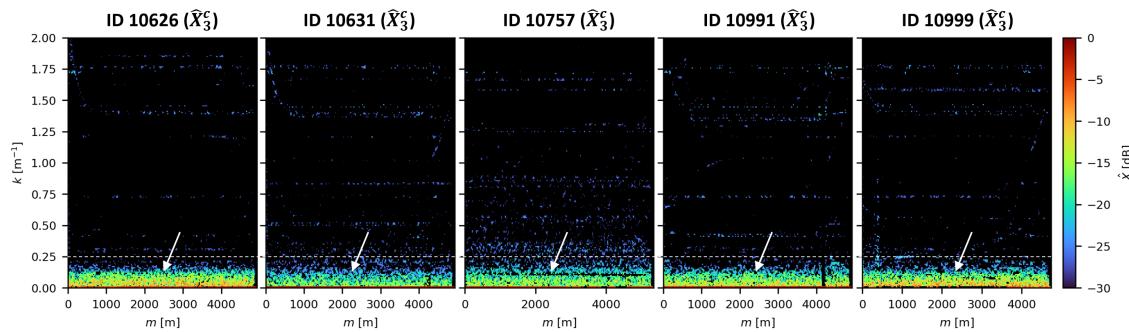


Abbildung 8.23 Fünf Beispielrollen mit Inhomogenität in den Materialeigenschaften

8.2.2.2 Ursachen Zuordnung

Die laterale Bahnlaufstörung wird auf eine niederfrequente und stochastische Schwankung in den Materialeigenschaften zurückgeführt, die eine entsprechende Seitenbewegung der Bahn in der Druckmaschine verursacht. Dieser Art der Bahnlaufstörung kann deshalb sicher auf die Materialeigenschaften zurückgeführt werden, da sie entlang der Druckmaschine in der Struktur identisch ist und zur Bahn ortsfest auftritt. Käme die Ursache von äußeren Einflüssen, müsste die Störungen entsprechend der Sensorabstände und Druckgeschwindigkeit phasenverschoben auftreten, sodass sie am Ende zur Bahn ortsfest sind. Außerdem müssten sie exakt identisch in ihrer stochastischen Struktur sein. Ein solcher Umstand ist außerordentlich unwahrscheinlich und kann daher praktisch ausgeschlossen werden. Es muss sich also um ein und dieselbe Grundursache handeln.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass sich die lateralen Bahnlaufstörungen nicht als entsprechende Variation in der Bahnnspannung auswirken. Diese Tatsache zeigt, dass die Bahn diesbezüglich mit dem geringsten Widerstand durch die Druckmaschine (bzgl. Bahnabschnitt „Druck“) läuft. Damit kann ebenfalls ausgeschlossen werden, dass äußere Kräfte diese Bahnlaufstörung verursacht, da sie typischerweise auch die Bahnnspannung beeinflussen und damit auch den natürlichen Lauf der Bahn stören würde.

Außerdem verstärkt sich die Störung entlang der Druckmaschine. Dieses charakteristische Übertragungsverhalten von lateralen Bahnlaufstörungen stimmt mit vielfältigen Beobachtungen in der Literatur bzgl. nicht idealer Bahnen (siehe 4.4.4 (S.92)) überein und konnte darüber hinaus auch in spezifischen Druckversuchen an der Druckmaschine beobachtet werden, mit dem auch der Datensatz erhoben wurde (siehe A.1).

Die Orts-Frequenz Signatur passt schließlich durch ihre stochastische Struktur mit einem niederfrequenten, kontinuierlich verlaufenden Frequenzspektrum, sehr gut zu typischen Prozessstörungen die gleich zu Beginn einer Papier- bzw. Kartonmaschine auftreten.

In Verdacht stehen hier insbesondere der Stoffauflauf und die Siebpartie. Dadurch dass in der Fallstudie mehrlagige Kartonagen verarbeitet werden, sind für jede Lage separate Stoffaufläufe und Siebpartien beteiligt. Einer der wichtigsten Grundursachen für material-induzierte laterale Bahnlauftörungen sind Schwankungen in der Faserorientierung (siehe 4.4.4 (S.92)). Diese werden häufig durch Schwankungen in den Fluid-dynamischen Vorgängen beim Übergang der Wasser-Faser Suspension in der Headbox auf das Umlaufsieb und während der Entwässerung verursacht, die schließlich zum finalen Faservließ führen. Die spezifischen Störungen jedes einzelnen Stoffauflaufs und jeder Siebpartie überlagern sich in Form einer in MD und ggf. auch in CD inhomogenen Faserorientierung. Auch inhomogene Profile der Schichtdicke und Faseranteile bzgl. CD und MD sind potentielle Grundursachen. Alles zusammen beeinflusst schließlich auch die mechanischen Eigenschaften des mehrlagigen Kartons. Das Spektrum der Materialeigenschaftsschwankungen dieser Kartons wird aufgrund der Überlagerungen der verschiedenen Störungen aus den einzelnen Stoffaufläufen als kontinuierlich, stochastisch und niederfrequent eingeschätzt.

Siehe auch [104, RD-37, WD-6, WD-38, WHD-6, WHD-11] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.2.2.3 Kausale Argumentationskette

Der Effekt tritt bei fast allen Rollen in unterschiedlichen Intensitäten in der Fallstudie auf. Stellvertretend wird der Effekt anhand der Rolle ID 10626 im Detail diskutiert, da er hier besonders stark ausgeprägt ist. Zunächst werden in Abbildung 8.24 die reinen Bahnkantendaten bzgl. $WEPU_2$ und $WEPU_{11}$ und das daraus berechnete gefilterte \hat{X}_3^c Spektrogramm dargestellt. In diesem Fall ist der Frequenzbereich zwischen 0/m und 0,5/m dargestellt und der Amplitudenbereich von –30 dB bis –10 dB eingegrenzt. Hierdurch tritt das stochastische Orts-Frequenzmuster besonders deutlich hervor.

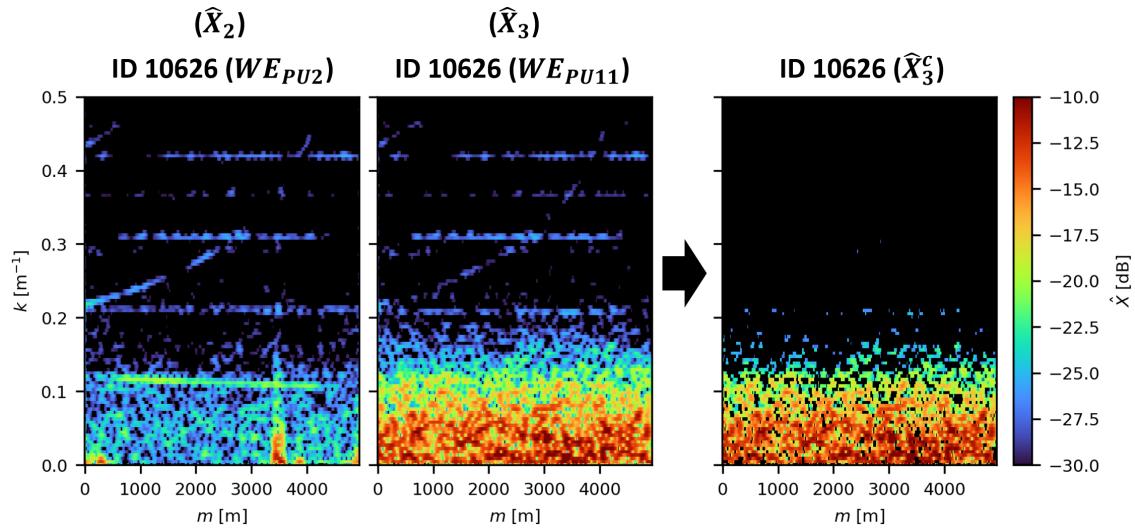


Abbildung 8.24 Exemplarisch zeigt Rolle ID 10626 eine besonders starke materialinduzierte laterale Bahnlaufstörung, die im gefilterten \hat{X}_3^c Spektrogramm isoliert zu beobachten ist

Über einen Vergleich der Bahnkantendaten entlang der Druckmaschine in Abbildung 8.25, mit identischen Spektrogramm-Einstellungen, wird deutlich wie sich die niederfrequente stochastische Struktur sukzessive verstärkt. Besonders interessant ist, dass die Störung bei dieser, wie bei allen anderen Rollen, bei WE_{UW} noch nicht nachweisbar ist.¹²² Der Effekt ist erst in WE_{PU2} messbar und tritt damit erst hinter der seitlichen Bahnlaufregelung (WGS) auf. Daraus folgt, dass diese Art der seitlichen Bahnlaufstörung grundsätzlich nicht durch eine WGS nach der Abwicklung eliminiert werden kann. Die Störung existiert dort noch gar nicht und bildet sich erst im deutlich längeren Bahnabschnitt „Druck“ sukzessive aus. Der Detailausschnitt macht zudem deutlich, dass die Störung in der Struktur völlig identisch zueinander ist und außerdem ortsfest zur Bahn auftritt (Vergrößerung zeigt immer den Ausschnitt bzgl. ΔL).

¹²²Ausgenommen davon sind Sonderfälle durch eine zusätzliche Umrollung auf einem Klinikroller ohne Bahnkantenbeschnitt, siehe Abbildung 8.27 (S.212).

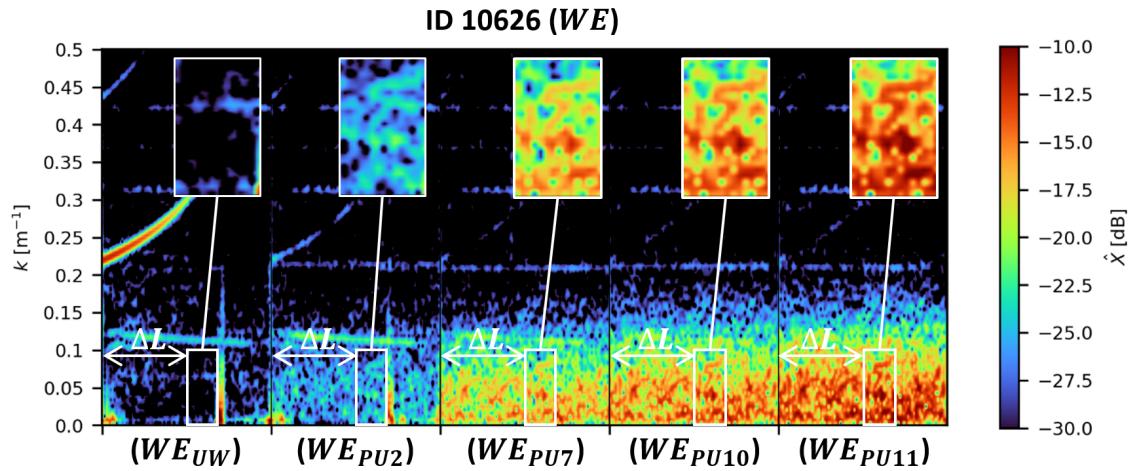


Abbildung 8.25 Detailanalyse des niederfrequenten stochastischen Rauschmusters zeigt, dass seine Struktur entlang der Druckmaschine identisch ist, in Phase liegt und damit zur Bahn ortsfest ist und sich außerdem konsequent verstärkt

Eine Gegenüberstellung der Spektrogramme mit den Signalvisualisierungen als Zeitreihen zweier beispielhafter Ausschnitte I. (300 m bis 600 m) und II. (3200 m bis 3500 m) zeigt die Signalcharakteristik der materialinduzierten Störung a) im Vergleich zu zwei verschiedenen extern induzierten Bahnlaufstörungen b_1) und b_2). Die materialbedingten Störungen verstärken sich entlang der Druckmaschine und die extern induzierten Störungen werden stark gedämpft.

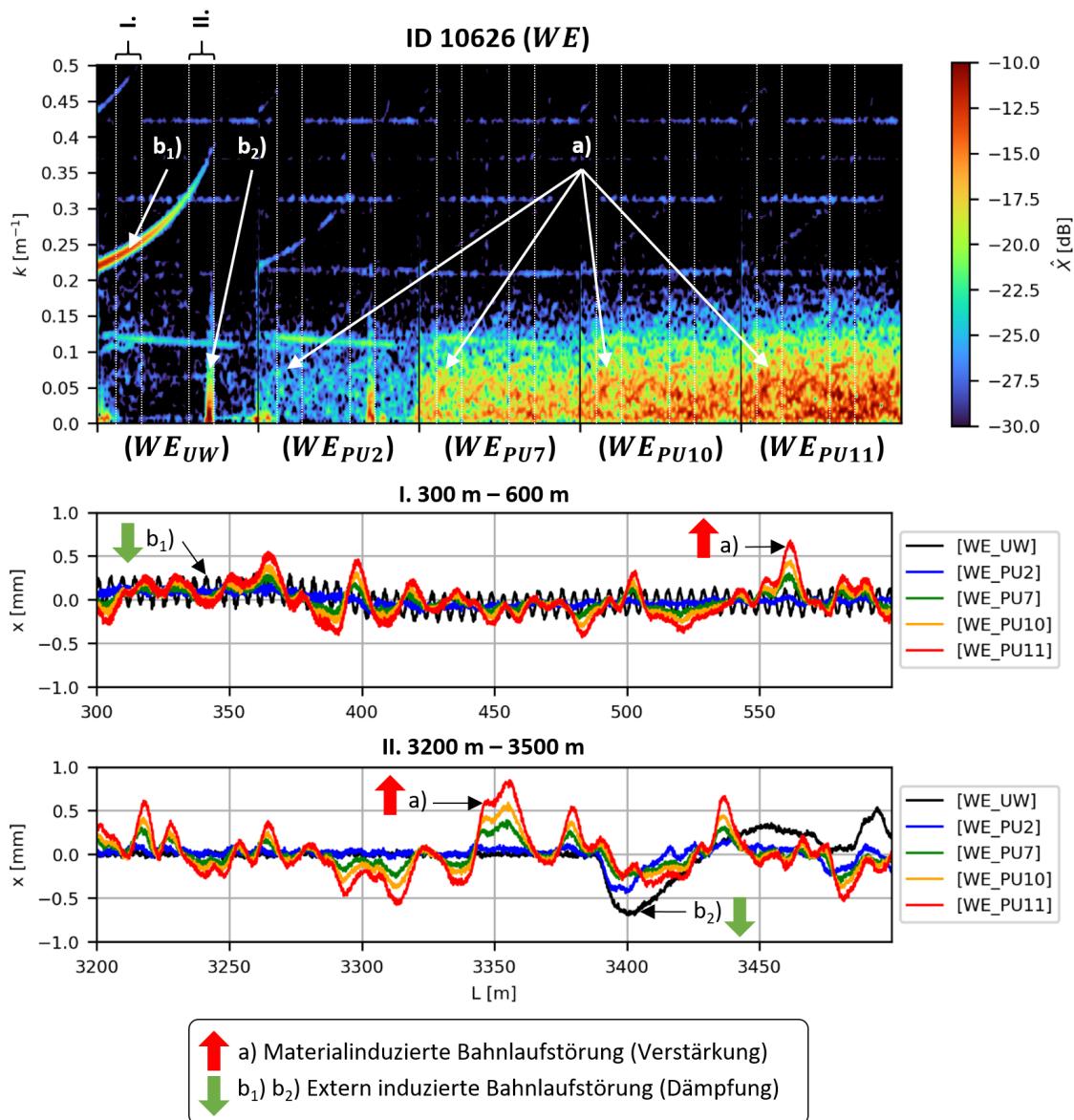


Abbildung 8.26 Gegenüberstellung der Bahnkantenspektrogramme entlang der Druckmaschine (oben) mit zwei verschiedenen Zeitreihenausschnitten I. (mitte) und II. (unten) bzgl. der materialinduzierten Bahnlaufstörung a) und zweier unterschiedlicher extern induzierter Bahnlaufstörungen b₁) und b₂)

In Ausschnitt I. ist direkt nach der Abwicklung (WE_UW) im Zeitsignal hauptsächlich die extern induzierte Bahnlaufstörung b₁) in der Bahnkante zu beobachten. Diese periodische Störung stammt aus einer nicht idealen Abwicklung der Rolle in der Druckmaschine (siehe 8.3.1). Die Störung wird fast vollständig durch das System selbst und ggf. durch die WGS eliminiert. Im Bahnabschnitt „Druck“ (WE_PU2 bis WE_PU11) sind sie kaum noch nachweisbar. Es dominieren im Prinzip nur noch die materialinduzierten Bahnlaufstörungen.

gen a). In der Amplitude sind sie deutlich größer als die Störung b_1 aus der Abwicklung und aufgrund ihrer spezifischen Charakteristik, insbesondere der Amplitudenverstärkung, besonders problematisch für den passgenauen Übereinanderdruck (Registerqualität). Die Störung muss daher vollständig durch die CD-Registerregelung ausgeregelt werden.

Im Ausschnitt II. tritt bei b_2) ein extern verursachter Bahnlaufimpuls durch die plötzliche Rotation des Abwickler Drehgestells zur Vorbereitung eines Rollenwechsels auf (siehe 8.3.1). Dieser Impuls ist bei WE_{UW} noch sehr stark ausgeprägt, wird aber entlang der Maschine relativ schnell gedämpft und ggf. durch die WGS eliminiert. Kurz vor dem Impuls läuft die Bahn bei WE_{UW} sehr ruhig. Der Einfluss von b_1 ist hier sehr klein. Die materialinduzierten Störungen a) sind hier ebenfalls bei WE_{UW} noch nicht detektierbar. Sie entfalten sich erst entlang der Druckmaschine.

⇒ **Der Effekt besitzt eine niederfrequente, stochastische Orts-Frequenzsignatur, die sich bzgl. der Bahn ortsfest entlang der Druckmaschine sukzessive verstärkt.**

Die stochastische Bahnlaufstörung zeigt sich ausschließlich bei solchen Rollen als initialer Lagefehler (in WE_{UW} nachweisbar), bei denen das Material mehrfach umgewickelt wurde und die Kanten nicht erneut beschnitten wurden. Diese besondere Konstellation tritt nur bei sehr wenigen Rollen in der Fallstudie auf. Abbildung 8.27 zeigt die Bahnkantendaten entlang der Druckmaschine für einen solchen Sonderfall am Beispiel der Rolle ID 11619.

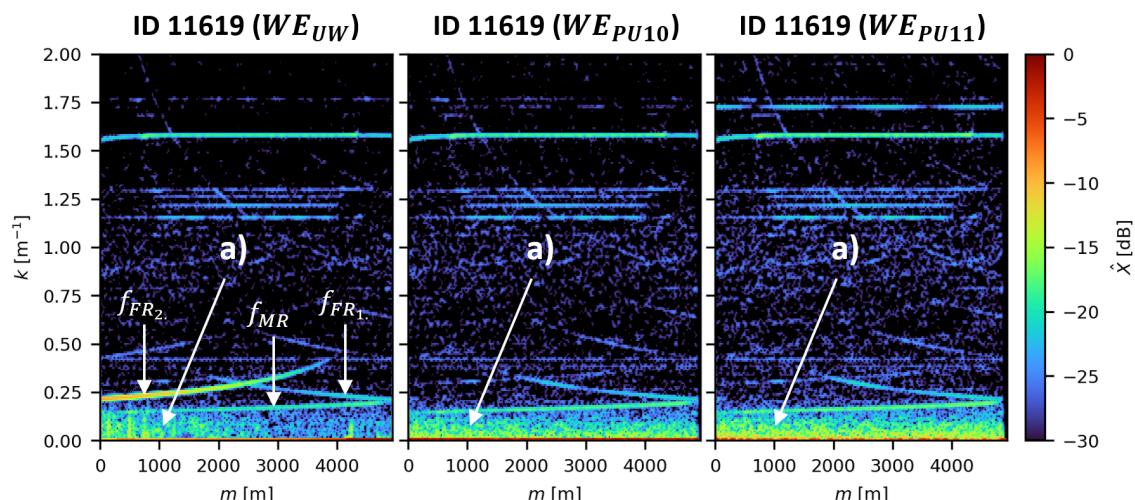


Abbildung 8.27 Rolle ID 11619 zeigt, dass eine zusätzliche Umrollung auf einem Klinikroller (ohne Bahnkantenschnitt) zu entsprechenden initialen Lagefehlern auf dem Wickel führt,

Die Rolle lässt sich aufgrund ihrer spezifischen Bahnkantensignaturen als Rolle identifizieren, die nach der Fertigrollenwicklung auf dem Maschinenroller noch einmal auf einem

Klinikroller umgerollt wurde. Das Besondere ist, dass die Bahnkanten nicht erneut beschnitten wurden. Sämtliche Informationen aus dem letzten und dem vorherigen Wickelprozess sind in der Bahnkante erhalten geblieben. Die Bahnkanteninformationen umfassen sowohl die reinen Bahnkantenstörungen als auch initiale seitliche Lagefehler im Wickel. Der Frequenzverlauf f_{MR} zeigt die Mutterrollenabwicklung, f_{FR_1} die Aufwicklung der 1. Fertigrolle im Maschinenroller und f_{FR_2} die Aufwicklung der 2. Fertigrolle im Klinikroller bzw. die Abwicklung der 2. also finalen Fertigrolle in der Druckmaschine. f_{MR} und f_{FR_1} sind im Vergleich zu den Darstellungen in Kapitel 8.1.2 bzw. 8.1.1 in der Richtung umgekehrt, da es zu einem zusätzlichen Richtungswechsel der Materialbahn aufgrund der erneuten Umrollung auf dem Klinikroller gekommen ist. Die Abwicklungsmuster in der Bahnkante beweisen also zunächst, dass die Rolle zuvor mehrfach umgewickelt und die Bahnkante nicht erneut beschnitten wurde. Der eingewickelte initiale Lagefehler mit der niederfrequenten stochastischen Orts-Frequenzstruktur beweist, dass die materialinduzierten Bahnlaufstörungen also grundsätzlich auch in Wicklungsprozessen auftreten können. Da sich der Effekt ausschließlich bei solchen Rollen als initialer Lagefehler zeigt, bei denen das Material mehrfach umgewickelt wurde und die Kanten nicht erneut beschnitten wurden, macht deutlich, dass der Effekt durch die Bahn selbst induziert wird und prinzipiell unabhängig von der Maschine ist, auf der die Bahn verarbeitet wurde.

Auch wenn die WGS diesen initialen Lagefehler erfolgreich ausregeln würde, bildet er sich von da an aber wieder von selbst aus. Mutmaßlich sind die Störungen bei diesem Sonderfall am Ende der Druckmaschine deshalb nicht größer als bei anderen Rollen. Wenn die WGS diese Störungen nicht ausregelt, können theoretisch auch größere Abweichungen bis zum Ende der Maschine entstehen. Für dieses Beispiel standen keine Daten der WGS Stellbewegung zur Verfügung.

⇒ **Sonderfälle mit zusätzlicher Umrollung auf Klinikroller (ohne Bahnkantenschnitt) unterstreichen die Ursachen Zuordnung.**

Eine statistische Auswertung der Standardabweichungen σ der Bahnkantenmessungen bzgl. aller validen Messreihen, die im Bereich $0,015 \text{ mm} < \sigma < 0,5 \text{ mm}$ liegen, wird in Abbildung 8.28 gezeigt.

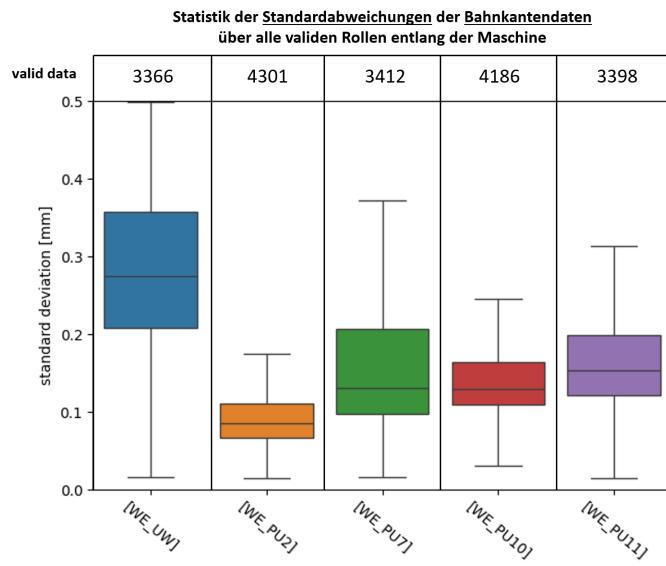


Abbildung 8.28 Statistik der Standardabweichungen über alle validen Messreihen der Bahnkantensensoren

Die statistische Auswertung zeigt einen Anstieg in der Standardabweichung, der dieselbe Charakteristik aufweist wie Beobachtungen in Abbildung 8.25 bzgl. der dominantesten Störungen. Bei WE_{UW} ist die Standardabweichung zunächst relativ groß. Dieser Effekt wird hauptsächlich auf die vergleichsweise starken lateralen Bahnlaufstörungen durch eine nicht ideale Abwicklung in der Druckmaschine zurückgeführt (siehe 8.3.1). Durch das Tänzersystem, der WGS und dem System selbst, werden derartige Störungen in der Regel sehr gut ausgeregelt bzw. gedämpft. Die verbleibenden Abweichungen in der Bahnkantenmessung bei WE_{PU2} setzen sich aus Resten der Abwicklungsstörungen, reinen Bahnkantenstörungen und ersten materialinduzierten Bahnlaufstörungen zusammen. Der dann folgende Anstieg in der Standardabweichung im Bahnabschnitt „Druck“ (hier bzgl. WE_{PU2} bis WE_{PU11}) stimmt mit dem charakteristischen Anstieg der materialinduzierten Bahnlaufstörungen überein. Da in den Spektrogrammen keine anderen Bahnkanten- oder Bahnlaufstörungen in CD-Richtung eine entsprechende Charakteristik und Dominanz aufweisen, wie die materialinduzierten Störungen, sind es ganz offensichtlich diese, die in der Statistik dominieren. Die praktischen Druckversuche in A.1 untermauern diese Schlussfolgerung mit Rollen, die von verschiedenen CD-Positionen stammen und völlig andere Bahnlaufeigenschaften aufweisen. Das zeigt sich sowohl durch einen generell anderen Pfad durch die Druckmaschine, als auch im unterschiedlichen Anstieg der Standardabweichung der Bahnkantenmessungen entlang der Maschine.

⇒ Die seitliche Bahnlaufstörung besitzt in der gesamten Fallstudie offenbar einen relevanten Anteil an der Statistik der Standardab-

weichung im seitlichen Bahnlauf, insbesondere im hinteren Teil der Druckmaschine.

Eine besonders wichtige Beobachtung ist, dass sich die stochastischen Bahnlaufstörungen in der beschriebenen Form nicht als Bahnspannungsschwankung auswirken (siehe Abbildung 8.29). Die Seitenbewegung ist eine Folge der Tendenz der Bahn mit geringstem Widerstand durch die Maschine zu laufen. Der Bahntransport in MD-Richtung wird daher entsprechend wenig bis kaum durch die materialinduzierten Störungen beeinflusst. Die Bahnspannungsvariationen zeigen dagegen, dass völlig andere, nämlich streng periodische Orts-Frequenzmuster den Bahntransport in MD-Richtung dominieren. Sie werden in 8.3.2 diskutiert.

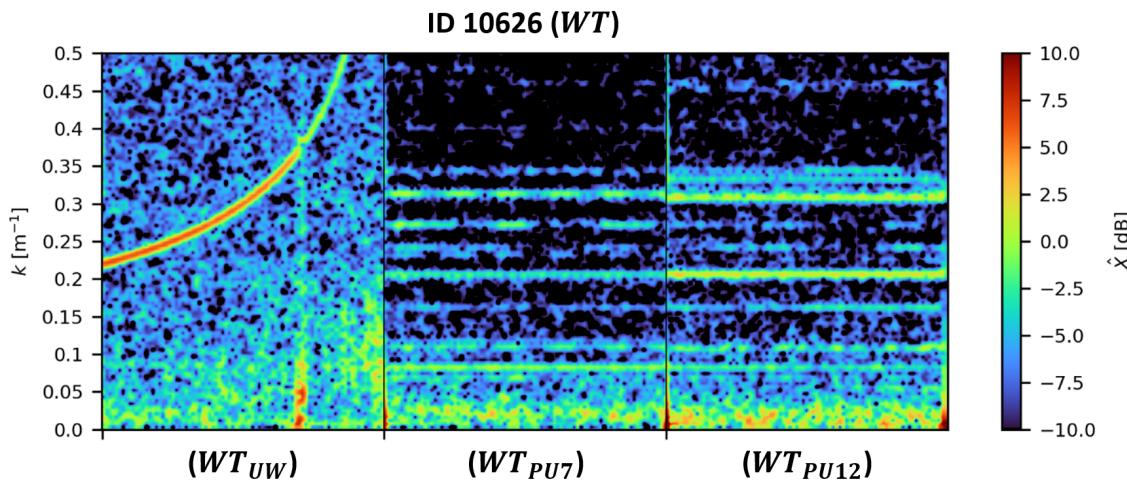


Abbildung 8.29 Bahnspannungsdaten der Rolle ID 10626 zeigen exemplarisch, dass es in MD-Richtung zu völlig anderen (streng periodische) Störungen kommt, die in der Orts-Frequenzstruktur nicht zu den materialinduzierten niederfrequenten CD-Bahnlaufstörungen passen

⇒ Der Effekt wirkt sich offenbar nicht auf Schwankungen in der Bahnspannung aus.

Da die Bahnfeuchtigkeit einen Einfluss auf das Bahndehnungsverhalten hat, werden in Abbildung 8.30 die Schwankungen in der Restfeuchtigkeit der Materialbahn direkt nach der Abwicklung mit den Bahnkantenmessungen bei WE_{PU10} (CD) und den Bahnspannungsdaten WT_{PU12} (MD) abgeglichen. In den Spektrogrammen werden jeweils Daten von 300 Rollen gezeigt, die von drei unterschiedlichen Papiermaschinen stammen. Es wurden nur Aufträge mit je identischer Rapportlänge ausgewählt. Die weißen Pfeile markieren periodische Störungen in den Feuchtigkeitsdaten, die als solche teilweise auch in den Bahnlaufdaten wiederzufinden sind. Der rote Kasten markiert einen exemplarischen Abschnitt,

bei dem die Störungsstruktur zwischen einzelnen Sensoren eindeutig nicht miteinander korreliert. Die roten Pfeile markieren Bereiche mit besonders starken Bahnlaufstörungen.

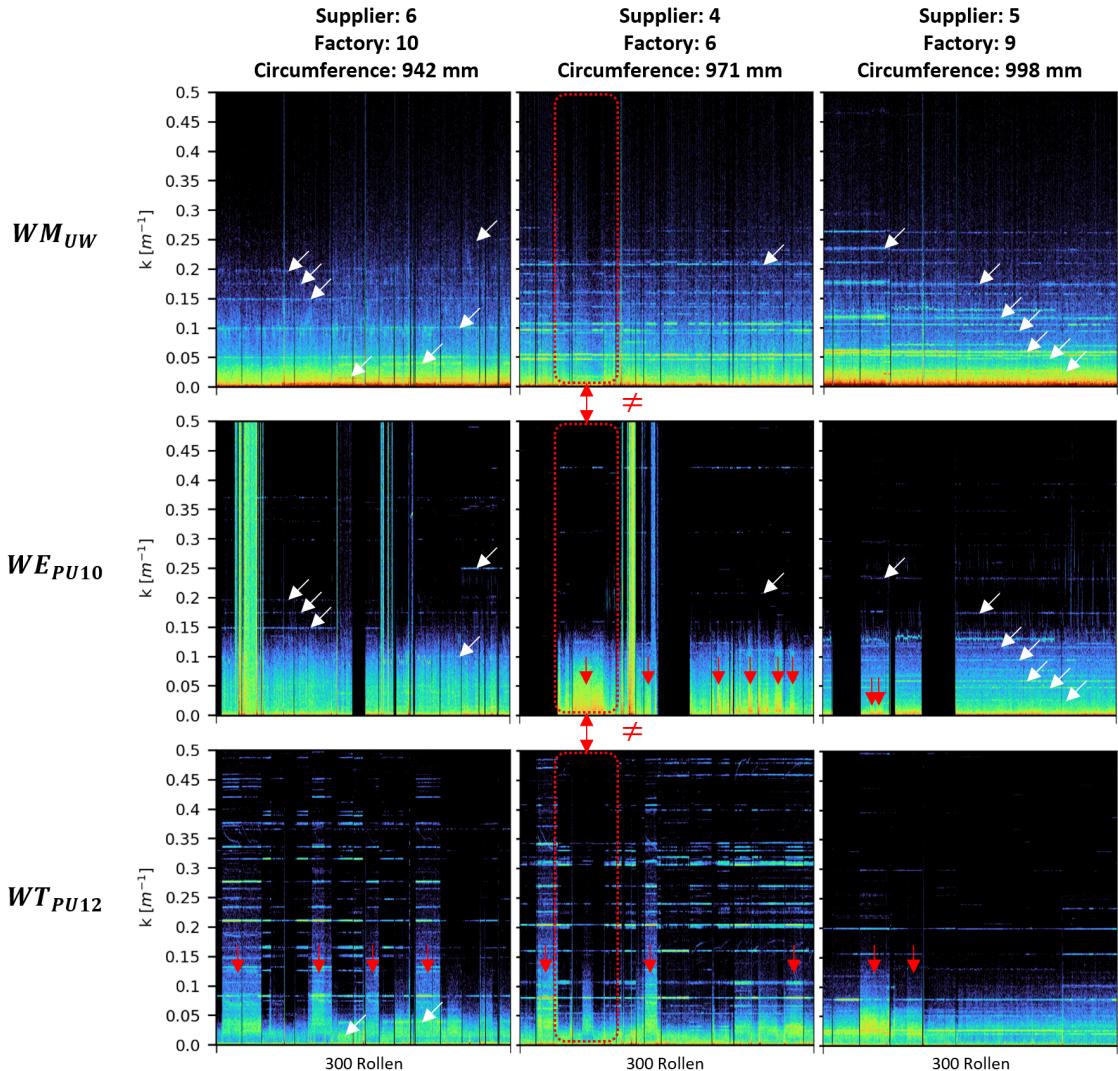


Abbildung 8.30 Die Gegenüberstellung von Bahnfeuchtigkeitsdaten (WM_{UW}) mit Bahnlauftypen bzgl. CD und MD (WE_{PU10} und WT_{PU12}) über jeweils 300 Rollen von drei verschiedenen Papiermaschinen, bei jeweils identischer Rapportlänge, zeigt keinen signifikanten Einfluss der Bahnfeuchtigkeitsschwankungen auf die grundlegende Charakteristik der Bahnlauftörungen in CD und MD

Zunächst wird deutlich, dass die Feuchtigkeitsschwankungen (siehe oberstes Spektrogramm) sehr konstant sind und je Papiermaschine ein äußerst einheitliches Aussehen aufweisen. Die geringfügigen Unregelmäßigkeiten sind wohl auf unterschiedliche Produktionen (verschiedene Kartonprodukte) zurückzuführen. Die Feuchtigkeitsschwankungen stellen in jedem Falle einen unverwechselbaren spektralen Fingerabdruck der jeweiligen Papiermaschine

dar, von der das Material stammt. Die periodischen Restfeuchtigkeitsschwankungen finden sich selten und wenn, dann überhaupt nur sehr schwach, in den Bahnlaufdaten (erkennbar in der zweiten Zeile WE_{PU10}) wieder. Die grundsätzlichen Unterschiede (rote Pfeile) in der spektralen Charakteristik der Bahnlaufstörungen in CD- und MD-Richtung sind durch Schwankungen in der Bahnfeuchtigkeit daher nicht zu begründen. Auswertungen, die mittlere relative Restfeuchtigkeit mit den Bahnlaufstörungen vergleichen, konnten ebenfalls keine Korrelation aufzeigen.

⇒ **Die Schwankungen in der Restfeuchtigkeit der Bahn haben offensichtlich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die generelle Charakteristik der Bahnlaufstörungen.**

8.3 Extern induzierte Bahnlaufstörungen - Validierung Hypothese 2 b)

Die in Kapitel 6.3.2.1 formulierte **Hypothese 2 b)**: besagt:

Von außen auf den Bahnlauf aufgezwungene Störungen werden entlang mehrerer Walzen wieder gedämpft, da sich die Bahn von selbst stabilisiert.¹²³

Alle nachfolgenden Informationsbeispiele sind als temporäre Störungen des Bahnlaufes zu beobachten. Sie identifizieren sich über sukzessiv abschwächende Amplituden bzw. eine dämpfende lineare Verzerrung entlang der Druckmaschine über das gefilterte \hat{X}_2^b Spektrogramm im Bahnabschnitt „Abwicklung“ bzw. \hat{X}_3^d bzgl. des Bahnabschnitts „Druck“. Hochfrequente Bahnlaufstörungen werden stärker gedämpft als niederfrequente. Jede Störung wird zunächst in seiner Orts-Frequenzsignatur beschrieben und anschließend auf Grundlage einer Diskussion, kausalen Ursachen zugeordnet. Sie wirken allesamt von außen und nur temporär auf den Bahnlauf. Jedes einzelne Informationsbeispiel dient damit auch zur Validierung der Hypothese 2 b) und Hypothese 2 c).

8.3.1 Nicht ideale Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine

8.3.1.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störung zeichnet sich durch eine laterale Bahnlaufstörung aus, die durch eine konkav verlaufende Orts-Frequenzsignatur f_{FR} charakterisiert ist. Diese passt genau zur Drehfre-

¹²³siehe NEL und lineares Übertragungsverhalten lateraler Bahnlaufstörungen (siehe Abbildung 3.24 [95, 79-80])

quenz der Fertigrolle in der Abrollung der Druckmaschine. Die Störung weist mal mehr, mal weniger Obertöne auf. In der Regel ist die Grundfrequenz deutlich am stärksten ausgeprägt. Direkt nach der Abwicklung ist die Störung am stärksten ausgeprägt und wird entlang der Druckmaschine stark gedämpft. Die Information kann aufgrund der gedämpften, linearen Verzerrung entlang der Druckmaschine im Bahnabschnitt „Abwicklung“ über das gefilterte Pegelspekrogramm \hat{X}_1^b beobachtet werden bzw. über \hat{X}_2^b im Bahnabschnitt „Druck“. Zu Beginn der Abwicklung (jeweils ganz links im Spektrogramm) ist die Störung immer am stärksten ausgeprägt. Die Amplitude nimmt über den Rollenzyklus immer weiter ab. Im letzten Drittel des Rollenzyklus kommt es in der Fallstudie zu der Besonderheit, dass die konvex verlaufende Störung kurz nach einer impulsartigen Bahnlaufstörung (ebenfalls \hat{X}_1^b bzw. \hat{X}_2^b) nahezu vollständig verschwindet.

Abbildung 8.31 zeigt fünf unkommentierte Beispielrollen mit dieser Information. Die gestrichelte Linie zeigt jeweils den Moment der impulsartigen Bahnlaufstörung.

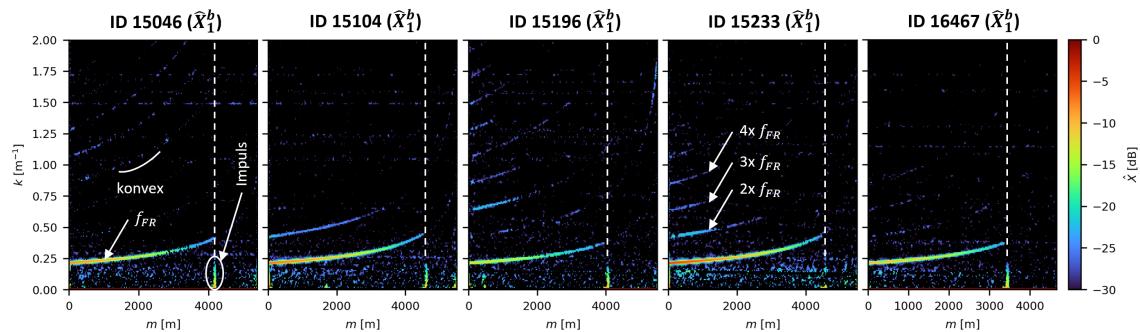


Abbildung 8.31 Fünf Beispielrollen mit lateraler Bahnlaufstörung aus einer nicht idealen Abwicklung im Bahnabschnitt „Abwicklung“ (\hat{X}_1^b)

8.3.1.2 Ursachen Zuordnung

Die seitliche Bahnlaufstörung wird einer nicht idealen Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine zugeordnet, die durch die Rolle selbst verursacht wird. Das konvex verlaufende Orts-Frequenzmuster passt grundsätzlich zur Drehfrequenz einer nicht ideal rotierenden Fertigrolle in einer Auf- oder Abwicklungssituation (siehe 8.1.1). Die Störung ist im Unterschied zu 8.1.1 jedoch nicht in die Bahnkante hineingeschnitten, sondern liegt als initiale Störung im Bahnlauf in CD und MD vor. In Bestätigung zur Hypothese 2 b) wird sie entlang der Druckmaschine stark gedämpft. Die Dämpfung der lateralen Bahnlaufstörung wird nicht ausschließlich auf eine aktive Regelung des Bahnlaufs zurückgeführt, sondern zu einem signifikanten Anteil auch auf eine systembedingte Dämpfung durch den Bahnlauf selbst (NEL). Die Grundursache für die nicht ideale Abwicklung wird zum Einen

auf radiale Deformationen des Rollenwickels aus dem Transport zurückgeführt. Zum Anderen auf eine nicht perfekt rotationssymmetrische axiale Einspannung der Rollen über die Spannzapfen am Abwickler der Druckmaschine. Eine unrunde Rolle führt je nach Deformation zu einem spezifischen Spektrum aus Grund- und Obertönen (siehe 7.1). Eine nicht rotationssymmetrische Einspannung der Rolle führt zu einer asymmetrischen Exzentrizität der Rolle in der Abwicklung. Diese lässt die Rolle mit ihrer Grundfrequenz taumeln und verursacht dadurch rotationsperiodische Bahnlaufstörungen in CD und MD. In realen Rollen liegen in der Regel beide Ursachen gleichzeitig vor, sodass diese sich auch in der resultierenden Bahnlaufstörung additiv überlagern.

Siehe auch [104, RD-10, RD-17, RD-29] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.3.1.3 Kausale Argumentationskette

Das konvex verlaufende Orts-Frequenzmuster passt exakt zur Drehfrequenz der Fertigrolle in einer Abwicklungssituation oder einer vorausgegangenen Aufwicklung (siehe 8.1.1). Beide Frequenzverläufe liegen, ohne die Berücksichtigung von tangentialen Lagenverschiebungen (siehe 7.3) innerhalb der Wicklungsprozesse, theoretisch genau übereinander. Grundsätzlich könnte die Störung also auch durch rotationsperiodische Ablenkungen der Rolle im Walzenbett des Maschinenrollers verursacht worden sein, die ursächlich zu entsprechenden seitlichen Lagenfehlern im Wickel geführt haben. Diese würden ebenfalls zu initialen Bahnlaufstörungen in der Druckmaschine führen. Die Grundursache läge dann aber in der Papierfabrik und nicht in der Druckerei. Die der Aufwicklung zugeordneten Bahnkantenstörungen (siehe 8.1.1) weisen jedoch eine völlig andere Orts-Frequenz Charakteristik auf, als die hier diskutierte initiale Bahnlaufstörung in der Druckmaschine.

Es zeigen sich in 8.1.1 über den Rollenzyklus unterschiedlich starke Grund- und Obertöne, weil sich die Deformation und damit auch die Vibration der Rolle über einen Rollenzyklus typischerweise verändert. Dies erklärt sich daraus, dass der Wickel im Walzenbett auf dem Umfang gelagert ist und die rotationsperiodischen Rollenvibrationen den Wickel über den Rollenzyklus entsprechend unterschiedlich stark deformieren. Die Bahnkantenstörung fällt in 8.1.1 über den Rollenzyklus in der Amplitude nicht konsequent ab. Das Amplitudenmaximum liegt häufig auch auf Obertönen oder tritt mitten im Rollenzyklus auf (z.B. Resonanz). Beide Aspekte treten in dem hier diskutierten Effekt völlig anders auf.

Die initiale Bahnlaufstörung weist stets eine kontinuierlich abfallende Amplitude auf. Ihr Amplitudenmaximum liegt stets in der Grundfrequenz. Zu Beginn des Rollenzyklus (großer Rollendurchmesser bzw. volle Rolle) ist die Störung am stärksten. Abbildung 8.32 zeigt die Störung prototypisch am Beispiel der Rollen ID 15199 und ID 15233 im gefilterten \hat{X}_1^b

Spektrogramm. Es zeigt ausschließlich sich abschwächende Anteile in der Bahnkantenmessung bzgl. des Bahnabschnitts „Abwicklung“ (WE_{UW} bis WE_{PU2}).

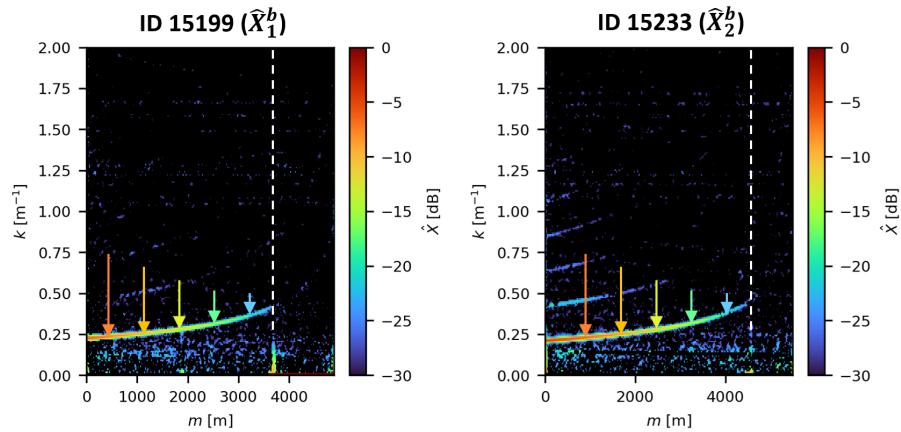


Abbildung 8.32 Exemplarische Rollen zeigen den charakteristischen kontinuierlichen Abfall der Amplitude bzgl. der Rollengrundfrequenz, die nach der impulsartigen Bahnlaufstörung in der Regel vollständig verschwindet

Eine mögliche Erklärung für diese Charakteristik ist eine asymmetrisch exzentrische Einspannung der Rolle am Abwickler. Hierbei wäre die Amplitude der Bahnlaufstörung linear von der Rollenbreite W und dem Rollenradius r abhängig. Je kleiner W und je größer r , sowie die Exzentrizität, desto größer die Bahnlaufstörung und umgekehrt. Bei typischerweise 0,7 m breiten Rollen und einem typischen Rollenradius von ebenfalls 0,7 m wirkt sich eine einseitige exzentrische Lagerung der Rolle über das Taumeln in der Abwicklung als gleich große seitliche und radiale Ablenkung der Bahn aus. Bereits kleine Beschädigungen an der Papphülse der Fertigrolle können so zu einer signifikanten Exzentrizität in der Abwicklung führen, welche verhältnismäßig großen initialen Bahnlaufstörungen erzeugen.

Abbildung 8.33 zeigt das Ergebnis einer modellierten einseitig exzentrischen Einspannung der Rolle, die zu einem linearen Abfall der Bahnlaufstörung führt. Das Spektrogramm zeigt, dass die Amplitude jedoch eindeutig nicht so stark abfällt wie bei realen Rollen beobachtet.

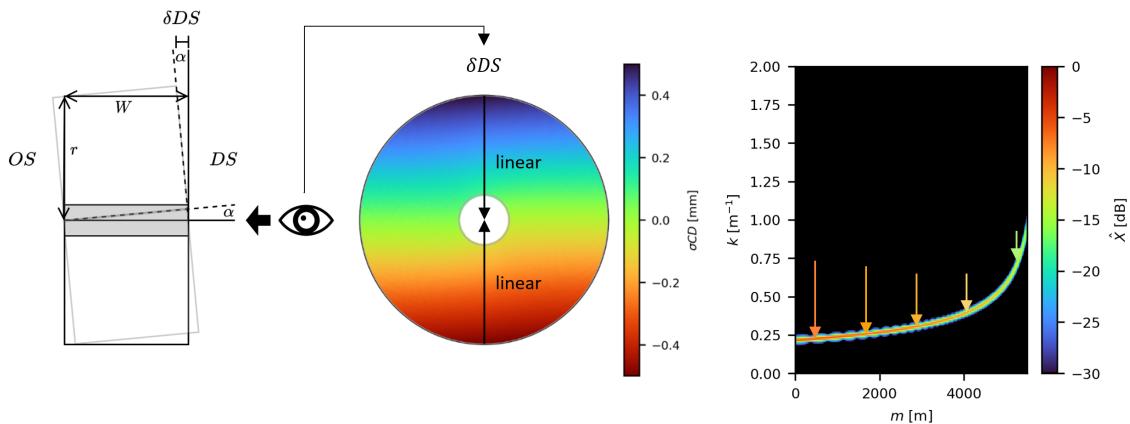


Abbildung 8.33 Asymmetrische exzentrische Lagerung der Rolle führt zu einer linear abfallenden Bahnlaufstörung mit der Rollengrundfrequenz (hier bzgl. δDS in CD-Richtung)

Der lineare Zusammenhang, durch die asymmetrische Exzentrizität, begründet daher wohl nicht vollständig den starken Rückgang der Amplitude über den Rollencyklus.

Da die Störung mit kleiner werdendem Rollenradius an der Abwicklung immer hochfrequenter wird, besteht ein weiterer Erklärungsansatz in einer zunehmenden Dämpfung gegen Ende des Rollencyklus aufgrund der zunehmenden Frequenz.¹²⁴

Zu guter Letzt überlagern sich bei den meisten Rollen zusätzlich zur nicht rotationssymmetrischen Einspannung der Rolle, außerdem diverse radiale Deformationen des Wickels aufgrund von Einflüssen aus dem Transport. Typischerweise sind diese an Außenlagen ebenfalls am stärksten ausgeprägt. Beide Effekte überlagern sich mit der exakt gleichen Frequenz. Die Grundfrequenz ist in beiden Fällen am stärksten ausgeprägt und wird mit kleiner werdendem Radius immer schwächer. Je nach Phasenlage beider Effekte kann es theoretisch auch zu einer weiteren Verstärkung oder Abschwächung der Störungen kommen. Eine Auslöschung ist eher unwahrscheinlich, da eine asymmetrisch exzentrische Einspannung und eine radiale Deformation des Wickels, auch wenn sie im besten Fall genau gegenphasig vorliegt, in der Regel dennoch zu einer lateralen Auslenkung führen sollten, da die Wirkungsrichtungen nicht entgegengesetzt ist. In jedem Fall kann es nicht zu einer Schwebung zwischen den beiden Effekten kommen, da sie stets dieselbe Frequenzen aufweisen. Selbst bei einer tangentialen Lagenverschiebung durch die Abwicklung oder durch Bahndehnungseffekte würden diese immer auf beide Effekte gleich wirken und entsprechend beide Frequenzen verschieben.

¹²⁴Diese Hypothese (2 c) konnte in einem Oszillationsversuch mit der WGS in A.2 experimentell bestätigt werden.

Insgesamt deuten die Beobachtungen darauf hin, dass die Störung nicht durch die Aufwicklung der Rolle im Maschinenroller verursacht wird, sondern sehr wahrscheinlich durch radiale Deformationen des Rollenwickels aus dem Transport und einer asymmetrisch exzentrischen Einspannung der Rolle am Abwickler. Der erste Effekt führt in der Regel zum spezifischen Obertonspektrum im Bahnlauf (besonders in MD). Der zweite Effekt führt im besonderen Maße zu der stark ausgeprägten Grundfrequenz f_{FR} im Bahnlauf (besonders in CD-Richtung). Beides zusammen führt zu einem additiv überlagerten rotationsperiodischem Taumeln der Rolle. Genau das ist hier mit „nicht ideale Abwicklung der Fertigrolle“ gemeint.

⇒ Verschiedene Indizien deuten auf eine Verursachung in der Abwicklung der Druckmaschine.

In den realen Beispielen der Fallstudie fällt auf, dass die Abwicklungsstörung in der Regel direkt nach einer impulsartigen Bahnlaufstörung abrupt verschwindet. Der Impuls tritt immer im letzten Drittel des Rollenzyklus auf. Abbildung 8.34 zeigt zwei exemplarische Rollen, die zeigen, dass die abrupte Dämpfung der Bahnlaufstörung aus der nicht idealen Abwicklung, nicht über die frequenzabhängige lineare Verzerrung begründet werden kann. Die abrupte Dämpfung ist nämlich nachweislich nicht abhängig von der Frequenz der Störung, sondern ausschließlich vom Zeitpunkt der impulsartigen Störung.

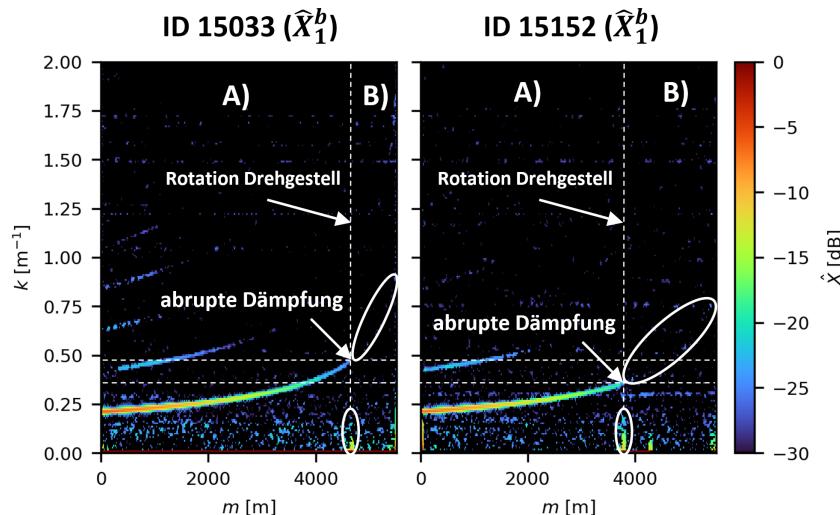


Abbildung 8.34 Die abrupte Dämpfung der Abwicklungsstörung hängt mit einem extern induzierten Bahnlaufimpuls zusammen

Die impulsartige Bahnlaufstörung wird auf eine ruckartig einsetzende Rotation des Abwickler-Drehgestells zurückgeführt. Der Effekt stellt prinzipiell ein eigenständiges Informationsbeispiel dar. Zur Vereinfachung wird die Störung an dieser Stelle mit der nicht idealen

Abwicklung zusammen erläutert, da sie in den Spektrogrammen nur über das kombinierte Auftreten mit der verstärkten Dämpfung der Abwicklungsstörung identifiziert werden kann. Das Drehgestell befindet sich im Rollenzyklus im überwiegenden Teil in der Position A). In dieser Position befindet sich die Rolle in kürzester Entfernung zur nächsten fixen Leitwalze der Druckmaschine. Im letzten Drittel des Rollenzyklus wird das Drehgestell in die Position B) gefahren. Durch die Rotation verlängert sich der Bahnweg bis zur ersten fixen Leitwalze signifikant um etwa 3 m. Außerdem läuft die Bahn über zwei zusätzliche Leitwalzen. Auch in visuellen Beobachtungen konnte festgestellt werden, dass sich der Bahnlauf insbesondere durch die zusätzlichen Leitwalzen merklich beruhigt.



Abbildung 8.35 Verlängerter Bahnweg durch Rotation des Abwicklers vor einem fliegenden Rollenwechsel im letzten Drittel des Rollenzyklus

Ein Blick auf die Aktion der Tänzerwalze direkt nach der Abwicklung D_{UW} zeigt, dass diese in Position B) keinesfalls mehr arbeitet als in der Position A). Tendenziell bewegt sie sich ähnlich oder sogar deutlich weniger. Die abrupte Verstärkung der Dämpfung ist also nur über den verlängerten Bahnweg und die zusätzlichen Leitwalzen erklärbar. Diese Beobachtung stützt Hypothese 2 b).

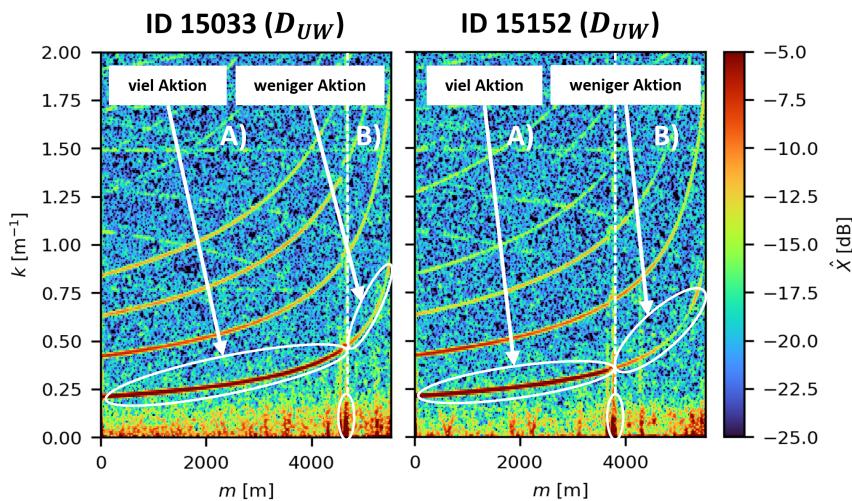


Abbildung 8.36 Abrupt verstärkte Dämpfung der Abwicklungsstörung ist nicht über mehr Aktion der Tänzerwalze erklärbar

⇒ **Drehgestell Rotation bestätigt starke systembedingte Dämpfung von initial in die Druckmaschine einlaufenden Bahnlaufstörungen.**

In Zusammenhang mit der vorherigen Beobachtung ist interessant, dass die Abwicklungsstörungen im Bahnabschnitt „Abwicklung“, primär durch das Tänzersystem ausgeregelt werden. Die WGS reagiert nur in besonders extremen Ausnahmen auf diese Art der seitlichen Bahnlaufstörung. Das hat wohl zum Einen damit zu tun, dass das Tänzersystem deutlich vor der WGS platziert ist, wodurch bereits viel weggedämpft ist. Zum Anderen arbeitet die WGS mit einer Totzone von ca. $\pm 2 \text{ mm}$ ¹²⁵, wodurch nur auf verhältnismäßig große Bahnlaufabweichungen oberhalb dieser Schwelle reagiert wird. Da die WGS außerdem nur auf die kumulierte Abweichung in der Bahnkantenmessung bei WE_{OS} bzw. WGS_{DS} reagiert, ist die Stellbewegung WGS_{action} am Ende auch sehr stark von der Summe aller anderen Störungen im Bahnlauf und in der Bahnkante abhängig. Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Effekten in der Bahnkante bzw. im lateralen Bahnlauf wird nicht vorgenommen. Die hier diskutierte Bahnlaufstörung liegt in der Amplitude bei den aller meisten Rollen in der Fallstudie an der WGS, aber offensichtlich deutlich innerhalb der Totzone, sodass auf diese in der Regel nicht mehr (mit der WGS) reagiert wird.

¹²⁵Dieser Wert wurde experimentell in einem Ozillationsversuch an der WGS ermittelt, siehe A.2.

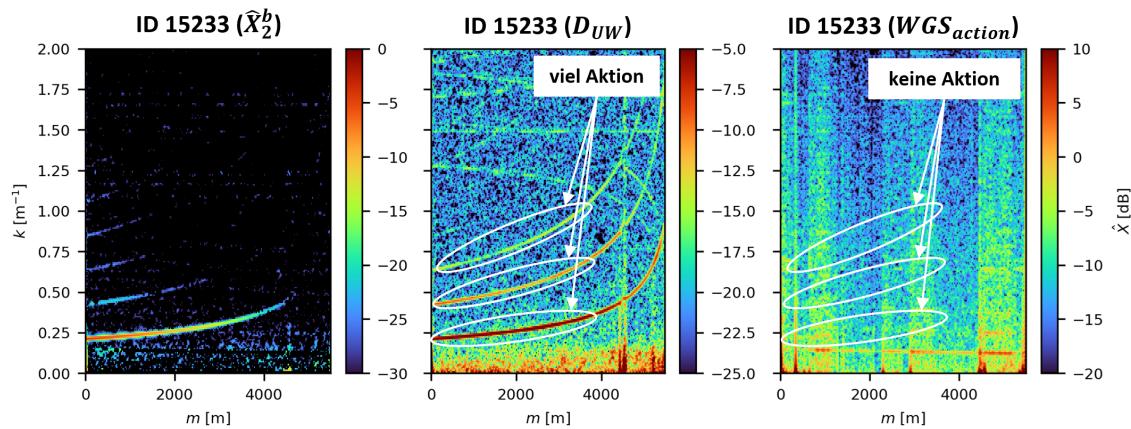


Abbildung 8.37 Bewegung der Tänzerwalze direkt nach der Abwicklung im Vergleich zur seitlichen Bahnlaufregelung (WGS)

Es finden sich quasi keine Beispiele in der Fallstudie, bei denen die Abwicklungsstörung und andere Effekte im Bahnlauf und in der Bahnkante klein genug sind, sodass die WGS nicht auf diese reagiert, aber noch groß genug sind, sodass diese bis weit in den Bahnabschnitt „Druck“ hineinreicht. Wenn eine Abwicklungsstörung im Bahnlauf des Bahnabschnittes „Druck“ beobachtet werden kann, ist die Störung häufig eine Mischung aus der originären Störung vom Abwickler und einer entsprechenden Reaktion der WGS. Da die WGS in diesen Fällen teilweise auch auf die anderen Effekte¹²⁶ in der Bahnkante reagiert, die auf derselben konvexen Frequenzkurve liegen, ist eine Differenzierung von Ursache und Wirkung hinter der WGS nicht trivial.

⇒ Der größte Anteil der Störungen in MD wird durch das Tänzersystem kompensiert. Der größte Anteil der CD-Störungen wird durch den Bahnlauf selbst gedämpft (NEL).

8.3.2 Nicht ideale Walzen in der Druckmaschine

8.3.2.1 Orts-Frequenzsignatur

Diese Störungen zeichnen sich durch konstant periodische Schwankungen in der Bahnspannung aus, die sich als waagerechte Linien im Spektrogramm darstellen. An allen Messwalzen entlang der Druckmaschine lässt sich eine große Vielfalt dieser Art von Störung mit jeweils unterschiedlicher Ausprägungsstärke beobachten. Häufig zeigen sich zusätzlich periodische Schwankungen in der Amplitude der Linienmuster, auch Schwebung genannt.

¹²⁶z.B. Effekt 8.1.1

Sie zeigen an, dass bei der jeweiligen Frequenz mehrere sehr nah beieinanderliegende Frequenzen vorliegen. Viele der besonders stark ausgeprägten Liniensstrukturen zeigen sich über große Beobachtungszeiträume bzw. einer großen Anzahl unterschiedlicher Rollen mit einer entsprechend großen Bandbreite an spezifischen Randbedingungen, wie Materialien, Produktionsparameter, Druckaufträge oder allgemeinen Produktions- oder Umweltbedingungen. Die Liniensstrukturen sind je nach Bedingung aber manchmal etwas stärker und manchmal etwas schwächer ausgeprägt.

Abbildung 8.38 zeigt unkommentiert die Spektrogramme der Bahnspannungsmessungen bei WT_{PU7} von fünf zufällig ausgewählten Beispielrollen aus dem Datensatz, die jeweils eine Vielzahl waagerechter Linienmuster aufweisen.

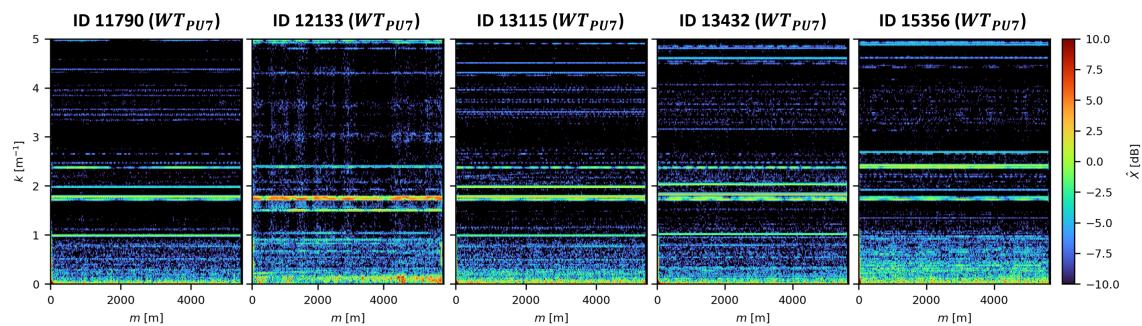


Abbildung 8.38 Fünf Beispielrollen mit einer Vielzahl an rotationsperiodischen Störungen in der Bahnspannung bei WT_{PU7}

8.3.2.2 Ursachen Zuordnung

Die Störung wird aufgrund der streng konstanten und periodischen Orts-Frequenzstruktur, rotationsperiodischen Störungen bei bahnführenden Elementen in der Druckmaschine zugeordnet, also den Walzen. Ohne signifikanten Schlupf zwischen Walze und Bahn, ist die Frequenz der Störung an die Bahngeschwindigkeit gekoppelt. In den ortsaufgelösten Spektrogrammen zeigen sie sich deshalb als streng waagerechte Linien, auch bei unterschiedlichsten Druckgeschwindigkeiten. Da die Störungen entlang der Druckmaschine unterschiedlich stark ausgeprägt sind, müssen sie jeweils an unterschiedlichen Stellen in der Druckmaschine verursacht worden sein. Eine initial vorliegende oder dauerhaft im Material gespeicherte Störung ist somit ausgeschlossen. Die stärksten Störungen dieser Art im Bahntransport können insofern sicher der Druckmaschine zugeordnet werden, da sie über sehr lange Beobachtungszeiträume bzw. sehr vielen Rollen quasi unverändert auftreten, obwohl sich sämtliche Produktionsbedingungen stark verändern. Diese Störungen können auf Basis ihrer Drehfrequenzen direkt den verschiedenen in der Druckmaschine verbauten Walzen zugeordnet werden. Potentielle Grundursachen für die nicht ideale Rotation der

Walzen sind grundsätzliche Unwuchten oder radiale Abnutzungserscheinungen der Walzenoberfläche, die besonders bei den gummierten Gegendruckzylindern (Presseure) auftreten können. Weitere potentielle Ursachen sind Lagerschäden oder periodische Störungen im Antriebsstrang, die ebenfalls konstant periodische Störungen in die Bahn einbringen können.

Siehe auch [104, WHD-8] bzw. Tabelle 4.1 (S.80).

8.3.2.3 Kausale Argumentationskette

Eine exemplarische Beobachtung der Bahnspannung bei WT_{IPU} über einen Zeitraum von rund 3 Monaten bzw. 500 Rollen ist in Abbildung 8.39 dargestellt. Einige der konstant periodischen Frequenzen (siehe weißer Kasten) treten prinzipiell immer auf. Sie variieren lediglich in der Intensität etwas. Die waagerechten Linien (streng periodisch) sind in der Regel die am stärksten ausgeprägten Störungen pro Rolle. Durch die gewählte Fensterbreite und die Skalierung wirken sie hier deutlich weniger intensiv wie sie eigentlich sind (siehe fünf zufällige Beispiele in Abbildung 8.38).

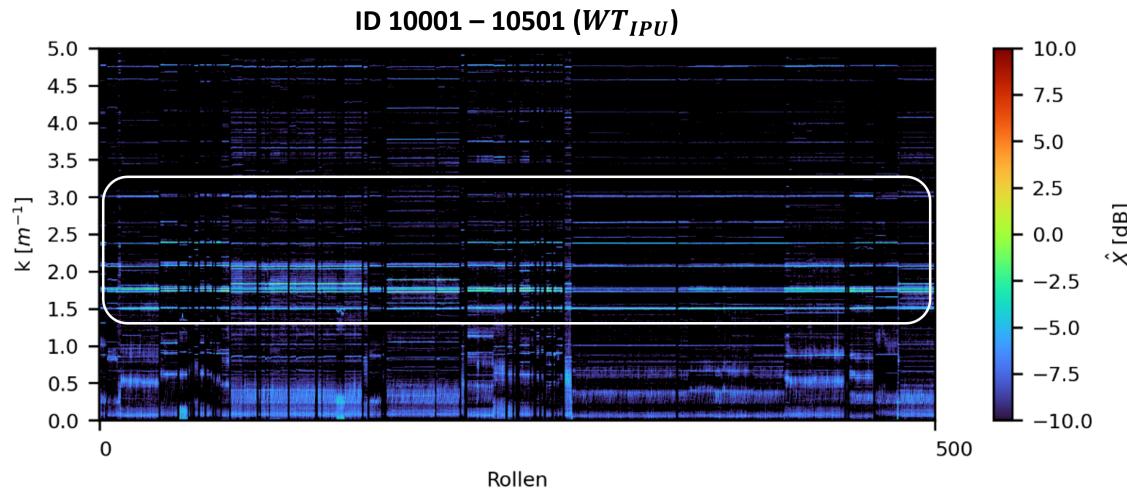


Abbildung 8.39 Beobachtung der ersten 500 aufeinander folgende Rollen im Datensatz über einen Beobachtungszeitraum von rund 3 Monaten bzgl. WT_{IPU} zeigt, dass immer wieder dieselben konstant periodischen Frequenzen mit variierender Intensität auftreten

Diese Beobachtung zeigt zunächst, dass die Störungen grundsätzlich im Druckprozess verursacht werden müssen, da sich über diese große Anzahl der Rollen und den Beobachtungszeitraum sämtliche Prozessparameter, Materialien und sonstige Randbedingungen verändern. Einzig die Druckmaschine ist dieselbe.

⇒ Die Ursache der periodischen Störungen muss in der Druckmaschine liegen.

Ein Vergleich der Bahnspannungsschwankungen bzgl. einer einzelnen Rolle entlang der Druckmaschine ist in Abbildung 8.40 dargestellt.

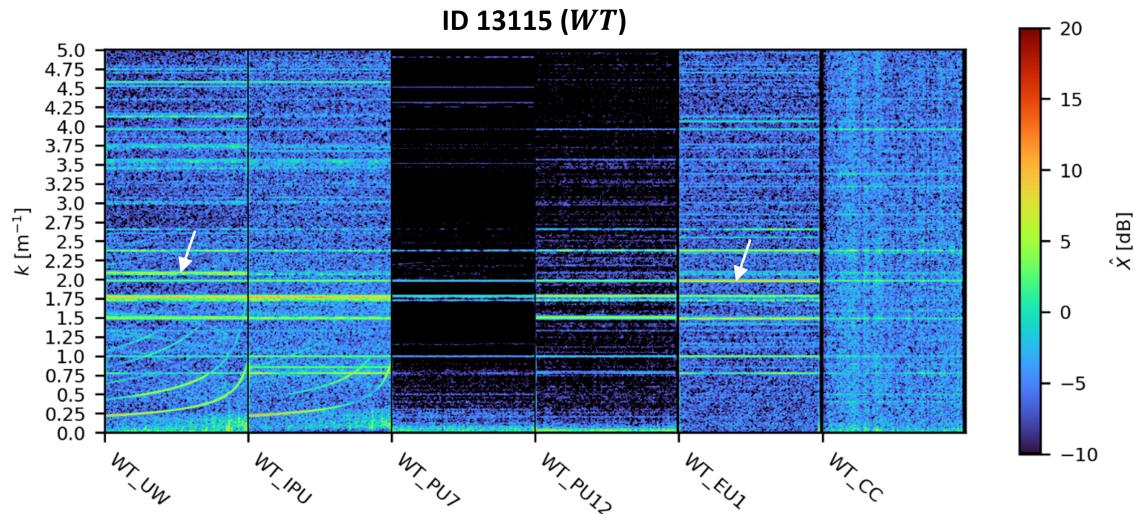


Abbildung 8.40 Bahnspannungsvariationen der exemplarischen Rolle ID 13115 entlang der Druckmaschine zeigen immer wieder dieselben konstanten Frequenzen, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und häufig als Schwebung (Periodizität der Amplitude)

Auch hier zeigen sich die konstant periodischen Linien immer wieder. Die beiden Pfeile zeigen an, dass sie entlang der Maschine mal mehr und mal weniger stark ausgeprägt sind. Da sich die Signaturen entlang der Druckmaschine nicht konsequent verstärken, kann eine materialspezifische Ursache ausgeschlossen werden. Da sie sich nicht konsequent abschwächen, kann eine initiale periodische Störung des Bahnlaufs ebenfalls ausgeschlossen werden. Jede Linie in der Abbildung muss also entlang der Druckmaschine verteilt, und individuelle Ursachen haben, die offensichtlich mal mehr oder weniger intensiv ausgeprägt sind oder sich unterschiedlich auf die Bahnspannung auswirken. Außerdem zeigen einige der Linienmuster eine Periodizität in der Amplitude. Diese Schwebungen weisen auf fast identische Störfrequenzen hin. Durch das vergleichsweise kurze Analysefenster der STFT können sie in der Frequenz nicht exakt aufgelöst werden.

⇒ Schwebungen deuten auf teilweise fast identische Störfrequenzen.

Die Tabelle 8.2 zeigt die Geometrien (Umfang U bzw. Durchmesser D) der in der konkreten Tiefdruckmaschine verbauten Walzen und die sich daraus ergebenden Ortsfrequenzen bzw. Wellenzahlen k .

Beispiel	Walze	D (m)	U (m)	λ (m)	$k (m^{-1})$
	A (Leitwalze)	0,212	0,665	0,665	1,504
	B (Tänzer, Leitwalze)	0,186	0,585	0,585	1,709
	C (Leitwalze)	0,153	0,480	0,480	2,083
	D (Leitwalze)	0,151	0,475	0,475	2,105
	E (Leitwalze)	0,150	0,470	0,470	2,128
	F (Leitwalze)	0,134	0,420	0,420	2,381
	G (Leitwalze)	0,121	0,380	0,380	2,632
	H (Leitwalze)	0,119	0,375	0,375	2,667
	I (Leitwalze)	0,105	0,330	0,330	3,030
	J (Kühlwalze)	0,168	0,528	0,528	1,894
	K (Presseur)	0,181	0,569	0,569	1,759
a)	L (Druckzylinder)	0,318	0,998	0,998	1,002
b)	L (Druckzylinder)	0,191	0,599	0,599	1,669

Tabelle 8.2 Durchmesser D , Umfang U bzw. Wellenlänge λ und davon abgeleitete Drehfrequenz als ortsbezogene Wellenzahl k der verbauten Walzen in der Tiefdruckmaschine

Für einen einfachen visuellen Abgleich der Frequenzen werden die periodischen Störungen über das Wickelmodell additiv auf eine virtuelle Bahn übertragen. Das linke Spektrogramm in Abbildung 8.41 zeigt links die überlagerten Drehfrequenzen aller in der Maschine verbauten Walzenarten. Diese werden den realen Bahnspannungsdaten der 500 aufeinanderfolgenden Rollen gegenübergestellt (rechts). Tatsächlich stimmen die meisten der besonders dominanten Linien in den Bahnspannungsdaten bei WT_{IPU} mit den Drehfrequenzen der Walzen überein. Damit ist nachgewiesen, dass die relevantesten Bahnspannungsvariationen durch nicht ideal rotierende Walzen in der Druckmaschine verursacht werden.

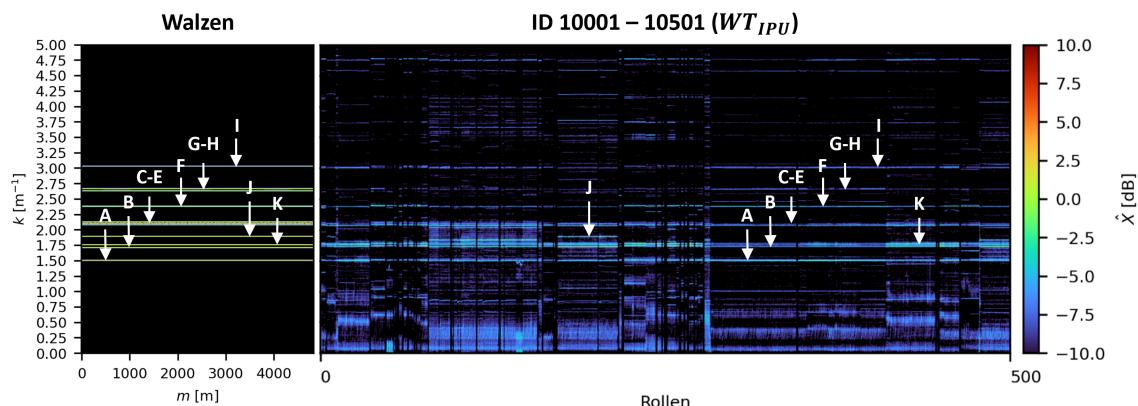


Abbildung 8.41 Abgleich der berechneten Drehfrequenzen sämtlicher in der Druckmaschine verbauten Walzen mit der Beobachtung der Bahnspannungsvariation bei WT_{IPU} über 500 Rollen

Abbildung 8.42 zeigt einen Abgleich der berechneten Drehfrequenzen mit Bahnspannungsdaten entlang der Druckmaschine bzgl. zwei exemplarischer Rollen mit unterschiedlichen Umfängen der Druckzylinder U_L (siehe a) und b) in Tabelle 8.2).

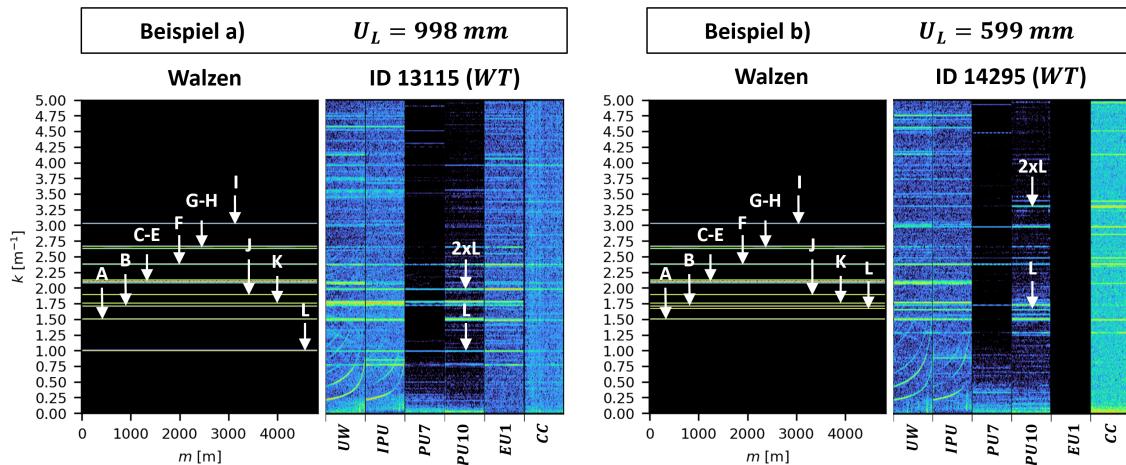


Abbildung 8.42 Abgleich der berechneten Drehfrequenzen mit Bahnspannungsdaten entlang der Druckmaschine bzgl. zwei unterschiedlicher Druckzylinderumfänge U_L

Bei dieser Gegenüberstellung wird deutlich, dass die verschiedenen Frequenzen entlang der Druckmaschine unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Nicht alle Linien treten bei allen Messwalzen auf. Das ist insofern plausibel, weil die verschiedenen Walzen entlang der Druckmaschine mehrfach verbaut sind und jede einzelne davon eigene spezifische Störung besitzen kann.

Bei gleichen Walzen liegen die Drehfrequenzen theoretisch genau übereinander. Entlang der Maschine dehnt sich die Bahn jedoch immer etwas. Die Geometrien der verbauten Walzen, außer die des Druckzylinders, bleiben aber immer dieselben. Dadurch kommt es zu dem Effekt, dass sich die auf die Bahn übertragenen Störfrequenzen entlang der Maschine proportional zur Bahndehnung minimal erhöhen. Bei einer Überlagerung dieser leicht unterschiedlichen Frequenzen kommt es dann schließlich zu den beobachteten Schwebungen (siehe 3.2.3.2 bzw. Abbildung 7.16 (S.175)).

Die Spektrallinie des Druckzylinders weist im Gegensatz zu den meisten Linien der anderen Walzen keine Schwebung auf. Das ist insofern plausibel, da bei dieser konkreten Druckmaschine mit einer Staffelung der Druckzylinderumfänge entlang der Druckmaschine gearbeitet wird, um die sukzessive Bahndehnung im Sinne des Druckbildes zu kompensieren. Die Störungen der Druckzylinder können daher je nach Phasenlage nur konstruktiv oder destruktiv interferieren. Eine Staffelung der Walzengeometrien gibt es bei den anderen Walzen nicht. Sie prägen somit in MD-Richtung leicht frequenzverschobene

rotationsperiodische Information in den Bahnlauf, wodurch die Störungen als Schwebung interferieren.

Die Presseure induzieren häufig, aber nicht immer, besonders starke periodische Störungen. Das ist plausibel, da sie sich im Laufe der Zeit aufgrund ihrer gummierten Oberfläche und den Abrollkräften im Druckspalt abnutzen. Typischerweise kommt es zu Unrundheiten, die aufgrund ihrer spezifischen Form zu einem entsprechenden Obertonspektrum führen. Außerdem kommt es im Nip zwischen Presseur und Druckzylinder über die Bahn im Walzenspalt und das Gummi der Presseure potentiell zu nichtlinearen Verzerrungen der verschiedenen Anregungsfrequenzen des Druckzylinders und des Gegendruckzylinders. Je nach Übertragungseigenschaften im Nip und Anregungsspektren entstehen potentiell ebenfalls Intermodulationsprodukte, die genauso streng periodische Strukturen aufweisen, aber eine völlig andere Frequenz besitzen. Dadurch, dass die Presseure sich stark abnutzen und unrund werden, müssen sie von Zeit zu Zeit abgeschliffen werden, bis sie irgendwann vollständig ausgetauscht werden. Die tatsächlichen Gegendruckzylinderumfänge variieren in einem Bereich von einigen Millimetern. Der angegebene Wert in Tabelle 8.2 ist lediglich ein Mittelwert und dient zur groben Orientierung.

⇒ Alle verbauten Walzengrößen können den periodischen Frequenzmustern zugeordnet werden.

Wie aus den bereits gezeigten Abbildungen hervorgeht, zeigen sich neben den Grundfrequenzen der Walzen, sehr viele weitere streng periodische Frequenzmuster in den Bahnspannungsdaten, die nicht direkt zu den Drehfrequenzen (Grundfrequenzen) der Walzen passen. Sie verteilen sich über einen sehr breiten Frequenzbereich.

Ein plausibler Erklärungsansatz, der die vielen weiteren streng periodischen Frequenzmuster begründen kann, sind diverse nichtlineare Verzerrungen zwischen den ursprünglichen dominanten Walzenstörungen, welche zu entsprechend vielfältigen Intermodulationsprodukten führen. Mindestens zwei Mechanismen werden vermutet, die zu Vermischungen der ursprünglichen Störfrequenzen führen.

- Eine gegenseitige Beeinflussung nahegelegener Walzenpaare, die rotationsperiodische Störungen aufweisen. Der jeweils dazwischenliegende Bahnzug stellt ein nichtlineares Übertragungselement dar. Außerdem ist die Übertragung der Walzenstörungen auf die Bahn selbst ebenfalls nicht zwingend linear. Potentiell nichtlineare Übertragungseffekte sind beispielsweise Schlupf oder das Trägheitsmoment der Walzen.
- Stelleingriffe durch die Registerwalzen (Kompensatoren) zwischen den Druckwerken zur MD-Registerregelung stellen aufgrund der nicht stetigen Regelungseigenschaften

ebenfalls eine potentielle Ursache für nichtlineare Verzerrungen im Bahntransport dar.

Durch die gegenseitige Beeinflussung der Störeffekte im Bahntransport ist also mit einer Addition der dominierenden rotationsperiodischen Störungen der Walzen auf die Bahn zu rechnen. Anschließend ist mit irgendeiner nichtlinearen Verzerrung durch die spezifischen Übertragungseffekte zwischen Walze und Bahn, der Bahn selbst oder durch eine überlagerte verzerrte Gegenbewegung der Registerwalzen zu rechnen.

Das resultierende Spektrum ist damit zum Einen von den spezifischen, ursächlichen Störungen der konkret aufeinanderfolgenden Walze-Bahn-Walze Kombinationen abhängig. Zum Anderen von den jeweils individuellen Übertragungseigenschaften der Übertragungselemente mit denen die Störquellen mechanisch miteinander gekoppelt sind. Einige potentielle Einflussfaktoren, die die nichtlinearen Übertragungseigenschaften (Kennlinie) beeinflussen, sind beispielsweise:

- Parametrierung und Eigenschaften der MD-Registerregelung
- Bahngeschwindigkeit
- Viskoelastisches Materialverhalten
- Temperatur
- Restfeuchtigkeit
- Anliegender Bahnzug
- Summe der anliegenden Bahnzugvariationen
- Länge des Freien Zuges
- Oberflächeneigenschaften der Walze
- Geometrie der Walze
- Masse der Walze

Viele der aufgeführten Einflussfaktoren sind entlang der Druckmaschine veränderlich. Die Variantenvielfalt der tatsächlich vorliegenden Übertragungseigenschaften an jedem spezifischen Walze-Bahn-Walze Abschnitt wird deshalb insgesamt als sehr hoch eingeschätzt. Abbildung 8.43 zeigt die Individualität jedes einzelnen Abschnittes schematisch.

Walze:	A_1	B_2	A_3
Störung:	x_{A_1}	x_{B_2}	x_{A_3}
Übertragung (Walze auf Bahn):	g_{A_1}	g_{B_2}	g_{A_2}
Bahnlänge:	$L_{B_2}^{A_1}$	$L_{A_3}^{B_2}$	
Übertragung (Viskoelastizität):	$g_{B_2}^{A_1}$	$g_{A_3}^{B_2}$	
Exemplarischer Bahnabschnitt:			

Abbildung 8.43 Schematische Darstellung der Individualität der einzelnen Walze-Bahn-Walze Abschnitte

Die Vielzahl, der aus den individuellen Walze-Bahn-Walze Abschnitten theoretisch hervorgehenden Intermodulationsprodukten, ist riesig. Bei der Beobachtungsunschärfe, durch die beschränkte Frequenzauflösung (Fensterlänge maximal 1 Rollenlänge) und den leicht variablen Grundfrequenzen, durch Bahndehnungs- und Abnutzungseffekten der Gegendruckzylinder, ist praktisch jedes waagerechte Linienmuster über eine Intermodulation der ursächlichen Walzenstörungen erklärbar.

Exemplarisch wird in Abbildung 8.44 demonstriert, dass durch einzelne addierte und anschließend nichtlinear verzerrte Walzenkombinationen¹²⁷ viele Intermodulationsprodukte entstehen. Je nach Konstellation und Übertragungsverhalten, können so einzelne hochfrequente und niederfrequente streng periodische Frequenzmuster erklärt werden. Dadurch, dass sich die Übertragungsbedingungen für jede spezifische Kombination und generell entlang der Druckmaschine ändern, sind auch die sehr individuellen Ausprägungen der Störfrequenzspektren an den einzelnen Messwalzen plausibel.

¹²⁷Es wurde wieder die prinzipielle Übertragungskennlinie von Papier $g(x)$ (siehe Abbildung 3.46 (S.71)) genutzt.

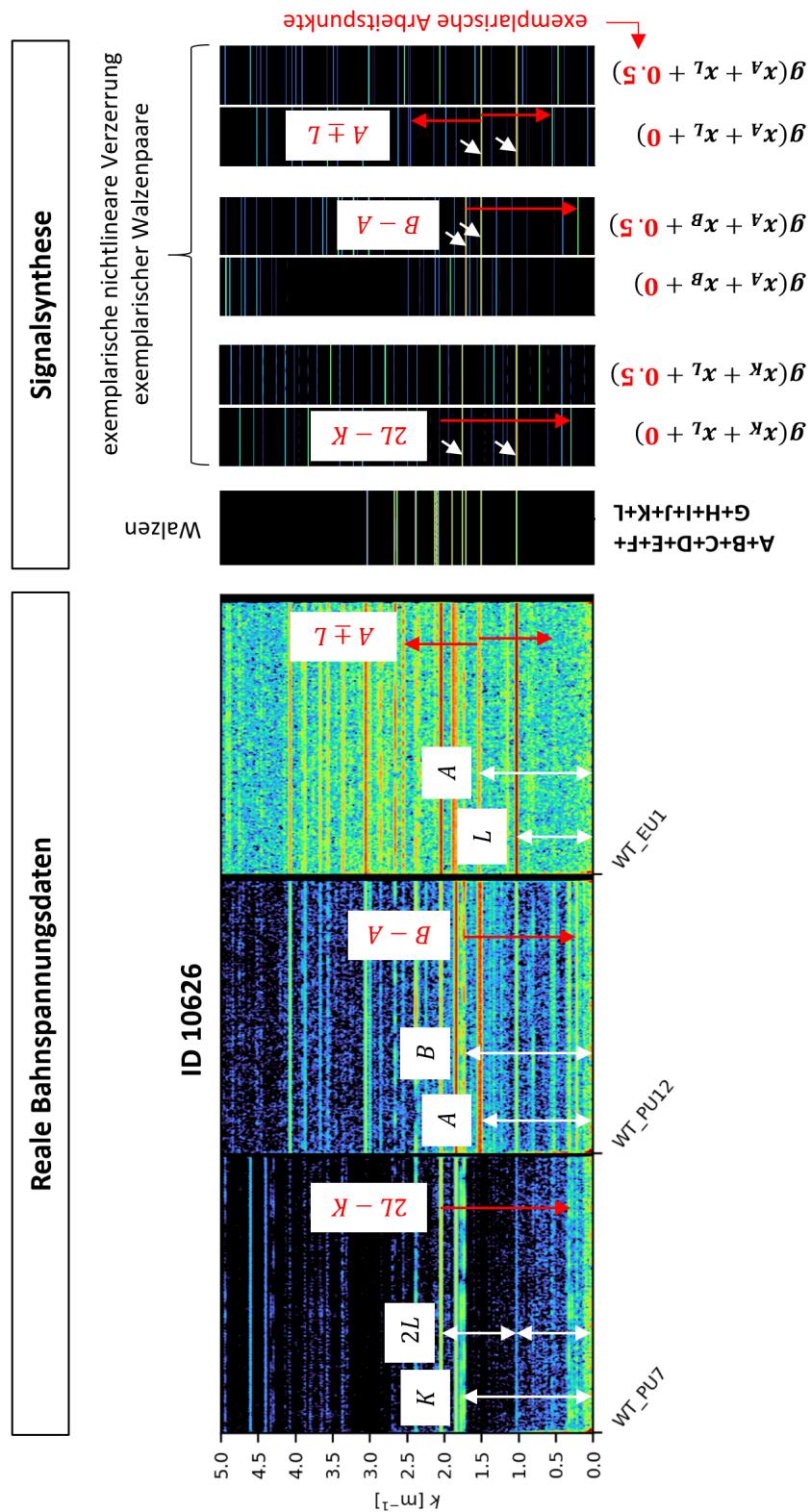


Abbildung 8.44 Zuordnung von Intermodulationsprodukten exemplarischer Walzenkombinationen bei exemplarischer nichtlinearer Verzerrung $g(x)$

Abbildung 8.45 zeigt beispielhaft, dass zwei besonders stark ausgeprägte niederfrequente periodische Störungen in der Bahnspannung bei WT_{PU7} und WT_{PU12} durch Intermodulation zweier unterschiedlicher Walzenkombinationen mit verschiedenen exemplarischen Verzerrungen (hier in rot markierte Verschiebung des Arbeitspunktes in der Kennlinie $g(x)$ realisiert) erklärt werden können.

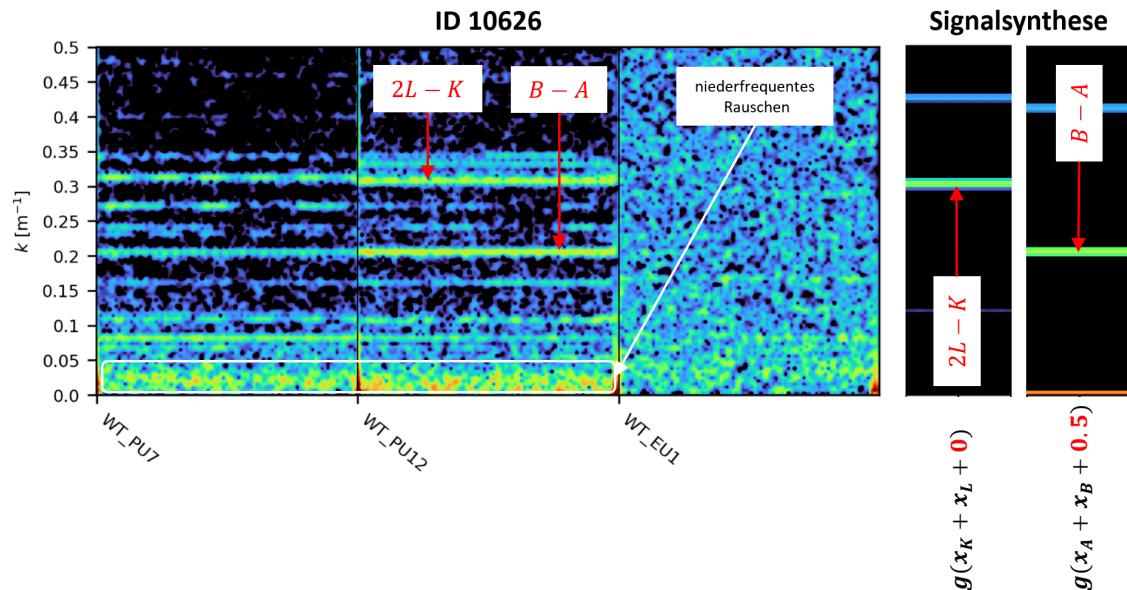


Abbildung 8.45 Demonstration der Erklärbarkeit von zwei exemplarischen und besonders stark ausgeprägten, niederfrequenten, periodisch realen Bahnspannungsschwankungen, anhand Rolle ID 10626, durch zwei unterschiedlich nichtlinear verzerrte rotationsperiodische Störungen zweier unterschiedlicher Walzenkombinationen (L und K bzw. B und A).

⇒ Als Hauptursache für die große Vielfalt der streng periodischen Frequenzstrukturen werden Intermodulationen zwischen den verschiedenen Walze-Bahn-Walze Kombinationen identifiziert.

Dadurch, dass einige der Leitwalzen mehrfach verbaut sind und durch die Bahndehnung ein minimaler Unterschied in den auf die Bahn wirkenden Störfrequenzen entsteht, sind bei nahegelegenen gleichen Leitwalzen potentiell äußerst niederfrequente Intermodulationsprodukte im Bereich $\ll 0,05/\text{m}$ möglich. Aus der Überlagerung vieler solcher niederfrequenter Intermodulationsprodukte könnte ein stochastisch anmutendes niederfrequentes Rauschen in der Bahnspannung entstehen (siehe Abbildung 8.45). Im Unterschied zu den stochastischen lateralen Bahnlaufstörungen in 8.2.2 weisen die niederfrequenten stochastischen Bahnspannungsstörungen eine völlig andere Systematik auf und sind in ihrer Ausprägung nahezu vollständig unabhängig von niederfrequenten lateralen Bahnlaufstörungen. Die Bahnspannungsschwankungen sind nicht ortsfest bzgl. der Bahn und verhalten sich

entlang der Druckmaschine nicht konsequent einheitlich, z.B. in Form einer Verstärkung oder Dämpfung. Schlussendlich kann dieser Erklärungsansatz aber aufgrund der hohen Komplexität und vielfältigen Einflussfaktoren an dieser Stelle nicht abschließend nachgewiesen werden.

⇒ **Sehr niederfrequente Intermodulationsprodukte durch fast identische Leitwalzen erklären potentiell auch das sehr niederfrequente Rauschen.**

8.4 Registerstörungen - Validierung Hypothese 3)

Die in Kapitel 6.3.2.1 formulierte **Hypothese 3)**: besagt:

Registerstörungen entstehen aus einer Kombination von Bahnlaufstörungen, deren individuellen Übertragungseigenschaften entlang der Druckmaschine und entsprechenden Kompensationsmaßnahmen durch die zentralen Regelungssysteme (Bahnlauf-, Bahnnennspannungs- und Registerregelung). Sie übertragen sich entlang der Druckmaschine dadurch grundsätzlich anders als die ursächlichen Bahnlaufstörungen. Die Orts-Frequenzsignatur von Registerstörungen stimmen jedoch in der grundlegenden Charakteristik weitgehend mit der jeweils ursächlichen Bahnlaufstörung überein.

Alle nachfolgenden Beispiele für Registerstörungen sind eine Folge von Störungen im Bahnlauf in CD oder MD und einer entsprechenden Reaktion der Bahnlauf-, Bahnnennspannungs- und/oder Registerregelung. Die nachfolgenden Informationsbeispiele dienen damit zur exemplarischen Validierung der Hypothese 3).

Eine Eingruppierung der Registerstörung in eine Ursachengruppe mit Hilfe des Demultiplexing Ansatzes (siehe 6.3.2) ist auf die Registerdaten nicht ohne weiteres anwendbar, da die Registerfehler nicht absolut sind, sondern stets eine relative Abweichung zur Referenzfarbe ausdrücken. Die Interpretationslogik des Übertragungsverhaltens der Registerstörung entlang der Druckmaschine ist daher deutlich komplexer als bei den Bahnlaufdaten (Bahnnennspannung und Bahnkanten). Eine Verstärkung einer spezifischen CD-Registerstörungen entlang der Druckmaschine im Spektrogramm kann sowohl von einer tatsächlichen Verstärkung, als auch von einer Abschwächung einer zugrundeliegenden lateralen Bahnlaufstörung stammen. Die Registerstörungen können zum mindesten direkt über ihre spezifischen Orts-Frequenzsignaturen den bereits bekannten Bahnlaufstörungen zugeordnet werden. Bei Übereinstimmung der Orts-Frequenzsignaturen kann mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die Störungen dieselbe Grundursache besitzen. Auf diese

Weise können Registerschwankungen über die bereits im Detail diskutierten Bahnlaufstörungen im Ergebnis konkreten Grundursachen innerhalb der Wertschöpfungskette kausal zugeordnet werden.

Als einleitende Übersicht werden in Abbildung 8.46 sämtliche Registerdaten bzgl. CD und MD von fünf Rollen aus der Fallstudie gezeigt, welche die typischen Strukturen der relevantesten Registerstörungen in der gesamten Fallstudie veranschaulichen. Die Ortsfrequenzsignaturen und auch ihre systematischen Veränderungen entlang der Druckmaschine stehen also prototypisch für den Großteil aller Rollen, die diese Störungen beinhalten. Sie werden nachfolgend bzgl. CD und MD im Detail diskutiert und den Ursachen im Bahnlauf und ihren jeweiligen Grundursachen im Gesamtprozess zugeordnet.

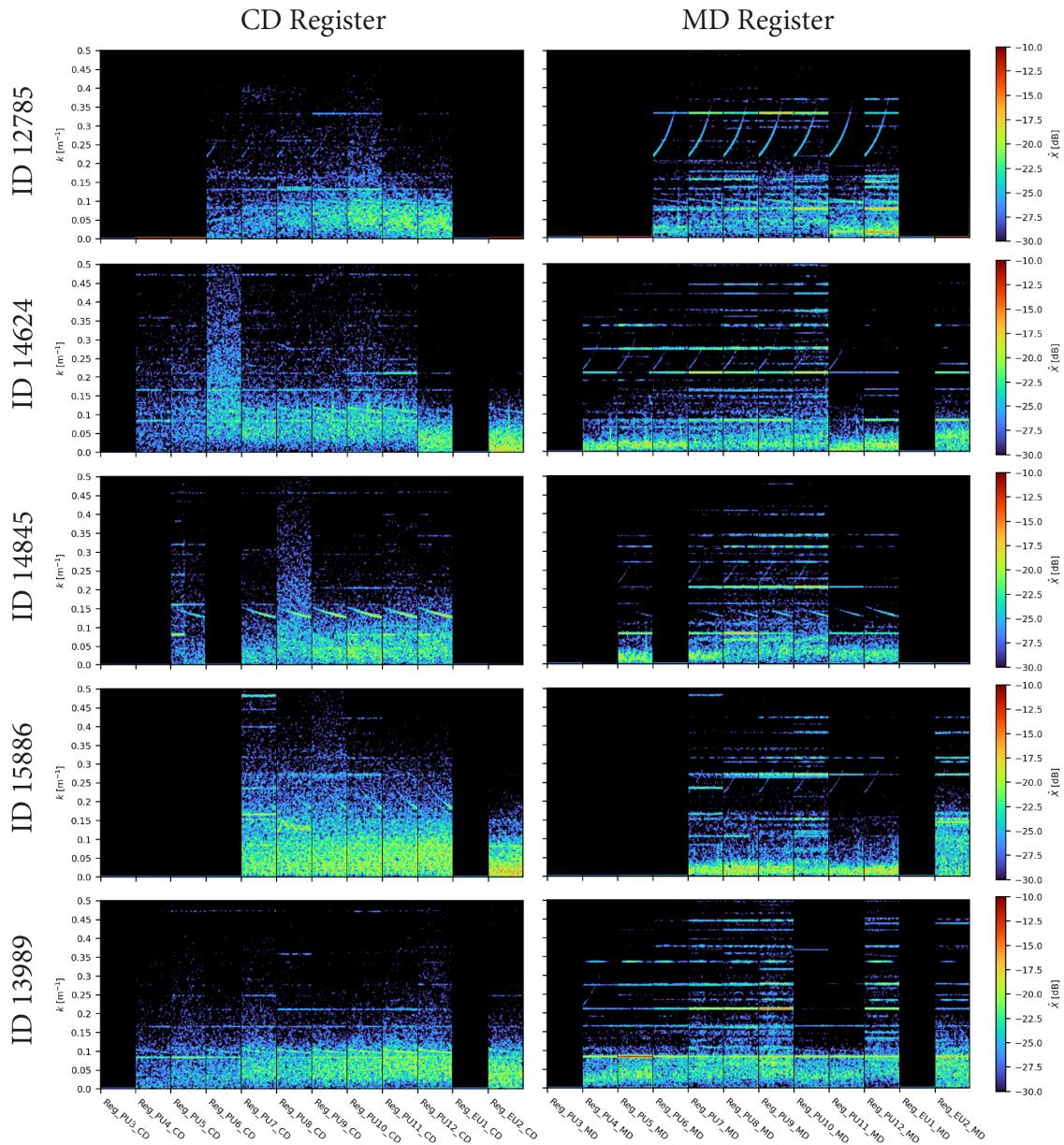


Abbildung 8.46 Prototypische Rollen, welche die typische Charakteristik der relevantesten CD- und MD-Registerstörungen veranschaulichen

8.4.1 CD-Registerstörungen

8.4.1.1 Zusammenhang zwischen Bahnkantenstörungen und CD-Registerstörungen

Drei der in Kapitel 8.1 aufgeführten Bahnkantenstörungen wirken sich beispielsweise nicht auf die Registerqualität aus. Das sind Kanteneffekte durch Vibrationen der Fertigrolle im Walzenbett (siehe 8.1.1), die besonders stark ausgeprägten Bahnkantenstörungen durch

vibrierende Messer (siehe 8.1.4) und die niederfrequenten V-förmigen Intermodulationsprodukte durch eine nicht ideal rotierende Tragwalze im Maschinenroller (siehe 8.1.3).

Bahnkantenstörungen wirken sich grundsätzlich nur bei einer Intervention der seitlichen Bahnlaufrégelung (WGS) auf den lateralen Bahnlauf aus und sind erst dann potentiell relevant für das CD-Register.

Nicht immer lenkt die WGS die Bahn im Sinne einer geraden Kante seitlich aus. Die Reaktion der WGS ist im Einzelfall von der Frequenz, der Intensität der kumulierten Kantenstörung, der referenzierten Kante (OS oder DS) und von der Parametrierung abhängig. Im Datensatz liegen keine detaillierten Informationen bzgl. der WGS Parametrierung vor. Genaue Aussagen bzgl. der Systematik der CD-Registerstörungen entlang der Druckmaschine sind aus diesem Grund nicht möglich. Der grundlegende Zusammenhang zwischen Bahnkantenstörung und CD-Registerstörung wird jedoch nachfolgend skizziert.

In der Regel sind die aufgezählten, nicht im CD-Register auftretenden Kantenstörungen wohl einfach zu schwach ausgeprägt, sodass die WGS aufgrund der Totzone¹²⁸ nicht auf diese reagiert und daher auch keine entsprechende seitliche Gegenbewegung generiert. Im Falle der Messerstörungen sind diese außerdem besonders hochfrequent. Die Bahnkantenmessdaten der WGS werden intern Tiefpass gefiltert, wodurch diese Anteile ignoriert werden, unabhängig von ihrer Ausprägungsstärke.

Im Falle einer Reaktion der WGS auf eine Bahnkantenstörung, erzeugt diese eine temporäre seitliche Bahnlaufstörung mit dem Ziel einer geraden Bahnkante mit einer entsprechenden Orts-Frequenzsignatur. Abbildung 8.47 zeigt den schematischen Zusammenhang zwischen einer parallel verlaufenden Bahnkantenstörung und einer durch die WGS induzierten lateralen Bahnlaufstörung entlang der Druckmaschine.

¹²⁸Die effektive Totzone der WGS wurde experimentell ermittelt, siehe A.2

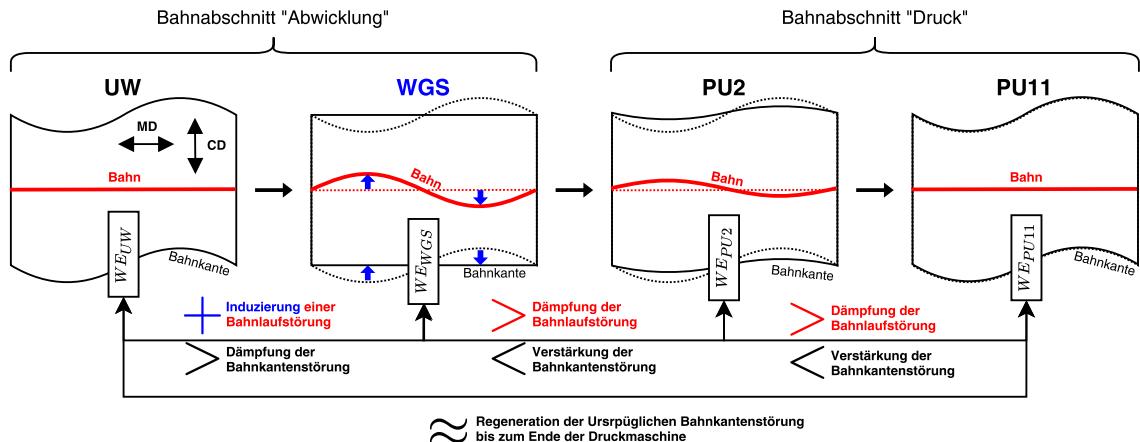


Abbildung 8.47 Schematischer Zusammenhang zwischen Bahnkantenstörung und lateraler Bahnlauftörung bei einer Reaktion durch die WGS

Die CD-Registerstörungen basieren am Ende also auch auf dem komplexen Zusammenspiel aus der schwankenden Bahn, der spezifischen Dämpfung der extern induzierten lateralen Bahnlauftörung entlang der Druckmaschine, der jeweiligen Register-Referenzierung und dem individuellen Registerregelungserfolg, der neben dem eingehenden kumulierten Registerfehlern, insbesondere von der Parametrierung und dem Regler selbst abhängig ist. Zur WGS und zur Registerregelung wurden in der Studie keine Daten erhoben, wodurch genauere Aussagen zur Systematik der Registerstörungen nicht möglich sind.

8.4.1.2 Inhomogenität der Materialeigenschaften

Inhomogene Materialeigenschaften bzgl. CD und MD führen in dieser Fallstudie zu niederfrequenten stochastischen lateralen Bahnlauftschwankungen, die zur Bahn ortsfest sind und in der Struktur nahezu identisch (\cong) bleiben und sich dabei entlang der Maschine konsequent verstärken (<) (siehe 8.2.2). Einen exemplarischen Vergleich von Bahnkantendaten mit den CD-Registerdaten mit einer besonders starken Störung dieser Art zeigt Abbildung 8.48.

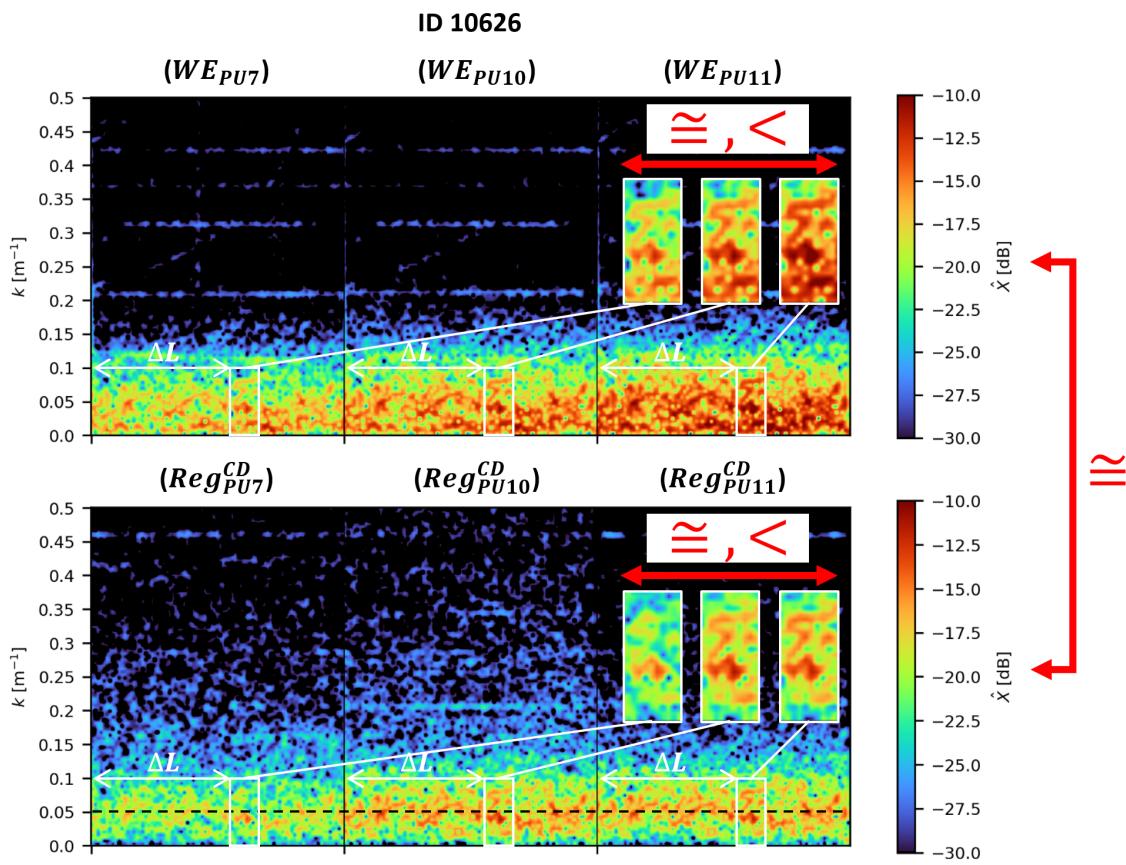


Abbildung 8.48 Abgleich von CD-Registerdaten entlang der Maschine mit Bahnkantendaten am Beispiel der Rolle ID 10626

Die Störung ist im CD-Register in der Amplitude insgesamt leicht abgeschwächt und wird durch die CD-Registerregelung offensichtlich im Frequenzbereich $< 0,05/\text{m}$ besonders erfolgreich ausgeregelt. Der Amplitudenpeak (schwarze gestrichelte Linie) liegt bei diesem Beispiel bei $\approx 0,05/\text{m}$. Dies ist bei den meisten anderen Rollen sehr ähnlich. In diesem Frequenzbereich gibt es also offensichtlich das größte Optimierungspotential, sowohl seitens der Ursache als auch hinsichtlich der Registerregelung.

Grundsätzlich beweist die große Übereinstimmung (\cong) hinsichtlich der Orts-Frequenz Struktur und der systematischen Verstärkung entlang der Druckmaschine ($<$), dass diese Art der CD-Registerstörung durch die bereits bekannte laterale Bahnlaufstörung hervorgerufen wird, welche inhomogenen Materialeigenschaften zuzuordnen ist. Ein kausaler Zusammenhang dieser spezifischen CD-Registerstörung mit der eigentlichen Grundursache in der Wertschöpfungskette ist somit gegeben. Die Ursache liegt im Papierherstellungsprozess und dort mit großer Wahrscheinlichkeit im Bereich der Headbox und/oder der Siebpartie, die maßgeblich für die Faserorientierung und das spezifische CD-Profil sowie die Materialhomogenität in MD verantwortlich sind.

8.4.1.3 Splice in Fertigrolle

Eine weitere materialinduzierte Bahnlaufstörung, die man ebenfalls als systematische CD-Registerschwankung wiederfindet, ist die des Splices innerhalb der Fertigrolle (siehe 8.2.1). Abbildung 8.49 zeigt die CD-Registerdaten von Rolle ID 16920, die einen impulsartigen Wechsel in den Materialeigenschaften durch einen Splice innerhalb der Fertigrolle beinhaltet. Auch in diesem Fall zeigt sich die charakteristische Verstärkung der CD-Störung entlang der Druckmaschine, welche genauso bereits in den Bahnkantenmessdaten beobachtet werden konnte (siehe Abbildung 8.21 (S.204)).

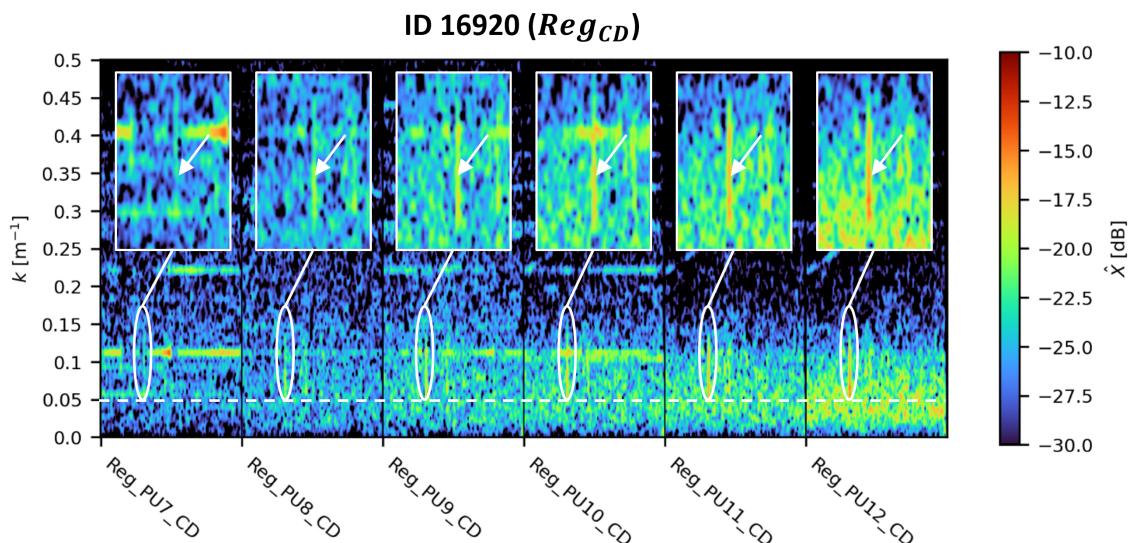


Abbildung 8.49 Sukzessive Verstärkung einer impulsartigen CD-Registerstörung aufgrund eines Splices innerhalb der Fertigrolle

Auch bei diesem Beispiel scheint die Registerregelung nur die sehr langwelligen Schwanungen mit einer Wellenlänge von $\lambda > 20 \text{ m}$ ($k < 0,05/\text{m}$) erfolgreich auszuregeln.

8.4.1.4 Deformierte Mutterrolle

Eine andere typische CD-Registerstörung hat die Form einer konvex abfallenden Frequenzlinie, die in derselben Form auch als Bahnkantenstörung beobachtet werden kann und einer deformierten Mutterrolle zugeordnet wird (siehe 8.1.2). Interessant ist, dass sich die Störung ausschließlich bei solchen Rollen auf das CD-Register auswirkt, bei denen die ursächliche Bahnkantenstörung besonders stark ausgeprägt ist und auf eine entsprechend starke Deformation hindeutet. Das ist insofern plausibel, da eine reine Bahnkantenstörung sich niemals direkt auf das Register auswirken würde. Es bedarf immer einer Bahnlaufstörung,

die in diesem Fall durch die bereits bekannte Bahnkantenstörung getriggert und durch die WGS induziert wird und zusätzlich wahrscheinlich durch eine gleichartige Materialstörung verursacht wird. Abbildung 8.50 zeigt die CD-Registerdaten einer Rolle mit einer entsprechenden Störung, die zur Drehfrequenz der Mutterrolle im Abwickler des Maschinenrollers passt.

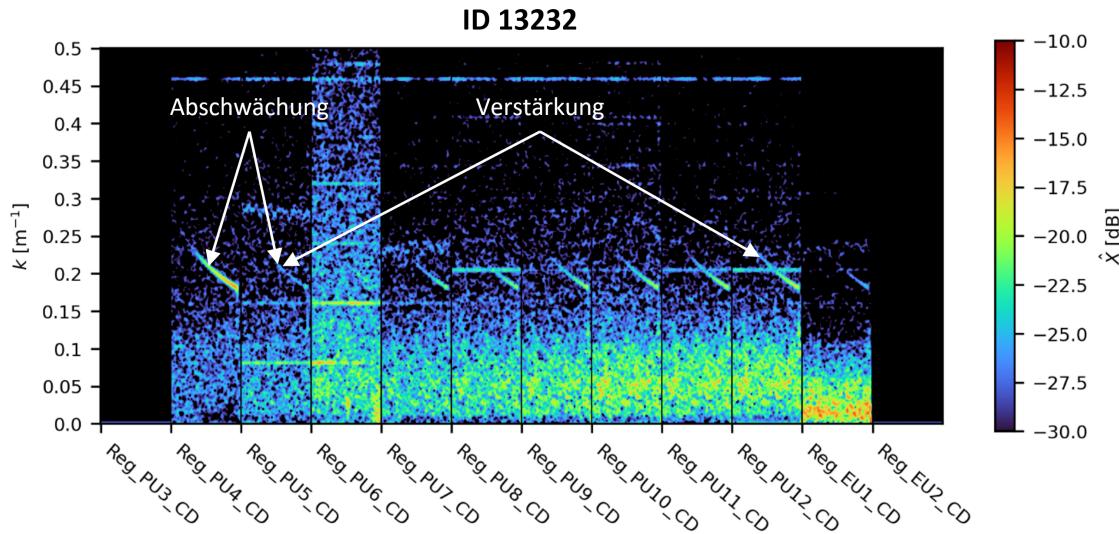


Abbildung 8.50 Komplexe Systematik entlang der Druckmaschine einer durch eine Mutterrollendeformation verursachten CD-Registerstörung

Wie auch in diesem Beispiel beobachtet werden kann, tritt dieser CD-Registerfehler mit einer komplexen Systematik in seiner linearen Verzerrung entlang der Druckmaschine auf. Der Effekt ist im ersten messenden Druckwerk besonders stark ausgeprägt. Bis zum nächsten Druckwerk schwächt er sich dann deutlich ab, um sich danach sukzessive bis zum letzten Druckwerk wieder deutlich zu verstärken. Das Register beim Prägewerk (*EU1*) sei an dieser Stelle durch eine vollständig andere Parametrierung vernachlässigt.

Abweichend zu den regulären Beobachtungen in 8.1.2 verstärken sich bei solchen Rollen, bei dem sich der Effekt als CD-Registerstörung zeigt, auch die Bahnkantenstörung entlang der Druckmaschine. Es wird vermutet, dass bei besonders starker Mutterrollendeformationen in der Papierfabrik neben den typischen Bahnkantenstörungen zusätzlich auch eine entsprechend periodische Veränderung der Materialeigenschaften stattgefunden hat.

Die verschiedenen Effekte (Bahnkantenstörung, WGS begründete Bahnlaufstörung und materialbedingte Bahnlaufstörung) können sich also in den Messdaten der Bahnkantensensoren überlagern. Folgende Aspekte, können die komplexe Systematik in der Intensität der CD-Registerstörungen entlang der Druckmaschine erklären:

- Eine gekrümmte Bahn, die zu lateraler Seitenbewegung in Richtung der längeren Bahnkante führt, siehe z.B. [96] (S.93))
- Eine WGS induzierte Bahnlaufstörung aufgrund einer besonders stark ausgeprägten Bahnkantenstörung sollte sich, mit Verweis auf die Hypothese 2 b), sehr früh hinter der WGS von selbst wieder beruhigen. Bei einer Referenzierung des CD-Registers auf ein frühes Druckwerk (z.B. PU3) entstünde durch die von der WGS induzierten lateralen Bahnlaufstörung ein CD-Registerfehler in entsprechender Größe und Orts-Frequenzsignatur. Eine solche Systematik könnte die starke Intensität des Effektes bei PU4 erklären.
- In allen beobachteten Fällen, bei denen diese Störung im CD-Register auftreten, verstärkt sich der Effekt bis zum letzten Druckwerk. Diese Systematik deutet grundsätzlich auf eine interne Materialstörung hin. In allen Fällen treten die Verstärkungen auch in den Bahnkantenmessungen auf und stimmen damit erst einmal nicht mit den regulären Beobachtungen in 8.1.2 überein. Jedoch ist es möglich, dass sich in diesen besonders extremen Fällen, beide Effekte¹²⁹ überlagern, wodurch sie sich bei gleicher Phasenlage entlang der Druckmaschine verstärken. Eine solche Systematik erklärt die konsequente Verstärkung der CD-Registerfehler (insbesondere bei späten Druckwerken) entlang der Druckmaschine.
- Die konsequent ansteigende Verstärkung bis PU12 ist wohl nicht durch die reine Abschwächung einer durch die WGS induzierten lateralen Bahnlaufstörung erklärbar, da diese bereits viel früher vollständig abgeklungen sein müsste¹³⁰. Dadurch entstünde ein konstant bleibender Registerfehler bei identischer CD-Registerreferenzierung auf ein frühes Druckwerk (vgl. 8.55).

Die komplexe Systematik kann schließlich aufgrund fehlender Informationen bzgl. der Regelungssysteme nicht vollständig erklärt werden. Sicher ist aber, dass die Grundursache dieser Art der CD-Registerstörung aus einer Deformation der Mutterrolle beim Papierhersteller stammen muss, da die charakteristische Orts-Frequenzsignatur keine andere Grundursache zulässt. Dieser Art von CD-Registerstörung kann damit in jedem Falle durch eine Reduzierung der Mutterrollendeformation effektiv entgegengewirkt werden. Beispielsweise durch eine schonendere Zwischenlagerung.

¹²⁹Materialstörung durch Mutterrollenlagerung und/oder -deformation und Bahnkantenstörung durch nicht ideale Abwicklung der deformierten Mutterrolle in der Fertigrollenwicklung

¹³⁰siehe Hypothese 2 b)

8.4.2 MD-Registerstörungen

8.4.2.1 Nicht ideale Walzen in der Druckmaschine

Nicht ideal rotierende Walzen führen im Bahntransport und damit auch in der Bahnspannung zu niederfrequenten Intermodulationsprodukten mit einer streng periodischen Orts-Frequenzsignatur (siehe 8.3.2). Einen beispielhaften Vergleich von Bahnspannungsdaten mit den MD-Registerdaten, die entsprechende Störungen enthalten, zeigt Abbildung 8.51.

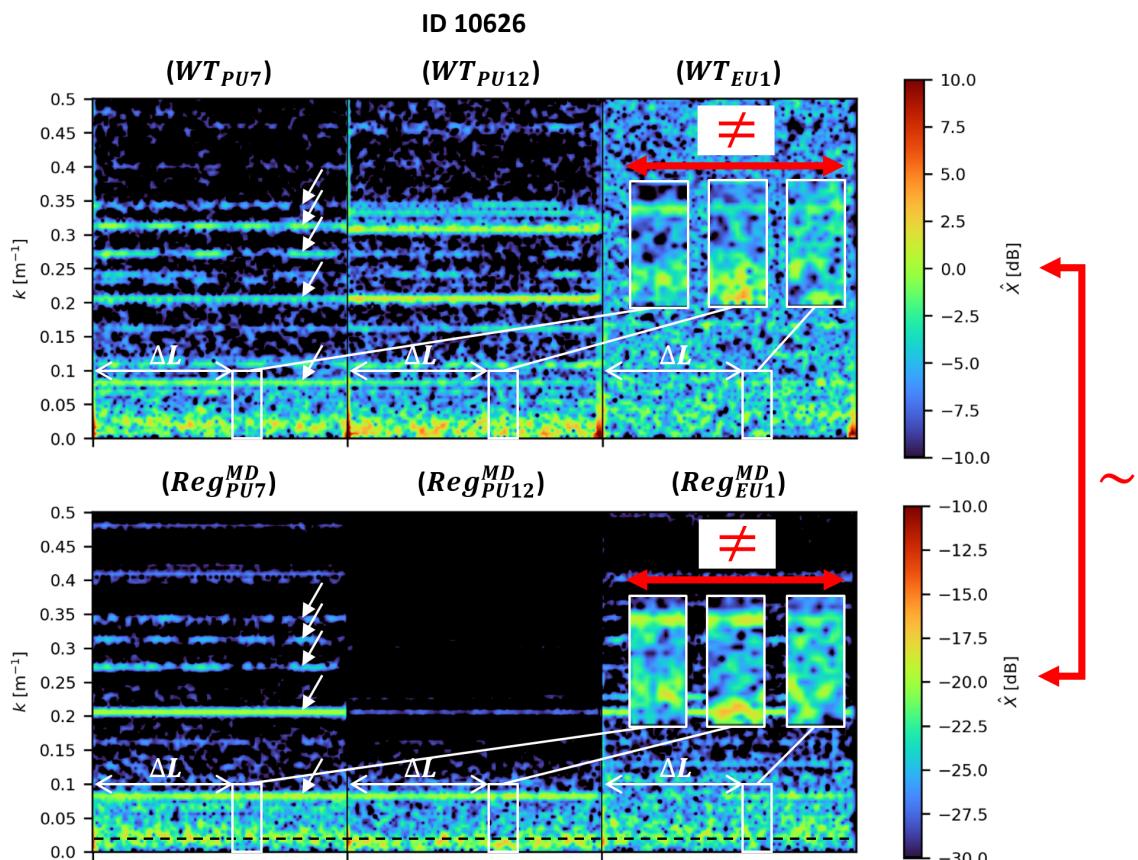


Abbildung 8.51 Abgleich von MD-Registerdaten entlang der Maschine mit Bahnspannungsdaten am Beispiel der Rolle ID 10626

Der Vergleich zeigt, dass die periodischen MD-Registerstörungen in diesem Fall fast vollständig durch die Bahnspannungsvariationen erklärt werden können. Die Spektrogramme ähneln (\sim) sich bzgl. dieser Strukturen grundsätzlich. Die Ähnlichkeit beweist, dass dieselbe Grundursache für diese Art von Störung verantwortlich sein muss.

Auch die stochastisch anmutenden Anteile im sehr niederfrequenten Bereich bei $k \approx 0,02/\text{m}$ ähneln einander. Sie sind aber bei weitem nicht so identisch in der Struktur wie es bei den stochastischen CD-Registerstörungen und den Bahnkantendaten in Abbildung 8.48 der Fall ist. Entlang der Druckmaschine verändern sich die MD-Registerstörungen. So ist es auch bei den Bahnspannungsdaten (\neq).

Nur im Frequenzbereich $k < 0,01/\text{m}$ ($\lambda > 100 \text{ m}$) werden MD-Registerabweichungen offensichtlich effektiv ausgeregelt. Abbildung 8.52 verdeutlicht dies in einer Gegenüberstellung von WT_{PU7} und Reg_{PU7}^{MD} Daten in einer Detailansicht des niedrigen Frequenzbereichs ($k < 0,1/\text{m}$). Die Registerregelung in MD ist damit also nochmal deutlich träger, als die in CD.

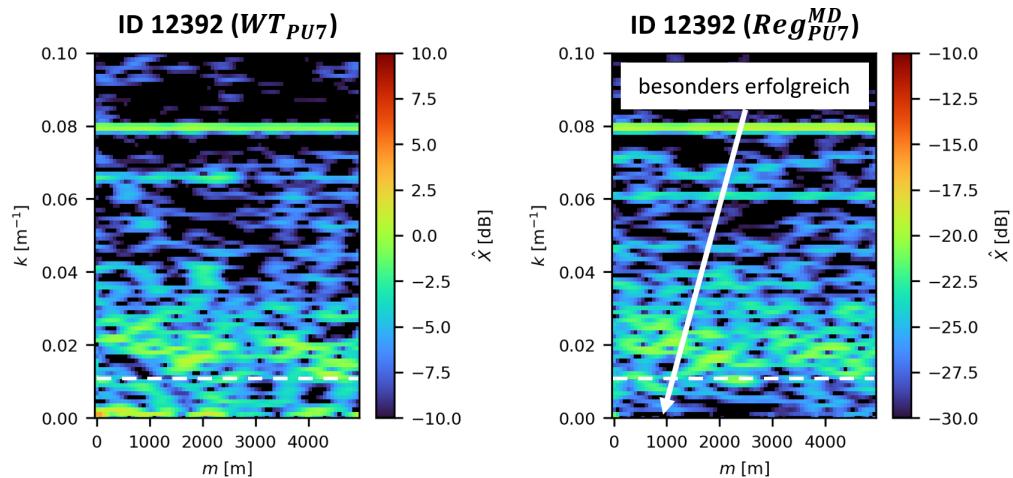


Abbildung 8.52 Signifikanter Regelerfolg der MD-Registerregelung nur im Frequenzbereich $k < 0,01/\text{m}$ beobachtbar

⇒ **MD-Registerregelung ist offensichtlich nur für Bahnlaufstörungen bis $\lambda > 100 \text{ m}$ effektiv.**

Nicht alle periodischen MD-Registerstörungen können bei allen Rollen auf diese Weise direkt auf die niederfrequenten Bahnspannungsschwankungen zurückgeführt werden. Bei einigen Rollen kommt es vor, dass einige der niederfrequenten periodischen MD-Registerstörungen in den vergleichsweise hochfrequent abgetasteten Bahnspannungsdaten im niederen Frequenzbereich bis $0,5/\text{m}$ gar nicht auftreten. In diesen Fällen ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass es sich bei den Registerstörungen um Alias-Frequenzen (siehe S.50) aus einem höheren Frequenzbereich handelt. Abbildung 8.53 zeigt dazu einen Vergleich von unterabgetasteten MD-Registerdaten mit $f_s = 1/RL$ und unterschiedlich häufig abgetasteten Bahnspannungsdaten bei einem Druckauftrag mit einer Rapportlänge von $RL = 0,998 \text{ m}$.

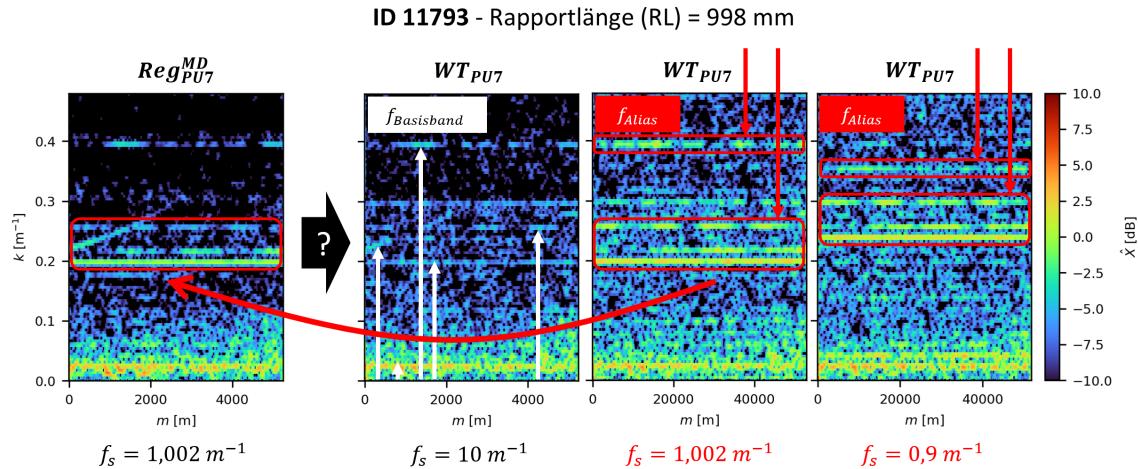


Abbildung 8.53 Abgleich der unterabgetasteten MD-Passerabweichung ($f_s = 1/RL$), mit hochfrequent abgetasteten ($f_s = 10/\text{m}$) und identisch unterabgetasteten ($f_s = 1,002/\text{m}$) Bahnspannungsdaten sowie einer davon leicht abweichenden Abtastung ($f_s = 0,9/\text{m}$) am Beispiel der Rolle ID 11793

Einige der Registerstörungen können auf direktem Wege über niedrfrequente Bahnspannungsstörungen erklärt werden, die sich definitiv im Basisband der Bahnspannungsdaten befinden (weiße Pfeile). Die besonders stark ausgeprägten periodischen Registerschwankungen (roter Kasten) liegen teilweise entweder überhaupt nicht im Basisband der Bahnspannungsdaten vor oder nicht in einer plausiblen Intensität. Bei identischer Unterabtastung der Bahnspannung analog zur Registermessung ($f_s = 1/RL$) erscheinen jedoch in der Struktur identische Liniemuster, bei exakt derselben Frequenz wie in den Registerdaten. Als Beweis, dass es sich in diesem Falle um Alias-Frequenzen handelt, die aus unterschiedlichen hochfrequenten Frequenzbereichen stammen, wurde eine weitere leicht abweichende Abtastung mit $f_s = 0,9/\text{m}$ vorgenommen (ganz rechts). Die Alias-Frequenzen verschieben sich je nach Lage des Spektrums (Regellage oder Kehrlage) einmal nach oben und einmal nach unten.¹³¹

Für die Registerregelung sind diese Alias Frequenzen besonders problematisch, da sie eine niedrfrequente MD-Bahnbewegung suggerieren, die als solche in der Realität gar nicht vorliegt. Liegt die Alias Frequenz in einem Frequenzbereich und in einer Intensität vor, für die die Registerregelung empfindlich ist ($k < 0,01/\text{m}$), kann es potentiell zu dem Phänomen kommen, dass die Alias Störung ausgeregelt wird und nicht die eigentliche, hochfrequente Störung. Selbst bei einem vollständigen Regelerfolg der Alias Frequenz würde sie lediglich eine reale niedrfrequente Passerabweichung induzieren, die vorher gar nicht existierte,

¹³¹Dies weist daraufhin, dass die tatsächlichen Frequenzen oberhalb und unterhalb der jeweils nächstgelegenen ganzzahligen Vielfachen der Abtastfrequenz liegen, und somit aus völlig anderen Frequenzbereichen stammen.

anstatt der hochfrequenten Störung entgegenzuwirken. Theoretisch kommt es dabei zu einer doppelt so großen Passerabweichung, als wenn die Regelung diese ignorieren würde. Abbildung 8.54 zeigt dieses Phänomen an einem einfachen Beispielsignal als Zeitreihe. Da es sich sowohl um Grundfrequenzen als auch um Intermodulationsprodukte handeln kann und letztere nicht nur von den ursächlichen Störfrequenzen (Walze) abhängen, sondern sehr stark auch von den konkreten nichtlinearen Übertragungseigenschaften des Systems, ist eine Vorhersage wann und warum eine solche Störung in einem kritischen Frequenzbereich auftritt, stark von vielen anderen Maschinen- und Materialparametern abhängig. Und das obwohl typischerweise dieselben Walzen mit denselben Störungen vorliegen.

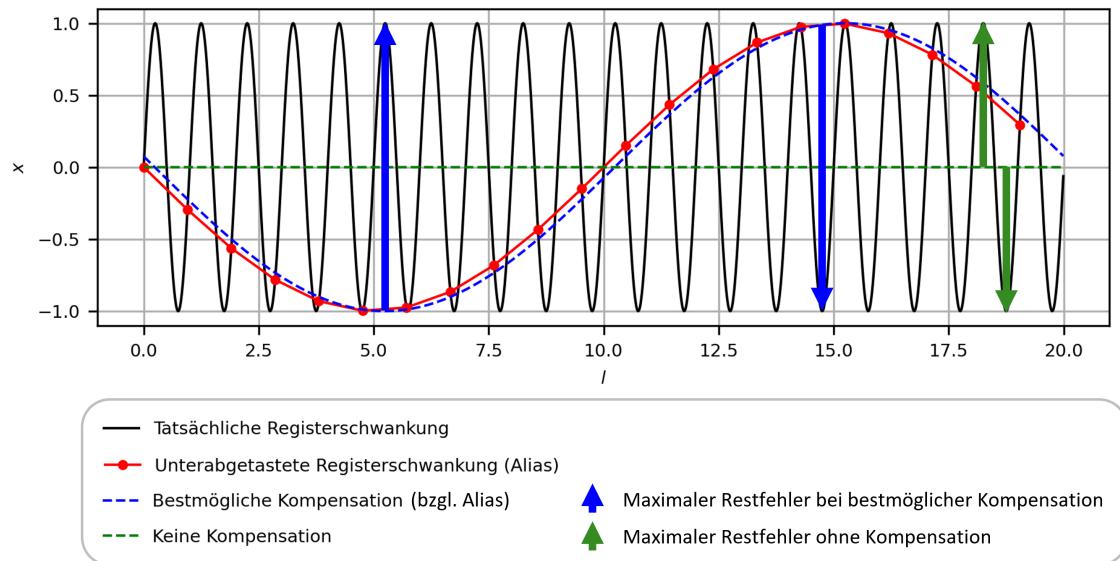


Abbildung 8.54 Schema einer hochfrequenten Registerstörung (schwarz), welche durch eine Unterabtastung zu einer Alias Registerstörung führt (rot), die selbst bei bestmöglicher Kompensation der Regelung nicht effektiv ausgeregelt werden kann (blau) sondern im Vergleich zu einer unterdrückten Kompensation (grün) sogar zu doppelt so großen Passerabweichungen führt

Derselbe Effekt ist ebenso für CD-Registerstörungen möglich. Um die vielfältigen periodischen Störungen auszuregeln, bedarf es zum einen einer deutlich häufigeren Abtastung der Registerabweichungen und zum anderen einer schnelleren Regelung. Beide Maßnahmen sind aus unterschiedlichsten Gründen nicht einfach umsetzbar. Ein Beispiel ist der erhöhte Platzbedarf für mehr Registermarken pro Rapport auf dem Druckzyylinder, der ggf. eine andere Aufteilung der Nutzen erfordert. Oder ein potentielles Übersteuern, bei einer zu progressiven Parametrierung der Registerregelung.

⇒ **Hochfrequente Bahnlaufstörungen können durch die niedelfre-
quente Abtastung des Registers ($1/\text{Rapport}$) aufgrund der aufge-**

druckten Registermarken zu problematischen Alias-Effekten in der Registerregelung führen, die neue niederfrequente Passerschwankungen induzieren.

8.4.2.2 Nicht ideale Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine

Eine sehr häufig auftretende MD-Registerstörung ist die einer konvex ansteigenden Frequenzlinie, die bzgl. der Orts-Frequenzsignatur zu einer nicht idealen Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine passt (siehe 8.3.1). In der Regel ist die Störung nur im zweiten druckenden Druckwerk nachweisbar. In einigen Fällen setzt sich die Störung jedoch mit exakt gleicher Amplitude über mehrere Druckwerke fort und verschwindet dann abrupt wieder. Abbildung 8.55 zeigt die MD-Registerdaten entlang der Druckmaschine für eine exemplarische Rolle.

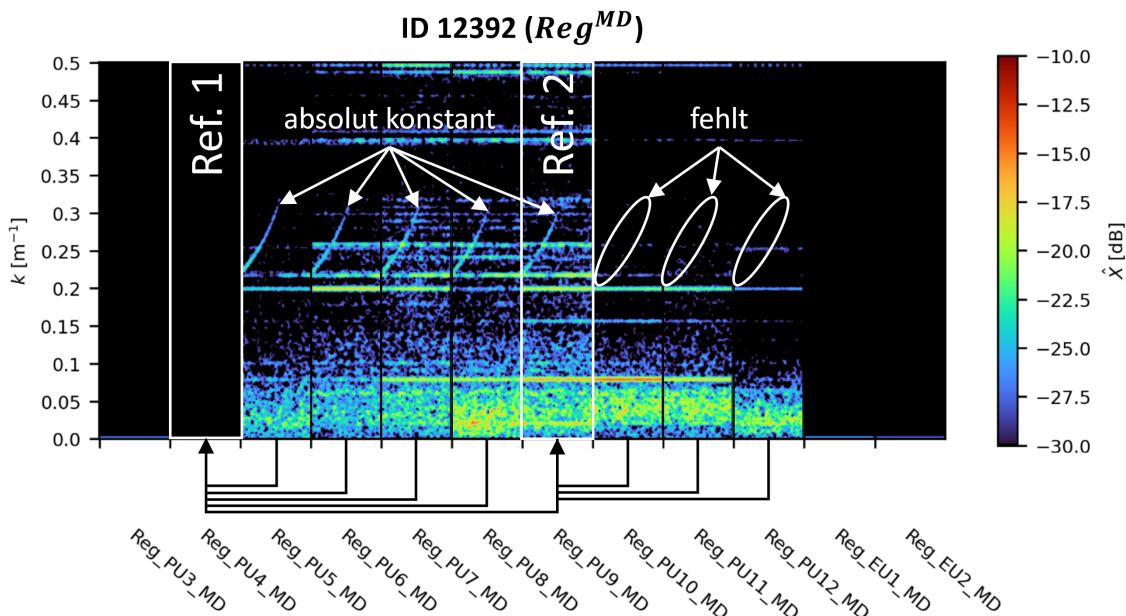


Abbildung 8.55 Typische MD-Registerstörung, die aus der Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine stammt und je nach Druckwerkreferenzierung konstant bleibt oder vollständig verschwindet

Dadurch, dass die ursächliche Störung nach Hypothese 2 b) initial und von außen auf den Bahnlauf wirkt, dämpft sie sich entlang der Druckmaschine sehr stark. Auch wenn Bahnlauf- oder Bahnspannungsregelung involviert sind. Bleibt nach den Regelsystemen im Bahnabschnitt „Abwicklung“ eine Restschwankung bis zum ersten druckenden Druckwerk im Bahnlauf erhalten, wird die erste Registermarke auf einer in diesem Rhythmus schwankenden Bahn aufgedruckt. Die Referenz schwankt also. Wenn sich die Bahn nun bis zum

nächsten Druckwerk weiter beruhigt hat, muss die Regelung der schwankenden Referenz folgen. Nur wenn der Effekt nicht ausgeregelt wird entsteht also eine Passerabweichung. Für alle nachfolgenden Druckwerke, die auf dasselbe Druckwerk (hier PU4) referenzieren, entsteht derselbe Fehler. Bei einer Referenzierung auf ein späteres Druckwerk als PU3 (hier beispielsweise PU9), verschwindet der Fehler dann vollständig, weil die initiale Störung bis dort vollständig gedämpft ist. Die an diesem Beispiel aufgezeigte Systematik zeigt sich in fast allen Fällen, bei denen diese Art der MD-Registerstörung auftritt. Die Systematik ist nur dann plausibel, wenn auf diese Störung durch die MD-Registerregelung nicht reagiert wird. Ansonsten käme es mit großer Wahrscheinlichkeit zu Abweichungen in der Amplitude der Störung (hier zwischen PU5 und PU9). Außerdem würde die Referenz bei PU9 dann ebenfalls schwanken, wodurch es auch in nachfolgenden Druckwerken zu Passerschwankungen kommen müsste.

Die komplexe Systematik kann schließlich aufgrund fehlender Informationen in den Regelungssystemen nicht vollständig erklärt werden. Sicher ist aber, dass die Grundursache dieser MD-Registerstörungen aus einer nicht idealen Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine stammt. Dieser Art der Registerstörung kann damit in jedem Falle durch eine Optimierung der Abwicklung, insbesondere durch eine Zentrierung der Rolle bei der Einspannung und ggf. einem schonenderen Rollenhandling, effektiv entgegengewirkt werden.

8.4.3 Quantitative Bewertung

Die in Abbildung 8.46 gezeigten prototypischen Rollen zeigen beispielhaft die qualitative Charakteristik der Registerstörungen in der Fallstudie. Eine quantitative Auswertung über alle validen Rollen des Datensatzes, auf Basis der jeweiligen Standardabweichung pro Rolle entlang der Druckmaschine bzgl. CD- und MD-Register, ist in Abbildung 8.56 dargestellt. Für die Auswertungen wurden nur aktive Druckwerke berücksichtigt. Außerdem wurde die Standardabweichung nur über solche Daten berechnet, bei der sich die Maschine in einem stationären Maschinenbetrieb befindet (siehe *Steady_State_Data* in [16]). Die jeweilige Anzahl der ausgewerteten Rollen ist für jedes Druckwerk unter „valid data“ aufgeführt.

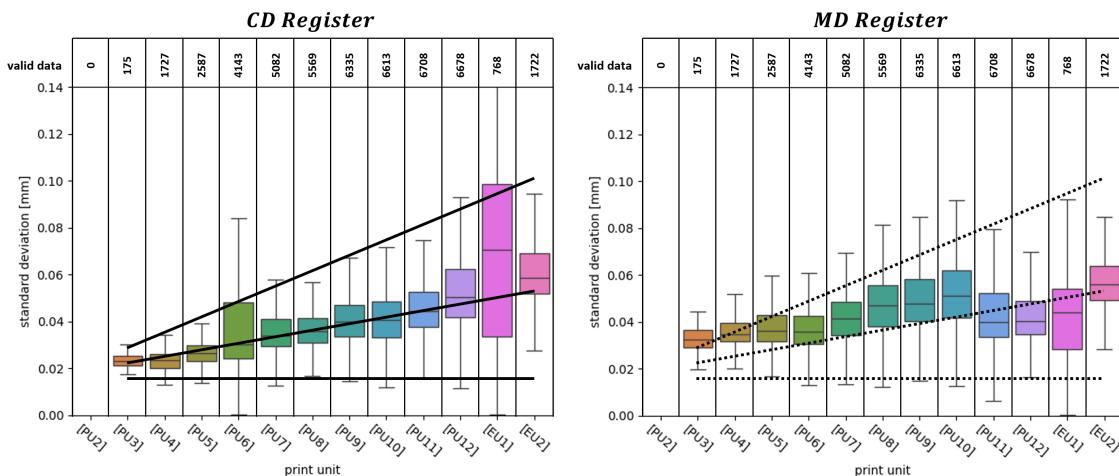


Abbildung 8.56 Statistik der Registerschwankungen als Standardabweichung entlang der Druckmaschine bzgl. aller validen Rollen für CD-Register (links) und MD-Register (rechts)

Die Statistik der **CD-Registerstörungen** wird folgendermaßen interpretiert:

- Der annähernd lineare Anstieg der mittleren Standardabweichungen entlang der Druckmaschine wird nahezu vollständig auf die dominanten niederfrequenten materialinduzierten lateralen Bahnlaufstörungen zurückgeführt (siehe 8.2.2).
- Der zunehmende Interquartilsabstand zeigt, dass die lateralen Bahnlaufstörungen in ihrer Ausprägungsstärke im Einzelfall stark variieren.
- Die auffällige Asymmetrie der Häufigkeitsverteilung bei PU6 deutet auf eine Anomalie an diesem Druckwerk hin. In den Spektrogrammen ist bei PU6 häufig ein deutlich größeres Grundrauschen zu beobachten, was auf eine Störung im Sensor hindeutet. Auch eine mechanische Störung im Antrieb der seitlichen Zylinderverstellung ist möglich.
- Die deutlich breitere Streuung der Standardabweichungen bei EU1 wird auf eine andere Parametrierung der Registerregelung für das Prägewerk im Vergleich zu den Druckwerken zurückgeführt. Die Passlage wird hier außerdem nicht über eine aufgeprägte Registermarke ermittelt sondern über eine Registerscheibe direkt am Prägezylinder. Die Bedingungen für Messung und Regelung der Passlage sind zwischen den Druckwerken und dem Prägewerk nicht direkt miteinander vergleichbar und erklären die deutlich breitere Verteilung.
- Andere CD-Registerstörungen haben keinen signifikanten Einfluss auf die Statistik der Standardabweichungen. Störungen durch deformierte Mutterrollen treten vergleichsweise selten auf. Diese Art der Störung fügt sich außerdem in ihrer konsequenteren Verstärkung entlang der Maschine in die generelle Statistik der niederfrequenten stochastischen materialinduzierten Störungen ein. Besonders starke MD-Störungen

wirken sich manchmal auch auf das CD-Register aus. Diese Effekte fallen aufgrund ihrer geringen Intensität (in CD-Register) kaum ins Gewicht der Statistik.

Die Statistik der **MD-Registerstörungen** wird folgendermaßen interpretiert:

- Bis zum Druckwerk PU10 ist die Standardabweichung der MD-Registerstörungen im Mittel stets größer als im CD-Register (gestrichelte Linien). Erst nach PU10 wird die Standardabweichung wieder geringer und liegt dann im Mittel sogar unterhalb der eingezeichneten Mittelwertlinie der CD-Registerstörungen.
- Die meisten MD-Registerstörungen sind auf die gegenseitige Beeinflussung der nicht ideal rotierenden Walzen in der Druckmaschine zurückzuführen. Dies führt aufgrund vielfältiger nichtlinearer Verzerrungen zu niederfrequenten Intermodulationsprodukten und ggf. zusätzlich zu irreführenden Aliasing-Effekten, die die MD-Registerregelung zur Induzierung von Registerfehlern veranlassen. Auch die sehr niederfrequenten stochastischen Effekte können durch diesen Effekt erklärt werden.
- Eine konsistente Systematik hinsichtlich der linearen Verzerrung (Dämpfung oder Verstärkung) entlang der Druckmaschine ist nicht erkennbar. Der Anstieg bis PU10 lässt sich mutmaßlich dadurch erklären, dass die relevanzteste zugrundeliegende Störung sowohl in Bahntransportrichtung als auch entgegen dieser wirkt. Dadurch überlagern und vermischen sich die Effekte, sodass die Bahn bei PU10 besonders unruhig ist.
- Die Abwicklungsstörungen der Fertigrolle in der Druckmaschine treten bei relativ vielen Rollen auf. Die Störung tritt insbesondere bei den ersten aktiven Druckwerken auf. Je nach Referenzierung in der Registerregelung wirkt sich die Passerschwankung dann in identischer Ausprägung auf nachfolgende Druckwerke aus, oder auch nicht. Statistisch ist diese MD-Registerstörung aber vernachlässigbar im Vergleich zu den vielfältigen und in der Regel deutlich stärker ausgeprägten streng periodischen MD-Störungen sowie den besonders niederfrequenten stochastischen Anteilen.

In der Statistik spiegeln sich nur die beiden dominantesten Registerstörungen je Richtung wieder. Für detailliertere statistische Auswertungen bzgl. der verschiedenen identifizierten Einzeleffekte müssten diese auf Basis ihrer spezifischen Orts-Frequenzsignatur voneinander separiert werden. Die Methode der statischen Analyse wie bei den Bahnlaufdaten angewendet eignet sich dafür grundsätzlich nicht, da sich die lineare Verzerrung entlang der Druckmaschine stark von der jeweiligen Referenzierung und allgemein von der Reaktion der Bahnlauf- und Registerregelung abhängt.

Die relevanzteste CD-Registerstörung *Der überwiegende Teil der CD-Registerstörungen wird durch Inhomogenitäten in den Materialeigenschaften hervorgerufen (siehe 8.2.2). Die-*

se führen entsprechend ihrer Ursache zu niederfrequenten lateralen Bahnlaufstörungen. Sie sind in der Orts-Frequenzstruktur entlang der Druckmaschine nahezu identisch und verstärken sich konsequent. Diese Art der Bahnlaufstörung ist mit der seitlichen Bahnlaufregelung (WGS) im Bahnabschnitt „Abwicklung“ nicht kompensierbar, da sie sich erst entlang der Druckmaschine ausbildet. Die so entstehenden Bahnlaufstörungen wirken sich in gleicher Weise auch im CD-Register aus. Sie werden lediglich für sehr niedrige Frequenzen $k < 0,05/\text{m}$ erfolgreich durch die CD-Registerregelung kompensiert. Bei $k \approx 0,05/\text{m}$ gibt es deutliches Optimierungspotential auf der Seite der Regelung und auf der Seite der Ursache. Als wahrscheinlichste Ursache werden Schwankungen in der Faserorientierung in den einzelnen Lagen der Materialbahn vermutet. Die Faserorientierung wird maßgeblich in der Headbox und in der Siebpartie der Papiermaschine beeinflusst.

Die relevanteste MD-Registerstörung Der überwiegende Teil der MD-Registerstörungen wird direkt und/oder indirekt durch streng periodische Bahntransportstörungen verursacht, die wohl von nicht ideal rotierenden Walzen in der Druckmaschine ausgehen (siehe 8.3.2). Die einzelnen individuellen Walzenstörungen vermischen sich miteinander, was zu vielfältigen niederfrequenten Intermodulationsprodukten führt. Das Spektrum dieser Intermodulationsprodukte verändert sich bereits bei kleinen Veränderungen in den nichtlinearen Übertragungseigenschaften des Übertragungssystems deutlich. Das Auftreten der Intermodulationsprodukte und die exakte Frequenz ist damit nicht nur von der ursächlichen Störung selbst abhängig (Walzen), sondern maßgeblich auch von den Materialeigenschaften, den Betriebsbedingungen der Druckmaschine sowie dem jeweiligen Beobachtungsort entlang der Druckmaschine. Durch die verhältnismäßig niederfrequente Abtastung der Passlage mit $f_s = 1/RL$ kommt es unter Umständen zu Alias Effekten. Höherfrequente Registerstörungen erscheinen dann fälschlicherweise als niederfrequente Passerabweichungen. Auf diese falsch wahrgenommenen Registerstörungen kann die Registerregelung bei einer entsprechenden Reaktion nur falsch reagieren. Liegt die Alias Störung in einem Bereich für die die Regelung sensitiv ist, wird durch die Regelung selbst eine tatsächliche MD-Registerstörung mit der Alias Frequenz generiert.

Kommentar zu den naheliegendsten Einflussparametern der relevantesten Registerstörungen Da der Großteil der lateralen Bahnlaufstörungen und CD-Registerabweichungen offensichtlich durch das Material selbst verursacht wird, wurde vermutet, dass die CD-Registerqualität bei PU12 insbesondere von den folgenden materialspezifischen Parametern abhängt:

- Bahnbreite
- Flächengewicht

- Materialdicke
- Hersteller
- CD-Position

Zu den genannten Parametern konnte in der Fallstudie keine eindeutige Korrelation mit den CD-Registerschwankungen bei PU12 festgestellt werden. Das ist in sofern plausibel, weil die CD-Bahnlaufschwankungen und damit auch die CD-Registerschwankungen primär von den ursächlichen Störungen im Stoffauflauf und dem spezifischen CD-Profil der Materialbahn (bzgl. Fertigrolle) abhängen. CD-Positionen, die auf einem asymmetrischen Teilabschnitt des Maschinenbreiten CD-Profils liegen, verursachen potentiell viel stärkere laterale Bahnlaufschwankungen als CD-Positionen, bei denen das CD-Profil der Fertigrollenbreiten Materialbahn symmetrisch ist. Die jeweilige Aufteilung der CD-Bahnpositionen ist bei einer und derselben Papiermaschine je nach Auftrag sehr unterschiedlich. Die im Datensatz dokumentierten CD-Positionen beschreiben lediglich die Reihenfolge der Positionen und sind damit für diese Art der Auswertung leider nicht brauchbar. Auch das CD-Profil der maschinenbreiten Bahn der Papiermaschine ändert sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit über die verschiedenen Zeiträume, in denen die Bahn der verschiedenen Rollen hergestellt wird. Aufgrund fehlender Informationen und einer unzureichenden Datenlage hinsichtlich einiger der angesprochenen Aspekte, wird nicht weiter untersucht, durch welche Bedingungen die materialspezifischen lateralen Bahnlauf- bzw. CD-Registerschwankungen besonders begünstigt werden.

Die dominantesten Bahnspannungs- und MD-Registerstörungen sind durch die nichtlinearen Eigenschaften vergleichsweise komplex in ihrer Entstehung. Es konnte kein einfacher Zusammenhang zwischen den folgenden Material- oder Prozessparametern und den Bahnspannungsschwankungen bzw. MD-Registerstörungen identifiziert werden:

- Bahnspannung
- Maschinengeschwindigkeit
- Materialdicke
- Bahnbreite
- Bahnfeuchtigkeit

Aufgrund fehlender Informationen zu anderen Parametern und der sehr inhomogenen Datenlage hinsichtlich vergleichbarer Rollen, wurde nicht weiter untersucht durch welche Bedingungen die Bahnspannungs- bzw. MD-Registerschwankungen besonders begünstigt werden.

9 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Erprobung eines eigenständigen Ansatzes, mit dem Bahnlaufstörungen und Registerschwankungen systematisch differenziert, analysiert und anschließend prozessübergreifend möglichen Ursachen entlang der Wertschöpfungskette zugeordnet werden können. Dieses formulierte Ziel (siehe Kapitel 2.4) leitete sich aus der Ausgangssituation (siehe Kapitel 2.1) und den sich daraus ergebenen praxisrelevanten Fragestellungen ab, die als folgende konkrete Forschungsfrage (siehe Kapitel 2.2) formuliert werden konnten:

„Wie können Bahnlauf- und Registerschwankungen in Rolle-zu-Rolle Druckprozessen systematisch differenziert und ihren Ursachen entlang der Prozesskette kausal zugeordnet werden?“

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellung wurden einige zentrale Herausforderungen (siehe Kapitel 2.3) identifiziert, die augenscheinlich die Ursache dafür sind, warum bisher keine ganzheitlichen Untersuchungen zu der Fragestellung existieren.

Die Literaturrecherche (siehe Kapitel 4) ergab, dass zwar viele Einzeluntersuchungen zu spezifischen Aspekten im Umfeld der zentralen Fragestellung existieren, jedoch kein ganzheitlicher Ansatz, der die Prozesskette vom Druckprozess rückwärts bis hin zur Substratherstellung betrachtet. Insbesondere nicht im Bereich faserbasierter Drucksubstrate.

Zur Überwindung der identifizierten Herausforderungen des Status Quo, wurde daher ein grundlegend anderer Ansatz gewählt, wie der allgemein durch die Industrie verfolgte Ansatz einer digitalen Vernetzung der Wertschöpfungskette im Rahmen des Industrie 4.0 Megatrends (siehe Kapitel 5). Als Paradigmenwechsel wurde eine Analogie zwischen einer Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette und einem analogen Informationsübertragungssystem zugrunde gelegt. Die Materialbahn stellt in dieser alternativen Betrachtungsweise des Produktionsprozesses ein materielles analoges Übertragungsmedium dar, welches die gesamte Wertschöpfungskette durchläuft und miteinander verbindet. Sie wird durch verschiedenste Prozessstörungen in den einzelnen Teilprozessen beeinflusst oder anders ausgedrückt mit Informationen beschrieben. Diese Art der analogen Informationsübertragung geschieht dabei völlig unabhängig vom Vorhandensein jeglicher digitaler Infrastruktur zur prozessübergreifenden Vernetzung, einfach so.

Als notwendige datentechnische Grundlage für die Untersuchungen wurde im Rahmen der Arbeit ein Datensatz einer mit entsprechender Sensorik ausgestatteten Rollentiefdruckmaschine einer Verpackungsdruckerei erhoben, der eine Vielzahl von Prozess- und Qualitätsdaten von über 7000 bedruckten Rollen umfasst (siehe Kapitel 6.1).

Eine im Kontext von Rolle-zu-Rolle Druckprozessen bisher nicht etablierte Methodik zur Visualisierung von Prozess- und Qualitätsdaten, in Form einer Zeit-Frequenzanalyse, wurde zur differenzierten Untersuchung der vielfältigen dynamischen Vorgänge von Bahnlauf- und Registerschwankungen im Druckprozess als spezielle Form der Orts-Frequenzanalyse umgesetzt und genutzt (siehe Kapitel 6.2).

Ein ursprünglich aus der Nachrichtentechnik stammendes Konzept zur Unterscheidung von Informationen, die innerhalb eines gemeinsam genutzten Übertragungsmediums übertragen werden, wurde als Methode zur groben Unterscheidung von Informationen, die in Bahnkanten enthalten sind, modifiziert. Durch eine Bewertung der linearen Verzerrung einzelner überlagerter Signalkomponenten entlang der Druckmaschine hinsichtlich ihres Zeit- und Frequenzverhaltens, konnten die Informationen zunächst systematisch voneinander differenziert und schließlich grundlegenden Verursachungsmechanismen zugeordnet werden, die als solche nur in ganz bestimmten Teilprozessen innerhalb der Prozesskette auftreten können (siehe Kapitel 6.3).

Die auf die bereits vorgefilterten Spektrogramme aufsetzenden Strukturanalysen der Orts-Frequenzsignaturen, lieferten weitere wertvolle Hinweise bzgl. konkreter Grundursachen für die einzelnen Prozessstörungen im Druck. Dadurch wurde die Ursachenrückverfolgung weiter verfeinert. Mit Hilfe eines finiten Wickelmodells wurde dazu modelliert, wie sich prinzipielle Störeinflüsse gegenüber der Materialbahn oder der Rolle auf die geometrische Rollenstruktur und im Vergleich dazu auf die Orts-Frequenzsignatur im Bahnlauf der Druckmaschine auswirken (siehe Kapitel 6.3.3 und 7).

Die erarbeiteten Visualisierungs-, Differenzierungs- und Zuordnungsmethoden wurden abschließend kombiniert auf den Datensatz angewendet, um reale Bahnlauf- und Registerstörungen entsprechenden Ursachen in der Wertschöpfungskette kausal zuzuordnen. Die im Vorfeld aus dem Stand der Forschung abgeleiteten und formulierten Hypothesen zum erwarteten Übertragungsverhalten grundlegender Störursachen entlang der Druckmaschine (siehe Kapitel 6.3.2.1), wurden schließlich mit Hilfe konkreter Informationsbeispiele in der Materialbahn innerhalb der Fallstudie validiert (siehe Kapitel 8.1, 4.2 und 8.3).

Darauf aufbauend wurden einzelne Bahnlaufstörungen direkt mit Passerschwankungen in Bezug gebracht und hinsichtlich ihrer spezifischen Orts-Frequenzsignatur verglichen. So

wurden die Grundursachen der dominantesten Registerstörungen der Fallstudie schließlich über die bereits zugeordneten Bahnstörungen hinsichtlich ihrer Ursache differenziert zurückverfolgt (siehe Kapitel 8.4).

Nachfolgend werden im Ausblick abschließend noch einige Ideen und Möglichkeiten vorgestellt, die sich aus dem vorgestellten Ansatz für zukünftige Untersuchungen ergeben (siehe Kapitel 10).

Als Gesamtfazit kann festgehalten werden, dass mit dem vorgestellten Ansatz die eingangs formulierte Forschungsfrage sowie die ursächlichen praxisrelevanten Fragestellungen

- *Welche Bahnlauf- und Registerstörungen lassen sich in realen Druckprozessen beobachten?*
- *Wo liegen ihre jeweiligen Ursachen innerhalb des Gesamtprozesses?*
- *Wodurch werden sie jeweils konkret verursacht?*

qualifiziert beantwortet wurden.

10 Ausblick

Optimierungsmaßnahmen im Umfeld der Fallstudie

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen lassen sich im Bezug auf die Fallstudie mit der konkreten Druckmaschine einige Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Bahnlauft- und Registerqualität ableiten. Die Durchführung und Evaluierung von Optimierungen sind ausdrücklich nicht Teil dieser Arbeit. Einige konkrete Optimierungsvorschläge sind jedoch hier im Anhang aufgeführt.

- Einbau einer zweiten seitlichen Bahnlaufregelung im Bahnabschnitt „Druck“ zur Reduzierung materialspezifischer lateraler Bahnlauftörungen, die sich erst relativ spät in der Druckmaschine ausbilden und durch die Bahnlauftregelung im Bahnabschnitt „Abwicklung“ noch nicht kompensiert werden können.
- Die Registerregelung arbeitet insbesondere im sehr niederfrequenten Bereich von $< 0,05/\text{m}$ (CD) bzw. $< 0,01/\text{m}$ (MD) effektiv. Bei fast allen Rollen liegt ein wesentlicher Teil der Bahnlauft- und Registerschwankungen (insbesondere im CD-Register) jedoch in einem Frequenzbereich bis $0,2/\text{m}$. Ein signifikanter Anteil der Registerstörungen wird mit der aktuellen Regelungsparametrierung also offensichtlich nicht kompensiert. Eine Optimierung der Registerregelung hinsichtlich ihrer Schnelligkeit für Störungen bis zu einer Wellenlänge von 5 m bietet daher besonders großes Potential zur Steigerung der Registerqualität.
- Aufgrund der beobachteten Anomalie in der Statistik der Standardabweichungen in den CD-Registerdaten bei *PU6* (siehe Abbildung 8.56) und den Ausreißern in der Bahnkantenmessung bei *WEPU7* (siehe Abbildung 8.28) ist davon auszugehen, dass bei *PU6* eine technische Störung vorliegt. Eine Möglichkeit ist, dass der Registersensor in seiner Aufnahme nicht stabil montiert ist und Spiel aufweist. Eine andere Möglichkeit ist eine mechanische Störung im Antrieb der seitlichen Zylinderverstellung. In jedem Fall sollte *PU6* geprüft werden.
- Zur besseren Dämpfung von extern induzierten Bahnlauftörungen aus der Abwicklung in der Druckmaschine könnte die Anzahl der Walzen bis zur WGS erhöht werden. Eine veränderte Bahnführung durch zwei zusätzliche Leitwalzen in Wickler

Position B bewirkt bereits eine signifikante Beruhigung des lateralen Bahnlaufs (gemessen bei WE_{UW}) (siehe Kapitel 8.3.1).

- Als besonders problematisch für die Registerqualität konnten niederfrequente stochastische seitliche Bahnlaufstörungen identifiziert werden, die einer materialbedingten Inhomogenität zugeordnet werden können. Insbesondere Schwankungen in der Faserorientierung sind eine besonders wahrscheinliche Ursache für dieses Phänomen. Zur gezielten Optimierung derartiger Bahnlaufstörungen sollte bei entsprechenden Rollen der Papierhersteller informiert werden, sodass dieser seinen Stoffauflauf gezielt optimieren kann.
- In der vorliegenden Arbeit wurde nicht untersucht in wie weit verschiedene Betriebszustände der Maschine (Bahnspannung, Geschwindigkeit, Trocknertemperatur etc.) die jeweiligen Bahnlauf- und Registerstörungen zusätzlich beeinflussen. Für diese Art der Untersuchung ist der Datensatz nicht gut geeignet, da er in seinen Parametern zu divers ist und verhältnismäßig wenige vergleichbare Bedingungen aufweist. Zum besseren Verständnis sollten gesonderte Druckversuche durchgeführt werden, um unter kontrollierten Bedingungen einige der Einflussparameter gezielt zu untersuchen.
- Neben den in dieser Arbeit gezeigten Effekten bzw. Informationsbeispielen existieren noch einige andere systematische Orts-Frequenzmuster in den Daten, für die im Rahmen dieser Arbeit bisher keine Erklärungsansätze erarbeitet wurden. Der Datensatz MSDIRPP bietet also die Möglichkeit zur Untersuchung weiterer Effekte.

Erweiterung der Methodik

Demultiplexing für statistische Auswertungen

Zur Verbesserung von statistischen Auswertungen bzgl. Bahnlauf- und Registerschwankungen ist es hilfreich diese hinsichtlich ihrer Einzelphänomene zu differenzieren. Eine Möglichkeit bietet das vorgestellte Demultiplexing Konzept (siehe Kapitel 6.3.2). Über eine inverse STFT (iSTFT) können aus den gefilterten Amplituden-Spektrogrammen und einer zusätzlichen Berücksichtigung der Phasenspektren, Orts-Frequenz gefilterte Signale zurückgewonnen werden. Diese gefilterten Signale können schließlich statistisch ausgewertet werden und mit dem ungefilterten Signal verglichen werden. Die Gegenüberstellung ermöglicht eine Bewertung der Einzelphänomene am Gesamtfehler, wodurch sich eine deutlich differenziertere Fehlerstatistik erheben lässt. Aufgrund der unregelmäßigen Verfügbarkeit der Sensoren entlang der Maschine, war eine solche Art der Auswertung in dieser Fallstudie nicht möglich.

Erweiterung der Bahnkantensorik

Aufgrund des gewählten Messaufbaus der Bahnkantensensoren in dieser Arbeit (einseitig und entlang der Maschine verteilt), können nicht direkt Informationen zu Bahnbreitenschwankungen extrahiert werden. Durch Erweiterung des Messaufbaus um jeweils einen Bahnkantensor auf der gegenüberliegenden Seite, könnten auch Informationen zu Bahnbreitenschwankungen extrahiert werden. Diese Informationen würden das bisherige Bild der beobachteten Bahnstörungen (einseitige Bahnkantenstörungen, seitenparallele Bahnkantenstörungen und seitliche Bahnlaufstörungen) um Schwankungen in der Bahnbreite erweitern. Fest in die Bahn geschnittene Bahnbreitenschwankungen sind insbesondere bei Bahnspannungsschwankungen im Rollenwicklungsprozess zu erwarten. Nicht konstante Breitenschwankungen entlang der Maschine dagegen bei Bahnspannungsschwankungen im Druckprozess. Zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit bei Bahnkantensorik könnten diese um eine automatische Nachführung erweitert werden, sodass auch bei häufigen Materialbreitenwechseln stets eine Bahnkante gemessen wird.

Auswertung der Phaseninformationen

In dieser Arbeit wurden lediglich die Betragsspektren ausgewertet. Aus den Phasenspektren könnten weitere wertvolle Informationen extrahiert werden, die insbesondere Veränderungen im Abrollverhalten von rotationsperiodischen Elementen anzeigen können. Potentiell interessante Untersuchungen hierzu sind beispielsweise das Abrollverhalten von Presseure und Druckzylinder in der Druckmaschine oder die Scherung zwischen Ober- und Untermesser in der Schneidpartie des Maschinenrollers.

Übertragung der Methodik auf andere Sensoren

Die Methodik des Demultiplexing wurde im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich für die Bahnkantendaten entwickelt und erprobt. Ein ähnlicher Ansatz ist grundsätzlich auch für andere Sensoren denkbar. Eine Übertragung des Konzeptes auf die Bahnspannungsdaten erscheint am einfachsten umsetzbar. Zur Übertragung der Methodik auf die Registersensoren müssten zusätzlich noch Informationen zum jeweiligen Referenzdruckwerk berücksichtigt werden.

Deep Learning

Generell

Die vorliegende Arbeit konnte eine große Vielfalt bisher verborgener Informationen in Druckmaschinendaten bzw. Bahnlauftypen aufzeigen und erklären. Dieser grundlegende Nachweis und insbesondere die kausale Zuordnung der Informationen zu entsprechenden Ursachen im Prozess, kann als wissenschaftliche Grundlage für weiterführende Automatisierungsvorhaben für entsprechende Analysen genutzt werden.

Deep Learning Verfahren auf Basis von neuronalen Netzen bieten sich zur Automatisierung der Merkmalsextraktion von hochdimensionalen Maschinendaten besonders an. Als Eingabedaten eignen sich grundsätzlich verschiedene Datenrepräsentationsformen wie Zeitreihen, Spektrogramme oder andere Formen.

Zur Ausbildung effizienter Merkmalsextraktoren können sogenannte Encoder trainiert werden. Ein Encoder bildet hochdimensionale Eingabedaten auf kompakte Merkmalsvektoren mit deutlich weniger Dimensionen ab. Ist ein Encoder gut trainiert und passen die Eingabedaten grundsätzlich zu den Trainingsdaten, beinhaltet der Merkmalsvektor die semantischen Informationen des Dateninputs in einer sehr verdichteten Form.

Je nach Datenverfügbarkeit kommen zum Training des Encoders verschiedene Lernverfahren in Frage. Überwachte (engl. supervised) und unüberwachte (engl. unsupervised) Verfahren sind besonders häufig genutzte Formen. Eine Möglichkeit zum Training eines Encoders auf einen domainspezifischen Datensatz, wie den MSDIRPP ohne direkte Ziel-daten, ist die Methodik der Datenrekonstruktion über eine Autoencoder (AE) Architektur in einem unüberwachten Ansatz.

Ein so extrahierter Merkmalsvektor in der Anwendung des Encoders nach dem Training eröffnet ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten, wie Clustering, Klassifizierung oder Anomalieerkennung. Derartige Anwendungen sind beispielsweise im Bereich der prädiktiven Wartung oder der Qualitätssicherung von Interesse.

Convolutional Neural Networks (CNN) eignen sich hervorragend für die Analyse von Bild-daten, zu denen auch Spektrogramme zählen. Sie sind damit also grundsätzlich in der Lage komplexe Muster in Spektrogrammen zu identifizieren. Darüber hinaus existieren aber noch viele weitere Deep-Learning Methoden, die für die Analyse von Druckmaschi-nendaten in Frage kommen.

Semantische Vorsteuerung

Ein konkreter Anwendungsbereich für Deep Learning Verfahren im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit sind sogenannte Blind Source Separation (BSS) Verfahren zur Differenzierung mehrerer überlagerter und vermischter Signalquellen in Systemen. Die Verfahren kommen z.B. zur Quellenidentifikation in akustischen oder seismischen Signalen zum Einsatz.

Eine semantische Differenzierung von Ursachenquellen in Bahnlaufstörungen in Echtzeit könnte dazu genutzt werden, um auf diese im Rahmen der Regelungssysteme sehr differenziert zu reagieren. Beispielsweise sind materialinduzierte CD-Bahnlaufstörungen entlang der Druckmaschine zur Bahn ortsfest und verstärken sich systematisch entlang der Druckmaschine um einen Wert, welcher vom Material und den Maschineneinstellungen abhängig ist. Die Abweichungen in späteren Druckwerken lassen sich daher potentiell aus den Abweichungen in frühen Druckwerken und dem Wissen über die Verstärkung des Fehlers entlang der Maschine für die einzelnen Druckwerke vorhersagen. Im Gegensatz dazu werden Bahnstörungen, die aus einer deformierten Mutterrolle stammen oder von einer nicht idealen Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine, entweder von selbst gedämpft (NEL) oder liegen als reine Bahnkantenstörung vor und sind daher unveränderlich entlang der Maschine. Auf diese Arten der Bahnlaufstörungen sollte eine Bahnlaufregelung nach Möglichkeit so wenig wie möglich reagieren. Eine Möglichkeit zur Integration der zu erwartenden Abweichung im Regelungskonzept ist eine Vorsteuerung z.B. in der Registerregelung. Grundvoraussetzung eines solchen semantischen Vorsteuerungskonzeptes ist die Separation der verschiedenen Störursachen. Alternativ zum vorgestelltem Demultiplexing Prozess (siehe Abbildung 6.21 S.147) könnte dies ggf. auch über lernbasierte Verfahren gelöst werden.

Identifikation problematischer Walze-Bahn-Walze Kombinationen

Als weitere lohnenswerte Anwendung wird eine automatisierte Identifikation problematischer Walze-Bahn-Walze Kombinationen auf Basis von Bahnspannungsmessdaten eingeschätzt. Nicht ideal rotierende Walzen führen in Maschinenrichtung zu niederfrequenten Prozessstörungen aufgrund individueller nichtlinearer Wechselwirkungen (siehe Kapitel 8.3.2). Die konkreten ursächliche(n) Walzen zu finden ist eine sehr schwierige Aufgabe, da zu erwarten ist, dass die Übertragungsfunktionen für jede Walze-Bahn-Walze Kombination sehr individuell sind und sich unter anderen Betriebsbedingungen auch noch verändern. Da die Grundfrequenzen der Walzenstörungen aufgrund der Geometrie vorgegeben sind, muss „nur noch“ die individuelle Walze-Bahn-Walze Kombination und die jeweilige

nichtlineare Funktion ermittelt werden. Zusammengenommen führen diese zu einem sehr spezifischen intermodulierten Frequenzspektrum. Grundsätzlich eignet sich ein neuronales Netz als Universal Approximator zur Ermittlung jedweder nichtlinearer Funktion.

Anti-Aliasing in der Registerregelung

Zur Vermeidung einer problematischen Ausregelung von Alias-Frequenzen im unterabgetasteten Registersignal (siehe Kapitel 8.4.2.1) könnten Bahnspannungsdaten und die Registerdaten in Echtzeit auf diese überprüft werden. Ein programmierbarer Ansatz wäre die Bahnspannungsdaten einmal mit genau derselben Frequenz abzutasten wie das Register und einmal mit einer leicht davon abweichenden Frequenz. Gibt es Übereinstimmungen im Spektrum der Bahnspannungsmessungen und in den Registermessungen, die sich in der leicht anderen Abtastung verschieben, handelt es sich um Alias-Frequenzen (siehe Abbildung 8.53). Das Spektrum der Registerdaten könnte auf Basis dieser Informationen gefiltert und anschließend für die Nutzung in der Registerregelung in den Zeitbereich zurückgerechnet werden. Da es sich beim Großteil der problematischen MD-Registerfehler um konstant periodische Störungen handelt, wäre die Alias-Frequenz Filterung über entsprechend schmalbandige Bandpassfilter umsetzbar.

Fraglich ist, ob die Alias-Frequenzen für ein spezifisches Setting auch erlernbar sind. Ein entsprechender Ansatz dazu wäre ein iterativ erlernbarer Anti-Aliasing Frequenzfilter im Registerregler (bzgl. der eingehenden Regelabweichungen) mit dem Ziel einer Optimierung der Regelgröße (Registerabweichung). Ein so erlernerter Frequenzfilter sollte alle herausgefilterten Frequenzanteile in der Regelung ignorieren. Nur bei Alias-Frequenzen ist mit einer Verbesserung des Regelungsergebnis zu rechnen. Werden Frequenzen aus dem Basisband weggefiltert, sollte es zu einer Verschlechterung des Regelergebnis kommen.

Vorhersage des Bahnkantenspektrogramms auf Basis der Rollenstirnseite

In der vorliegenden Arbeit konnte der systematische Zusammenhang zwischen den visuellen Merkmalen in deformierten Fertigrollen bzw. Rollen mit Mustern in der Rollenstirnseite und Mustern im Spektrogramm einer Bahnkantenmessung dargestellt werden (siehe Kapitel 7). Eine potentiell sinnvolle Anwendung aus diesem Zusammenhang könnte darin bestehen auf Basis einer Fotografie einer Fertigrolle bzw. Scan einer Rollenstirnseite, das zu erwartende Spektrogramm einer Bahnkantenmessung in der Druckmaschine vorherzusagen. Mutmaßlich ist hierfür ebenfalls ein neuronales Netz geeignet. Als Eingabedaten wäre ein Bild des spezifischen Wickels und als Zieldaten die Rekonstruktion des Wickels als Spektrogramm gegeben. Auf diese Weise könnte, je nach Beschaffenheit der eingehängten

Rolle am Abwickler, vorab eine Optimierung der Bahnlaufregelung auf Basis des vorhergesagten lateralen Bahnlaufs durchgeführt werden. Die spezifische Rollenbeschaffenheit könnte somit als Vorwissen zur Optimierung der Bahnlauf- oder Registerregelung genutzt werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Stark vereinfachtes Schema von Bahnlauf- und Registerschwankungen in einem Rolle-zu-Rolle Druckprozess	7
2.2	Ursache-Wirkungs-Diagramm mit vielfältigen Ursachen in den einzelnen Teilprozessen entlang der Prozesskette die potentiell Auswirkungen auf Bahnlauf- und Registerschwankungen im Druckprozess besitzen	9
2.3	Einfacher Regelkreis	9
2.4	Differenzierung und Zuordnung im Ursache-Wirkungs-Diagramm	11
2.5	Wahrnehmung des Gesamtprozesses als Summe voneinander getrennter Einzelprozesse mit entsprechenden Informationsbarrieren	12
3.1	Nicht vollständig integrierter Papierherstellungsprozess mit den Produktionsabschnitten Papierherstellung (PH), Papierveredelung (PV) und Papierverarbeitung (PA) mit Rollenwickelprozesse als verbindendes Element nach [25]	16
3.2	Papiermaschine vom Stoffauflauf bis zur Aufrollung [13]	17
3.3	CD- und MD-Variationen im Stoffauflauf des Papierherstellungsprozesses [115]	20
3.4	Allgemeines nichtlineares Materialgesetz von Papier [58, 5-6]	21
3.5	Prinzipielle Aufteilung einer einzelnen Mutterrolle zu 18 Fertigrollen mit CD-Rollenposition (1-6) und Set-Nummer (1-3)	23
3.6	Schematischer Aufbau eines Doppeltragwalzenrollers (in Anlehnung an [83])	24
3.7	Schematische Darstellung der Schneidpartie als Tangentialschneider in Anlehnung an [114]	25
3.8	Vergleich eines Geschwindigkeitsprofils einer Schneidpartie mit kritischen Geschwindigkeitszonen (rot hinterlegt) im Gegensatz zu einem optimalen Geschwindigkeitsprofil (rechts), in Anlehnung an [11]	26
3.9	Beispielhafte Ursachen für Schnittprobleme; Unwucht (links) nach [86] und Abnutzung (rechts) nach [114]	27
3.10	Prinzipielles Zusammenspiel der an einem Doppeltragwalzenroller zur Verfügung stehenden Wickelparameter zur Erzielung eines optimalen Wickelhärteverlaufs in Bezug auf die radiale und tangentiale Wickelspannung, in Anlehnung an [25]	28

3.11 Idealer zylindrischer Rollenwickel mit den wichtigsten Rollengeometrieparametern: W = Breite; $D_{Hülse}$ = Hülsendurchmesser; D_{Rolle} = Rollendurchmesser; L = Bahnlänge; T = Materialdicke	29
3.12 Beispielhafte Rollendefekte [30, S.384]	30
3.13 Typische externe Einflüsse auf eine gewickelte Rolle (Fertigrolle und/oder Mutterrolle) in der Zwischenlagerung und im Transport, die zu Deformationen führen oder die Materialeigenschaften nachhaltig beeinflussen (Auszüge aus [83])	32
3.14 Prozessschema einer prinzipiellen Rollentiefdruckmaschine mit allen für diese Arbeit relevanten Komponenten und Prozessschritte in Anlehnung an die konkret verwendete Druckmaschine	33
3.15 Prozessschema Bahnspannungsregelung	34
3.16 Prozessschema Seitliche Bahnpositionierung	35
3.17 Messprinzip der Passlage nebeneinander gedruckter Registermarken im Rollentiefdruck	36
3.18 Referenzierungsmodi in der Registerregelung [91]	37
3.19 Prozessschema Registerregelung	37
3.20 Bahnlauf Messgrößen	38
3.21 Zusammenfassung typischer laterale Bahnbewegungsmechanismen nach [84, S.399]	41
3.22 Stationärer Bahnlauf über ein nicht paralleles Walzensystem [95, S.75] . . .	42
3.23 Dynamische laterale Seitenbewegung aufgrund des NEL [84, S.385] für zwei Fälle: Winkelabweichung der Bahn zu einer feststehenden Walze (links); Winkelabweichung einer Leitwalze zur gerade einlaufenden Bahn (rechts); die graue Bahn zeigt den initialen Bahnlauf; die weiße Bahn den stationären Bahnlauf	43
3.24 Bode-Diagramm der prinzipiell frequenzabhängigen linearen Verzerrung bzgl. Amplitude und Phase im Bahnlauf an zwei parallelen Walzen [95, 79-80] . .	44
3.25 Beziehung zwischen Nachricht, Signal und Information, in Anlehnung an [18, S.13]	45
3.26 Das Übertragungssystem als Teil eines wechselseitigen Kommunikationssystems mit Informationsrückfluss an die Quelle, in Anlehnung an [18]	47
3.27 Typische Kennlinien für technische Übertragungssysteme	49
3.28 Ein durch Unterabtastung des Originalsignals (schwarz) entstandener Alias-Effekt beim rekonstruierten Signal (rot) mit deutlich geringerer Frequenz wie im Original	50
3.29 Original Spektrum (schwarz) und auf Basis von f_s rekonstruiertes Spektrum (rot) mit Alias-Frequenzen, in Anlehnung an [59]	51

3.30	Bandbreite und Basisband eines Frequenzspektrums $X(f)$	52
3.31	Veranschaulichung der Übertragungskapazität als Nachrichtenquader, in Anlehnung an [18, S.97]	52
3.32	Vielfachnutzung eines Übertragungsmediums [28, S.132]	53
3.33	Algorithmus der DFT, in Anlehnung an [120]	55
3.34	Algorithmus der STFT, in Anlehnung an [120]	57
3.35	Grafische Darstellung der Küpfmüllerschen Unbestimmtheitsrelation	58
3.36	Vergleich verschiedener Fensterfunktionen	59
3.37	Hann-Fensterfunktion (links) und seine Frequenzantwort (rechts)	59
3.38	Zeit-Frequenz Analyse des additiv überlagerten Signals x aus den Einzelsignalen x_1 bis x_6 mit Hilfe eines Spektrogramms	60
3.39	Additive Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit großem Frequenzunterschied	63
3.40	Additive Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit kleinem Frequenzunterschied führen bei zu geringer Frequenzauflösung zu einer Schwebung (hier nur in der Zeitreihe sichtbar)	63
3.41	Amplitudenmodulation eines Trägersignals $x_T(t)$ bzw. $x_1(t)$ mit einem Nutzsignal $x_M(t)$ bzw. $x_2(t)$ erzeugt ein neues Signal $x_{AM}(t)$ bzw. $x(t)$ mit einem ebenso neuen Spektrum $X_{AM}(f)$ bzw. $X(f)$	65
3.42	Multiplikative Mischung mit großem Frequenzunterschied	66
3.43	Multiplikative Mischung mit kleinem Frequenzunterschied	67
3.44	Ein mit der Trägerfrequenz f_T amplitudenmoduliertes Amplitudenspektrum $\hat{X}(f)$ mit oberem Seitenband (OSB) und unterem Seitenband (USB)	68
3.45	Beispiel Spektrum mit Intermodulationsprodukten bis 5. Ordnung	71
3.46	Prinzipielle nichtlinear dämpfende Übertragungskennlinie $g(x)$	71
3.47	Intermodulation durch Signaladdition und Verzerrung mit nichtlinear dämpfender Kennlinie ohne Gleichanteil	72
3.48	Intermodulation durch Signaladdition und Verzerrung mit nichtlinear dämpfender Kennlinie und verschobenem Arbeitspunkt durch Gleichanteil	72
4.1	Ausschnitt einiger für diese Arbeit mehr oder weniger relevanter und in [104] beschriebener Wickelphänomene bzw. Bahnlaufdefekte inkl. Gruppierung nach der Richtung der Abweichung in der Fertigrolle in Anlehnung an [78] (L = Lateral, R = Radial, T = Tangential, D = Diametral)	80
4.2	Entstehung von lateralen Abweichungen im Rollenwickler in Anlehnung an [89]	84
4.3	Mechanismus der Rollendeformation im Tragwalzenroller [60]	86

4.4	Resonanzfall (Kreise) durch Überkreuzung von Rollendrehfrequenz Harmonischen und konstante Eigenfrequenzen der beiden Tragwalzen [34]	87
4.5	Nachweis des Amplitudenverstärkungseffektes für sinusförmige Materialinhomogenität über eine komplette Periode P der Störung über mehrere Walzen [118]	94
4.6	Schematische Darstellung von seitlichen Bahnlauftörungen, die durch inhomogene Materialeigenschaften in einer Papierbahn induziert werden [65] .	96
4.7	Die wichtigsten Anknüpfungspunkte der vorliegenden Arbeit zum Stand der Forschung	102
5.1	Sequentielle Beschreibung (rote Pfeile) des Substrates als Bahn oder Rolle entlang der Prozesskette	105
5.2	Analogie zwischen einem rudimentären Kommunikationssystem (siehe S.47) und dem in dieser Arbeit zugrunde gelegten analogen Informationsübertragungsprozess einer Rolle-zu-Rolle Wertschöpfungskette im Vergleich zum digitalen Ansatz der Industrie	106
6.1	Prozessschema der in dieser Arbeit verwendeten Rollentiefdruckmaschine .	116
6.2	Strukturierung des MSDIRPP Datensatzes in Metadaten und Sensordaten, die über die Rollen ID verknüpft sind [15]	118
6.3	Ungleichmäßige Datenverfügbarkeit der Registersensoren im MSDIRPP Datensatz [15], aufgrund einer auftragsspezifischen Anzahl und Verteilung der genutzten Druckwerke	122
6.4	Beispielhafte Visualisierung einer Bahnkantenmessreihe (ID 10277) als Zeitreihe (oben links), als einfaches Spektrum per DFT (unten rechts) und als Orts-Frequenz Spektrogramm per STFT (unten links)	128
6.5	Unterschiedliche Spektrogramm Einstellungen derselben Bahnkantenmessung bzgl. WE_{UW} (ID 13995); Fensterbreite N von links nach rechts: 224 m, 112 m, 56 m	131
6.6	Veränderung der Bahnfeuchtigkeitsschwankungen (WM_{UW}) über 58 Rollen (ID 11816 bis ID 11873) im Vergleich zu drei exemplarischen Metainformationen (Supplier, Batch-Nr., Order-Nr.)	132
6.7	Vergleich von Bahnkantendaten (WE_{PU7}) und CD-Register (R_{PU7}^{CD}) bzgl. 58 aufeinanderfolgender Rollen (ID 11816 bis ID 11873) zeigen eine weitestgehende spektrale Übereinstimmung	133
6.8	Vergleich von Bahnspannungsdaten (WT_{PU7}) und MD-Register (R_{PU7}^{MD}) bzgl. 58 aufeinanderfolgender Rollen (ID 11816 bis ID 11873) zeigen eine weitestgehende spektrale Übereinstimmung	134

6.9 Vergleich der verschiedenen Sensoren einer einzelnen Rolle (ID 14624) und markierte Orts-Frequenzmuster, die sich bei verschiedenen Sensordaten wiederholen	135
6.10 Vergleich der Bahnkantenmessungen entlang der Druckmaschine einer einzelnen Rolle (ID 11775) zeigt das individuelle Übertragungsverhalten einzelner Informationen	136
6.11 Analogie der verteilten Bahnkantenmessung entlang der Druckmaschine zum Pegelmaß in der analogen Signalübertragung	139
6.12 Konzept der Informationsauftrennung (Demultiplexing) durch Bewertung der Orts-Frequenz aufgelösten linearen Verzerrung innerhalb der Bahnabschnitte „Abwicklung“ und „Druck“	140
6.13 Aufbereitete absolute Pegelspekrogramme	141
6.14 Spektrogramm mit orts- und frequenzaufgelöstem linearen Verzerrungsmaß \hat{X}_{32}	142
6.15 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_3^a	143
6.16 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_2^b	143
6.17 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_3^c	144
6.18 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_3^d	145
6.19 Gefiltertes Pegel-Spekrogramm \hat{X}_2^e	145
6.20 Zuordnung spezifischer Quelle-Senke Verbindungen	146
6.21 Übersicht einer exemplarischen Anwendung des Demultiplexing Konzeptes bzgl. des Bahnabschnittes „Druck“ zur Differenzierung von Informationen im gemeinsam genutzten Übertragungskanal „Bahnkante“	147
6.22 Die Finite Wickelspirale aller relevanten Variablen und eine Tabelle mit exemplarischen Berechnungen für die drei Elemente $i = 0$, $i = 1$ und $i = 10$	149
6.23 Gruppierung typischer rollengeometrischer Wickelphänomene nach der Richtung der Abweichung	151
6.24 Modellierung radialer Störungen durch eine periodische Materialdickschwankung $\delta T(i)$ (links) und einer einzelnen lokalen Quetschung des Wickels als Fensterfunktion, dessen Auswirkung zum Kern hin linear abnimmt $\delta r(\varphi_{rel}, r)$ (rechts)	152
6.25 Modellierung lateraler Störungen durch periodische Bahnkantenstörung $\delta WE(i)$ (links) und einem zum Drehwinkel φ_{rel} und dem Radius r gekoppelten Seitenfehler der Bahn $\delta y(\varphi_{rel}, r)$, der z.B. durch eine exzentrische Einspannung der gegenüberliegenden Rollenseite entsteht (rechts)	153

6.26 Modellierung einer tangentialen Störung durch eine gleichmäßige Dehnung aller Bahnelemente mit $\delta l(i)$, was im Vergleich zur ungedehnten Bahn zu einem linear ansteigenden Lagefehler jedes einzelnen Bahnelementes bzgl. des Drehwinkels $\delta\varphi(i)$ auf dem Wickel führt (links)	153
7.1 Simulation einer exzentrisch eingespannten Fertigrolle in der Abwicklung (links), durch eine einfach periodische Störfunktion (Sinus) pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm exakt mit der Drehfrequenz des Wickels und formt einen kontinuierlich verlaufenden Frequenz-Chirp f_{FR} (rechts)	156
7.2 Simulation einer zweiseitig gequetschten Fertigrolle (links) durch eine zweifach periodische Störfunktion (Sinus) pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit der doppelten Rollendrehfrequenz $2f_{FR}$ (rechts)	158
7.3 Simulation einer dreiseitig gequetschten Fertigrolle (links) durch eine dreifach periodische Störfunktion (Sinus) pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit der dreifachen Rollendrehfrequenz $3f_{FR}$ (rechts)	159
7.4 Simulation einer einzelnen lokalen Deformation der Fertigrolle (links) durch eine entsprechend schmalbandige Störfunktion pro Umdrehung $\delta r(\varphi_{rel})$, die auf den idealen Wickel addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit vielen Obertönen der Rollengrundfrequenz f_{FR} (rechts)	160
7.5 Simulation einer unrunden Fertigrolle (links) durch eine konstant periodische Materialdickenschwankung $\delta T(i)$ (mit der Frequenz f_1), die auf die ideale Bahn addiert wird (oben); die Störung des Radius $r(i)$ zeigt sich im Orts-Frequenz Spektrogramm mit einer systematischen Verstärkung der Obertöne, exakt bis zur Störfrequenz f_1 der ursächlichen Materialdickschwankung (rechts)	161
7.6 Modellierung einer konstant periodischen Bahnkantenstörung durch eine axiale Untermesservibration, die zu konzentrischen Ringstrukturen auf der Rollenstirnseite führen (links) und eine horizontale Orts-Frequenzsignatur f_1 im Spektrogramm bilden (rechts)	163

7.7	Systematischer Zusammenhang zwischen den Ringstrukturen auf der Rollenstirnseite (links) in einem kartesischen Koordinatensystem bzgl. Drehwinkel φ_{rel} und Radius r und der Orts-Frequenzsignatur im Spektrogramm (rechts) am Beispiel einer konstant periodischen Untermesservibration (f_1)	164
7.8	Gespiegelte Rollendrehfrequenz als Störfrequenz f_1 in der Bahnkante, welche eine Exzentrizität in vorausgegangener Umrollung der Fertigrolle simuliert	166
7.9	Eine in die Bahnkante geschnittene Mutterrollendrehfrequenz f_{MR} mit Überschneidungen bei Halb- ($b = \frac{1}{2}$) und Drittelfrequenzen ($b = \frac{1}{3}$ bzw. $b = \frac{2}{3}$) der Rollengrundfrequenz führen zu mittel (***) und sehr schwach (*) ausgeprägten Ringmustern im Wickel (links)	167
7.10	Eine zur Rollendrehfrequenz parallel verlaufende Störfrequenz f_1 im Spektrogramm (rechts) hinterlässt keine Ringmuster auf der Rollenstirnseite (links)	168
7.11	Überlagerung mehrerer Bahnkantenstörungen (f_1 , f_2 und f_3) führen zu sehr schwer interpretierbaren Ringmustern im Wickel (links); Im Spektrogramm (rechts) bleiben alle Informationen gut differenzierbar	169
7.12	Modellierung einer lokal sehr begrenzten impulsartigen Bahnkantenstörung pro Rollenumdrehung (Kratzer) auf der Rollenstirnseite (links) führt zu extrem vielen Obertönen, welche in Kombination mit einer Unterabtastung ($f_s = 10/m$) wiederum zu vielen Aliasfrequenzen im Basisband führen, wodurch schließlich eine Gitternetzstruktur im Spektrogramm (rechts) sichtbar wird	170
7.13	Modellierung einer plötzlichen aber dauerhaften Änderung (Sprung) im lateralen Bahnlauf zeigt sich als Offset im Wickel (links) und als vertikale Linie im Spektrogramm (rechts)	171
7.14	Kurzzeitiger Phasensprung in der Messervibration erzeugt im Spektrogramm eine vertikale Signatur, die eindeutig von der ursächlichen Messerfrequenz (f_1) ausgeht (rechts); Auf der Rollenstirnseite (links) ist der Phasensprung dagegen visuell nicht erkennbar	172
7.15	Veranschaulichung einer tangentialen Lagenverschiebung über das Verdrehen einer konstant periodischen Bahnkantenstörung (z.B. Untermesser); Referenzrolle ohne Nip induzierte tangentiale Lagenverschiebung (links); Nip induzierte tangentiale Lagenverschiebung simuliert durch eine zusätzliche Bahndehnung $\Delta\epsilon = 0,01\%$ (rechts)	173
7.16	Die Überlagerung zweier identischer Drehfrequenzen auf eine unterschiedlich stark gedehnte Bahn ($\Delta\epsilon = 0,1\%$) erzeugt sehr kleine Frequenzabweichungen zwischen beiden Störfrequenzen, die sich als Schwebungseffekt im Spektrogramm zeigen (rechts); bei Wiederaufwicklung einer so gestörten Bahn entsteht ein konzentrisches Ringmuster auf der Rollenstirnseite (links)	175

8.1	Fünf Beispielrollen mit Fertigrollendrehfrequenz in der Bahnkante	179
8.2	Vergleich des Frequenzverlaufs der Fertigrollendrehfrequenz (links) mit dem Verlauf des Rollendurchmessers am Abwickler der Druckmaschine (rechts) .	180
8.3	Fertigrollendrehfrequenzmuster in verschiedenen Ausprägungen	182
8.4	Fertigrollendrehfrequenz mit verschiedenen Ausprägungen	183
8.5	Fünf Beispielrollen mit Mutterrollendrehfrequenz in der Bahnkante	184
8.6	Die Mutterrollendrehfrequenz f_{MR} erstreckt sich bei einer entsprechenden Anordnung der Rollen über die einzelnen Rollensets als ein kontinuierlicher abfallender Frequenzverlauf	185
8.7	Kein Nachweis über Mutterrollendrehfrequenz in der Bahnspannung im Bahnabschnitt „Abwicklung“ bei WT_{UW}	186
8.8	Obertonspektrum der Mutterrollendrehfrequenz, die zu einer Umfangslagerung der Mutterrolle passen	187
8.9	Obertonspektrum der Mutterrollendrehfrequenz, die zu einer axialen Lagerung der Mutterrolle passen	188
8.10	Fünf Beispielrollen von Papierlieferant 4 mit einem charakteristischen V-Muster in der Bahnkante	189
8.11	Fünf Beispielrollen von Papierlieferant 6 mit einem charakteristischen V-Muster in der Bahnkante	189
8.12	Beispielrolle ID 10371 von Papierhersteller 4 mit charakteristischem V-Muster in der Bahnkante	191
8.13	Ergebnisspektren zweier simulierter Störsignale x_1 und x_2 bei additiver Signalüberlagerung (links) und idealer multiplikativer Signalmischung (rechts)	192
8.14	Ergebnisspektren zweier simulierter Störsignale x_1 und x_2 bei nichtlinearer Verzerrung mit dämpfend nichtlinearer Kennlinie $g(x)$ und verschiedenen Gleichanteilen	193
8.15	Abgleich von modellierten Intermodulationsprodukten auf Basis der Eingangsfrequenzen f_1 und f_2 bei nichtlinearer Verzerrung mit dem realen Rollenbeispiel ID 10371	194
8.16	Beispielrollen mit Störungen durch Messervibrationen in der Bahnkante .	196
8.17	Rollen zweier unterschiedlicher Papierhersteller mit Bahnkantenstörungen aus Messervibration mit variablem Overspeed (links: Rolle 10989) und konstantem Overspeed (rechts: Rolle 11770)	197
8.18	Beispiel (Rolle 10599) mit Obertönen der Unter- und Obermesser	199
8.19	Fünf Beispielrollen zeigen eine impulsartige Bahnlaufstörung, die durch einen plötzlichen Materialwechsel innerhalb einer Fertigrolle (Splice) verursacht wird und sich als solche entlang der Druckmaschine verstärkt	201

8.20 Splice als impulsartige Bahnlaufstörung (links) und Hilfsinformationen in der Bahnkante (rechts)	203
8.21 Durch Kombination verschiedener Informationen aus den beiden Spektrogrammen \hat{X}_3^c und \hat{X}_2^e kann der Impuls als Splice identifiziert werden. Dadurch, dass der Peak nicht im Gleichanteil liegt, kann daraus abgeleitet werden, dass sich das CD-Profil der Materialeigenschaften zwischen den beiden aneinandergeklebten Bahnen nicht besonders unterscheidet. Der Impuls entsteht durch den Phasensprung in den Materialschwankungen.	204
8.22 Durch Kombination verschiedener Informationen aus den beiden Spektrogrammen \hat{X}_3^c und \hat{X}_2^e kann der Impuls als Splice identifiziert werden. Dadurch, dass sich der Peak im Gleichanteil befindet, kann daraus abgeleitet werden, dass sich das CD-Profil der Materialeigenschaften zwischen den beiden aneinandergeklebten Bahnen stark unterscheidet.	205
8.23 Fünf Beispielrollen mit Inhomogenität in den Materialeigenschaften	207
8.24 Exemplarisch zeigt Rolle ID 10626 eine besonders starke materialinduzierte laterale Bahnlaufstörung, die im gefilterten \hat{X}_3^c Spektrogramm isoliert zu beobachten ist	209
8.25 Detailanalyse des niederfrequenten stochastischen Rauschmusters zeigt, dass seine Struktur entlang der Druckmaschine identisch ist, in Phase liegt und damit zur Bahn ortsfest ist und sich außerdem konsequent verstärkt	210
8.26 Gegenüberstellung der Bahnkantenspektrogramme entlang der Druckmaschine (oben) mit zwei verschiedenen Zeitreihenausschnitten I. (mitte) und II. (unten) bzgl. der materialinduzierten Bahnlaufstörung $a)$ und zweier unterschiedlicher extern induzierter Bahnlaufstörungen $b_1)$ und $b_2)$	211
8.27 Rolle ID 11619 zeigt, dass eine zusätzliche Umrollung auf einem Klinikroller (ohne Bahnkantenschnitt) zu entsprechenden initialen Lagefehlern auf dem Wickel führt,	212
8.28 Statistik der Standardabweichungen über alle validen Messreihen der Bahnkantensensoren	214
8.29 Bahndruckspannungsdaten der Rolle ID 10626 zeigen exemplarisch, dass es in MD-Richtung zu völlig anderen (streng periodische) Störungen kommt, die in der Orts-Frequenzstruktur nicht zu den materialinduzierten niederfrequenten CD-Bahnlaufstörungen passen	215
8.30 Die Gegenüberstellung von Bahnfeuchtigkeitsdaten (WM_{UW}) mit Bahnlaufdaten bzgl. CD und MD (WE_{PU10} und WT_{PU12}) über jeweils 300 Rollen von drei verschiedenen Papiermaschinen, bei jeweils identischer Rapportlänge, zeigt keinen signifikanten Einfluss der Bahnfeuchtigkeitsschwankungen auf die grundlegende Charakteristik der Bahnlaufstörungen in CD und MD	216

8.31 Fünf Beispielrollen mit lateraler Bahnlaufstörung aus einer nicht idealen Abwicklung im Bahnabschnitt „Abwicklung“ (\hat{X}_1^b)	218
8.32 Exemplarische Rollen zeigen den charakteristischen kontinuierlichen Abfall der Amplitude bzgl. der Rollengrundfrequenz, die nach der impulsartigen Bahnlaufstörung in der Regel vollständig verschwindet	220
8.33 Asymmetrische exzentrische Lagerung der Rolle führt zu einer linear abfallenden Bahnlaufstörung mit der Rollengrundfrequenz (hier bzgl. δDS in CD-Richtung)	221
8.34 Die abrupte Dämpfung der Abwicklungsstörung hängt mit einem extern induzierten Bahnlaufimpuls zusammen	222
8.35 Verlängerter Bahnweg durch Rotation des Abwicklers vor einem fliegenden Rollenwechsel im letzten Drittel des Rollenzyklus	223
8.36 Abrupt verstärkte Dämpfung der Abwicklungsstörung ist nicht über mehr Aktion der Tänzerwalze erklärbar	224
8.37 Bewegung der Tänzerwalze direkt nach der Abwicklung im Vergleich zur seitlichen Bahnlaufregelung (WGS)	225
8.38 Fünf Beispielrollen mit einer Vielzahl an rotationsperiodischen Störungen in der Bahnspannung bei WT_{PU7}	226
8.39 Beobachtung der ersten 500 aufeinander folgende Rollen im Datensatz über einen Beobachtungszeitraum von rund 3 Monaten bzgl. WT_{IPU} zeigt, dass immer wieder dieselben konstant periodischen Frequenzen mit variierender Intensität auftreten	227
8.40 Bahnspannungsvariationen der exemplarischen Rolle ID 13115 entlang der Druckmaschine zeigen immer wieder dieselben konstanten Frequenzen, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und häufig als Schwebung (Periodizität der Amplitude)	228
8.41 Abgleich der berechneten Drehfrequenzen sämtlicher in der Druckmaschine verbauten Walzen mit der Beobachtung der Bahnspannungsvariation bei WT_{IPU} über 500 Rollen	229
8.42 Abgleich der berechneten Drehfrequenzen mit Bahnspannungsdaten entlang der Druckmaschine bzgl. zwei unterschiedlicher Druckzylinderumfänge U_L .	230
8.43 Schematische Darstellung der Individualität der einzelnen Walze-Bahn-Walze Abschnitte	233
8.44 Zuordnung von Intermodulationsprodukten exemplarischer Walzenkombinationen bei exemplarischer nichtlinearer Verzerrung $g(x)$	234

8.45 Demonstration der Erklärbarkeit von zwei exemplarischen und besonders stark ausgeprägten, niederfrequenten, periodischern, realen Bahnspannungsschwankungen, anhand Rolle ID 10626, durch zwei unterschiedlich nichtlinear verzerrte rotationsperiodische Störungen zweier unterschiedlicher Walzenkombinationen (L und K bzw. B und A)	235
8.46 Prototypische Rollen, welche die typische Charakteristik der relevantesten CD- und MD-Registerstörungen veranschaulichen	238
8.47 Schematischer Zusammenhang zwischen Bahnkantenstörung und lateraler Bahnlauftörung bei einer Reaktion durch die WGS	240
8.48 Abgleich von CD-Registerdaten entlang der Maschine mit Bahnkantendaten am Beispiel der Rolle ID 10626	241
8.49 Sukzessive Verstärkung einer impulsartigen CD-Registerstörung aufgrund eines Splices innerhalb der Fertigrolle	242
8.50 Komplexe Systematik entlang der Druckmaschine einer durch eine Mutterrollendeformation verursachten CD-Registerstörung	243
8.51 Abgleich von MD-Registerdaten entlang der Maschine mit Bahnspannungsdaten am Beispiel der Rolle ID 10626	245
8.52 Signifikanter Regelerfolg der MD-Registerregelung nur im Frequenzbereich $k < 0,01/m$ beobachtbar	246
8.53 Abgleich der unterabgetasteten MD-Passerabweichung ($f_s = 1/RL$), mit hochfrequent abgetasteten ($f_s = 10/m$) und identisch unterabgetasteten ($f_s = 1,002/m$) Bahnspannungsdaten sowie einer davon leicht abweichenden Abtastung ($f_s = 0,9/m$) am Beispiel der Rolle ID 11793	247
8.54 Schema einer hochfrequenten Registerstörung (schwarz), welche durch eine Unterabtastung zu einer Alias Registerstörung führt (rot), die selbst bei bestmöglicher Kompensation der Regelung nicht effektiv ausgeregelt werden kann (blau) sondern im Vergleich zu einer unterdrückten Kompensation (grün) sogar zu doppelt so großen Passerabweichungen führt	248
8.55 Typische MD-Registerstörung, die aus der Abwicklung der Fertigrolle in der Druckmaschine stammt und je nach Druckwerkreferenzierung konstant bleibt oder vollständig verschwindet	249
8.56 Statistik der Registerschwankungen als Standardabweichung entlang der Druckmaschine bzgl. aller validen Rollen für CD-Register (links) und MD-Register (rechts)	251
A.1 Mittelwert der Seitenbewegung zeigt den relativen generellen Pfad der Bahn durch die konkrete Rollentiefdruckmaschine [17]	iv

A.2 Standardabweichung der Bahnkantenmessungen zeigt auch bei deaktivierter Registerregelung eine sukzessive Verstärkung der seitlichen Bahnlaufschwankungen entlang der konkreten Rollentiefdruckmaschine [17]	iv
A.3 CD-Registerschwankung bei deaktivierter Registerregelung (Setting B) [17]	v
A.4 CD-Registerschwankung bei deaktivierter Registerregelung (Setting A) [17]	v
A.5 MD-Registerschwankungen (B)[17]	vi
A.6 MD-Registerschwankungen (A)[17]	vi
A.7 Frequenzspektren der lateralen Bahnlaufschwankung über jeweils alle Mittel- und Randrollen (Setting A-A2) [17]	vii
A.8 Beobachtung der lateralen Bahnlauf- und Registerschwankungen im Frequenzspektrum bzgl. ID10 entlang der Druckmaschine (Register Regelungsstrategie A)	vii
A.9 Viele unbekannte Informationen in Bahnkante [17]	viii
A.10 Zeitreihen und Frequenzspektren der Bahnkantenmessungen entlang der Druckmaschine zeigen bei steigender Frequenz eine umso größere Dämpfung bzgl. extern auf den seitlichen Bahnlauf eingebrachter Störungen	x
A.11 Die definierte initiale Bahnlaufstörung aus dem ersten Durchlauf des Oszillationsversuch wird im zweiten Durchlauf durch die Druckmaschine nur dann durch die Bahnlaufregelung (WGS) ausgeregelt, wenn sie größer als 0,15 mm ist, was die effektive Totzone der Bahnlaufregelung offenbart	xi
A.12 Versuchsaufbau am Klinikroller	xii
A.13 Bahnkantenmessung kurz vor Schneidpartie (links) und Fertigrolle im Walzenbett (rechts)	xiii
A.14 Rolle springt 2 mal pro Rollenumdrehung gut sichtbar auf der hinteren Tragwalze	xiii
A.15 Die Auswirkungen der charakteristischen Rollenvibration im Walzenbett (2 Sprünge pro Umdrehung auf vorderer Tragwalze) bis zurück zum Slitter zeigen sich in konkav abfallenden Linien (gestrichelt), die genau der 2x Harmonischen und deren Obertönen (4x, 6x usw.) der ursprünglichen Rolle entsprechen	xiv
A.16 Die Bahnlaufschwankungen durch Auf- und Abwicklung führen bei Überkreuzung an einem bestimmten Punkt zum Aufschaukeln der Rolle im Walzenbett. Durch die Vermischung beider Vibratonen entstehen Intermodulationsprodukte	xvi

Tabellenverzeichnis

1.1	Verwendete Notationen nach Auftreten im Dokument	5
5.1	Übersicht der wesentlichen Komponenten eines Kommunikationssystems in der Nachrichtentechnik und entsprechende Analogien in der spezifischen Domäne „Rolle-zu-Rolle Prozesskette“	114
6.1	Übersicht verfügbarer Metadaten je Rolle im MSDIRPP Datensatz [15] . .	119
6.2	Übersicht verfügbarer Sensordaten je Rolle im MSDIRPP Datensatz [15] . .	120
6.3	Übersicht der verarbeiteten Materialien im MSDIRPP Datensatz [15] . . .	121
6.4	Frequenzbereiche bzw. Bandbreiten der durch die einzelnen Sensoren abgetasteten Übertragungskanäle (RL = Rapportlänge)	124
6.5	STFT Parametrierung und Spektrogramm Einstellungen	127
6.6	Übersicht prinzipieller Störfunktionen, die auf die Rolle oder die Bahn angewandt werden	152
8.1	Theoretische Messerfrequenzen des Maschinenrollers von Papierfabrik 4 . .	198
8.2	Durchmesser D , Umfang U bzw. Wellenlänge λ und davon abgeleitete Drehfrequenz als ortsbezogene Wellenzahl k der verbauten Walzen in der Tiefdruckmaschine	229
A.1	Versuchsmatrix mit sämtlichen Kombinationen von Kartonherstellungsparametern und Registerregelungsstrategien bzgl. CD und MD, die über eine eigenständige Experiment ID zuordenbar wird [17]	ii
A.2	Exemplarischer P-P-Plot für CD-Registerdaten in PU9 zeigt eine breite Übereinstimmung mit einer Normalverteilung [17]	iii

Literaturverzeichnis

- [1] ATLAS, L. E. ; BERNARD, G. D. ; NARAYANAN, S. B.: Applications of time-frequency analysis to signals from manufacturing and machine monitoring sensors. In: *Proceedings of the IEEE* 84 (1996), Nr. 9, S. 1319–1329. <http://dx.doi.org/10.1109/5.535250>. – DOI 10.1109/5.535250. – ISSN 00189219
- [2] BENSON, Richard C.: Lateral Dynamics of a Moving Web With Geometrical Imperfection. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* (2002), Nr. 124, S. 25–34. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1435643>. – DOI 10.1115/1.1435643
- [3] BOASHASH, Boualem: *Time-frequency signal analysis and processing: A comprehensive reference*. 2. edition. Elsevier, 2016 (EURASIP and Academic Press series in signal and image processing). – ISBN 9780123984999
- [4] BOBST GROUP SA: *BOBST Connect / BOBST*. <https://www.bobst.com/atde/ueber-bobst/bobst-auf-kurs/bobst-connect/>. Version: 2023
- [5] BRANCA, C. ; PAGILLA, P. R. ; REID, K. N.: Computation of span length variations due to out-of-round material rolls. (2009). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321937/oksd_icwh_2009_branca1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] BRANCA, C. ; PAGILLA, P. R. ; REID, K. N.: Modeling and identification of the source of oscillations in web tension. (2009). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321948/oksd_icwh_2009_branca2.pdf?sequence=1
- [7] BRANCA, Carlo ; PAGILLA, Prabhakar R. ; REID, Karl N.: Adaptive feedforward based control strategy for attenuation of periodic tension oscillations in roll-to-roll manufacturing. In: *Twelfth International Conference on Web Handling (IWWeb), Stillwater, OK*. (2013). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321992/oksd_icwh_2013_branca1.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- [8] BRANCA, Carlo ; PAGILLA, Prabhakar R. ; REID, Karl N.: On the governing equations for web tension with out-of-round rolls. In: *International Conference on Web Handling (2013)* (2013). <https://hdl.handle.net/11244/322003>

- [9] BST GMBH: *SMARTData*. <https://www bst elexis group loesungen smartdata>. Version: 2023
- [10] CHRISTINE, Steinhoff ; WISSENSCHAFTLICHE DIENSTE, Deutscher B. (Hrsg.): *Aktueller Begriff - Industrie 4.0*. <https://www bundestag de/resource/blob/474528 cae2bfac57f1bf797c8a6e13394b5e70/industrie-4-0-data.pdf>
- [11] CRAIG, Sean: Managing overspeed in tangent shear-slitting applications to reduce edge defects. (2015). https://www maxcess se/sites/default/files/documents/files/Overspeed_AngelHair pdf
- [12] DATTNER, Michael ; BOHN, Daniel: Cross-Linked Quality Assurance in the Web Processing Industry. Version: 2018. http://dx doi org/10 1007/978-3-662-55232-2_20. In: JASPERNEITE, Jürgen (Hrsg.) ; LOHWEG, Volker (Hrsg.): *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 (Technologien für die intelligente Automation). – DOI 10.1007/978-3-662-55232-2_20. – ISBN 978-3-662-55231-5, S. 258–269
- [13] DIE PAPIERINDUSTRIE E. V.: *Papiermaschine*. <https://www papierindustrie de/presse/mediathek/bilder/altpapier/grafiken>. Version: 21.02.2023
- [14] DIENES USA: *6 of the most Common Problems found in Shear Slitting - Dienes USA*. <https://www dienesusa com/6-of-the-most-common-problems-found-in-shear-slitting/>. Version: 2020
- [15] ENK, Tobias: *Multivariate Sensor Dataset of an Industrial Rotogravure Printing Press (MSDIRPP)*. <https://publicdata fdm uni-wuppertal de/items/38bed131-9d93-47c5-bbb1-e5e15726fe87>. Version: 2022
- [16] ENK, Tobias ; URBAN, Peter: Multivariate Sensor Dataset of an Industrial Rotogravure Printing Press (MSDIRPP). In: *48th Annual iarigai Conference Greenville, SC USA* (2020). http://dx doi org/10 14622/Advances_48_2022_21. – DOI 10.14622/Advances_48_2022_21
- [17] ENK, Tobias ; URBAN, Peter ; DATTNER, Michael ; VOMHOFF, Hannes ; HEISE, Axel: Influence of paperboard production on web movement and register quality in printing process. In: *Journal of Print and Media Technology Research* 9 (2020), Nr. 2, S. 103–114. <http://dx doi org/10 14622/JPMTR-2009>. – DOI 10.14622/JPMTR-2009. – ISSN 2414-6250

- [18] FREYER, Ulrich: *Nachrichten-Übertragungstechnik: Grundlagen, Komponenten, Verfahren und Systeme der Telekommunikationstechnik ; mit zahlreichen Beispielen, Übungen und Testaufgaben*. 6., neu bearb. Aufl. München : Hanser, 2009 (Lernbücher der Technik). – ISBN 9783446414624
- [19] GABERSON, Howard A.: A Comprehensive Windows Tutorial. In: *Sound and Vibration - Instrumentation Reference Issue* (2006). <http://www.sandv.com/downloads/0603gabe.pdf>
- [20] GAJICIC, Mihael: *Untersuchung der Fördereigenschaften von mehrschichtigen Zylinderaufzügen*. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2020. <http://dx.doi.org/10.25926/55FM-9D03>. – DOI 10.25926/55FM-9D03
- [21] GALLE, Alexander: *Regelungstechnische Untersuchung der Bedruckstoffförderung in Rollendruckmaschinen*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2007. <https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A18800/attachment/ATT-0/>
- [22] GAO, Xingliang ; URBAN, Xingliang: *Schwingungsverhalten von Flexodruckwerken: Abschlussbericht: Gefördertes Forschungsvorhaben der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen (2003)*
- [23] GOOD, James K. ; ROISUM, David R.: *Winding: Machines, mechanics and measurement*. Norcross, Ga. : TAPPI Press, 2008. – ISBN 193207869X
- [24] GRÜNIGEN, Daniel C.: *Digitale Signalverarbeitung: Mit einer Einführung in die kontinuierlichen Signale und Systeme*. 5., neu bearbeitete Auflage. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2014 (Hanser eLibrary). <http://dx.doi.org/10.3139/9783446439917>. – ISBN 978-3-446-44079-1
- [25] GÜLDENBERG, Bernd: *Einfluss der nipinduzierten Effekte auf den Wickelprozess von Papier: Schriftenreihe Heft 00.2*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2000
- [26] HARS, Christoph: Der Bahnlauf durch eine Rollenrotationsdruckmaschine. In: *VDD Jahrbuch 2008* (2008). http://druckingenieure.de/wp-content/uploads/2016/05/VDD_Jahrbuch_2008-2.pdf
- [27] HEIDELBERGER DRUCKMASCHINEN AG: *White Paper: Smart Print Shop Printect Production Commercial*. https://www.heidelberg.com/global/media/en/global_media/products___prinect/pdf_41/Heidelberg_WP_SmartPrintShop.pdf

- [28] HENNECKE, Manfred ; SKROTZKI, Birgit: *Hütte*. 35. Auflage. Berlin and Heidelberg : Springer Vieweg, 2023 (Springer Reference Technik). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-64375-4>. – ISBN 978-3-662-64374-7
- [29] HERING, Ekbert ; BRESSLER, Klaus ; GUTEKUNST, Jürgen: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 (Springer-Lehrbuch). <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1519630>. – ISBN 9783642054990
- [30] HOLIK, Herbert: *Handbook of paper and board*. Weinheim : Wiley-VCH, 2006. <http://dx.doi.org/10.1002/3527608257>. <http://dx.doi.org/10.1002/3527608257>. – ISBN 9783527608256
- [31] IBA SYSTEMS: *iba-System*. <https://www.iba-ag.com/de/>. Version: 2024
- [32] IGGESUND PAPERBOARD AB: *Reference Manual*. <https://www.iggesund.com/ko/insights/paperboard-know-how/reference-manual/reference-manual-publication/>
- [33] JORKAMA, M.: Winder Vibration; Causes, Defects, and Remedies: Metso Paper FINLAND. In: *Eleventh International Conference on Web Handling (IWEB), Stillwater, OK*. (2011). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321970/oksd_icwh_2011_jorkama.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [34] JORKAMA, M. ; VAN HERTZEN, R.: Two-Drum Winder Run Simulation Model. (1997). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321723/oksd_icwh_1997_jorkama.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [35] JORKAMA, M. ; VAN HERTZEN, R.: Wound roll generated unstable vibration. (2003). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321850/oksd_icwh_2003_jorkama.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [36] JORKAMA, M. ; VAN HERTZEN, R.: Wound roll generated unstable vibration on a two-drum winder. (2005). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321881/oksd_icwh_2005_jorkama.pdf?sequence=1
- [37] KAMPF SCHNEID- UND WICKELTECHNIK GMBH & Co. KG: *KAMPF Schneid- und Wickeltechnik - Converting 4.0*. <https://www.jagenberg.com/de/newsroom/news-einzelansicht/kampf-schneid-und-wickeltechnik-converting-40/>. Version: 10.01.2020

- [38] KAMPF SCHNEID- UND WICKELTECHNIK GMBH & Co. KG: *the@vanced*. <https://www.kampf.de/de/digital-customer-solutions/thevanced/>. Version: 2023
- [39] KANG, Hyun-Kyoo ; LEE, Chang-Woo ; SHIN, Kee-Hyun: A novel cross directional register modeling and feedforward control in multi-layer roll-to-roll printing. In: *Journal of Process Control* 20 (2010), Nr. 5, S. 643–652. – ISSN 09591524
- [40] KANG, Hyun-Kyoo ; LEE, Chang-Woo ; SHIN, Kee-Hyun: Novel Modeling of Correlation between Two-Dimensional Registers in Large-Area Multilayered Roll-to-Roll Printed Electronics. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 50 (2011), S. 016701. <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.016701>. – DOI 10.1143/JJAP.50.016701. – ISSN 0021–4922
- [41] KANG, Hyun-Kyoo ; LEE, Chang-Woo ; SHIN, Kee-Hyun: Two-dimensional Register Modeling and Control in Multi-layer Roll-to-roll e-Printing Systems. In: *IFAC Proceedings Volumes* 44 (2011), Nr. 1, S. 6763–6770. <http://dx.doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03667>. – DOI 10.3182/20110828-6-IT-1002.03667. – ISSN 14746670
- [42] KARLOVITS, Igor: Technologies for using Big Data in the paper and printing industry. In: *Journal of Print and Media Technology Research* (2017), Nr. 2-2017. <http://dx.doi.org/10.14622/JPMTR-1706>. – DOI 10.14622/JPMTR-1706. – ISSN 2414–6250
- [43] KIPPHAN, Helmut (Hrsg.): *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2000 (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-57024-7>. – ISBN 9783642570247
- [44] KOENIG & BAUER AG: *LogoTronic*. <https://www.kenig-bauer.com/de/service/sheetfed/produktivitaet-service-complete/logotronic/>. Version: 2023
- [45] LAND, Cecilia: *Baggy paper webs: Effect of uneven moisture and grammage profiles in different process steps*, Karlstad University, PhD Thesis, 2010. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:354209/FULLTEXT01.pdf>
- [46] LEE, Bang-Eop: *Buckling Analysis of Starred Roll Defects in Center Wound Rolls*, Oklahoma State University, PhD Thesis, 1991. <https://core.ac.uk/download/pdf/215265106.pdf>

- [47] LEE, Jongsu ; BYEON, Junhyeon ; LEE, Changwoo: Theories and Control Technologies for Web Handling in the Roll-to-Roll Manufacturing Process. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 7 (2020), Nr. 2, S. 525–544. <http://dx.doi.org/10.1007/s40684-019-00185-3>. – DOI 10.1007/s40684-019-00185-3. – ISSN 2288-6206
- [48] LEE, Jongsu ; ISTO, Pekka ; JEONG, Hakyung ; PARK, Janghoon ; LEE, Dongjin ; SHIN, Kee-Hyun: Register mark measurement errors in high-precision roll-to-roll continuous systems: The effect of register mark geometry on measurement error. In: *Applied Physics Letters* 109 (2016), Nr. 14, S. 141602. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964262>. – DOI 10.1063/1.4964262. – ISSN 0003-6951
- [49] LEE, Jongsu ; SEONG, Jinwoo ; PARK, Janghoon ; PARK, Sung sik ; LEE, Dongjin ; SHIN, Kee-Hyun: Register control algorithm for high resolution multilayer printing in the roll-to-roll process. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 60-61 (2015), S. 706–714. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.01.028>. – DOI 10.1016/j.ymssp.2015.01.028. – ISSN 08883270
- [50] LINNA, Hannu ; PAROLA, Markku ; VIRTANEN, Jorma: Better productivity by measuring web tension profile. In: *55th Appita Annual Conference, Hobart, Australia 30 April-2 May 2001: Proceedings* (2001), 323–329. <https://cris.vtt.fi/en/publications/better-productivity-by-measuring-web-tension-profile>
- [51] LUNDSTRÖM, J. ; VERIKAS, A. ; TULLANDER, E. ; LARSSON, B.: Assessing, exploring, and monitoring quality of offset colour prints. In: *Measurement* 46 (2013), Nr. 4, S. 1427–1441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.037>. – DOI 10.1016/j.measurement.2012.11.037. – ISSN 02632241
- [52] MAHNKE, Wolfgang ; LEITNER, Stefan-Helmut ; DAMM, Matthias: *OPC unified architecture*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68899-0>. – ISBN 978-3-540-68898-3
- [53] MC DONALD, J. D. ; HAMEL J. ; MÉNARD A.: Out-of-round paper rolls. In: *Pulp and Paper Canada* (2005), Nr. 106, S. 110–115
- [54] McDONALD, J. D. ; MÉNARD, A.: Layer-to-Layer Slippage Within Paper Rolls During Winding. In: *Journal of Pulp and Paper Science* (1999), Nr. Vol. 25 No. 4 April 1999, S. 148–153

- [55] MESSER, Markus: *Erstellung und Verwendung eines MATLAB-Werkzeugs zur Schallmessung und -analyse mit Laptop und darin enthaltener Sensorik und Messtechnik.* <https://druckingenieure.de/publikationen/publikation-von-vdd-mitgliedern/>
- [56] MIETKE, Detlef: *Überlagerung periodischer Signale.* <https://www.elektroniktutor.de/signalkunde/signadd.html>. Version: 12.02.2023
- [57] MIETKE, Detlef: *Signalverzerrungen und der Klirrfaktor.* <https://www.elektroniktutor.de/elektrophysik/verzerrt.html>. Version: 20.01.2024
- [58] NEUSER, J. ; HARS, Christoph: *Der zweiachsige Dehnungsverlauf in einer Materialbahn bei ihrem Durchlauf durch eine Rollenrotationsdruckmaschine und die Rückwirkungen auf das Druckerzeugnis,* Technischen Hochschule Darmstadt, Institutsbericht 1/1993, 1993. https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14083/1/Neuser_Hars_1993_Zweiachsige%20Dehnungsverlauf%20in%20einer%20Materialbahn_Institutsbericht.pdf
- [59] NI.COM: *Erfassen von Analogsignalen: Bandbreite, Nyquist-Abtasttheorem und Alias-Effekt.* <https://www.ni.com/de-de/innovations/white-papers/06/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html>. Version: 19.03.2023
- [60] OLSHANSKY, Alexis: Roll Bouncing. In: *Finishing and Converting Conference Proceedings* (1996), S. 119–128
- [61] PACHER, W. ; FRISCH, F. ; FUCHS, W. P.: Evaluation of misregister on multiple coated fine papers in sheet fed offset printing. In: *Journal of Print and Media Technology Research* (2015), Nr. 1-2015. <http://dx.doi.org/10.14622/JPMTR-1439>. – DOI 10.14622/JPMTR-1439. – ISSN 2414-6250
- [62] PAGILLA, Prabhakar R. ; DWIVEDULA, Ramamurthy V. ; ZHU, Yongliang ; PERERA, Lokukaluge P.: Periodic Tension Disturbance Attenuation in Web Process Lines Using Active Dancers. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 125 (2003), Nr. 3, S. 361–371. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1590678>. – DOI 10.1115/1.1590678
- [63] PARENT, Frédéric ; HAMEL JEAN: Measurement and correction of baggy edges on paper machines. In: *Paper Conference and Trade Show 2011 (PaperCon 2011)* (2011), S. 2444–2453

- [64] PARENT, Frédéric ; HAMEL JEAN: Evaluating the impact of non-uniform paper properties on web lateral instability on printing press. In: *Twelfth International Conference on Web Handling (IWELL), Stillwater, OK* (2013). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/322005/oksd_icwh_2013_parent.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [65] PARENT, Frédéric ; HAMEL JEAN ; AND McDONALD, David: Web lateral instability caused by nonuniform paper properties. In: *Tappi Journal* 1 (2022), Nr. Vol 21, S. 9–20
- [66] PAROLA, Markku ; BELETSKI, Nikolai: Tension across the paper web - A new important property. (2000), S. 293–298
- [67] PAROLA, Markku ; KALJUNEN, Timo ; BELETSKI, Nikolai ; PAUKKU, Juhani: Analysing Printing Press Runnability by Data Mining. In: *Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts, TAGA* (2003), S. 59–60
- [68] PAROLA, Markku ; KALJUNEN, Timo ; VUORINEN, Samppa: New methods for the analysis of the paper web performance on the press. In: *Advances in Printing Science and Technology: Proceedings of the 27th Research Conference of the International Association of the Research Institutes for the Printing, Information and Communication Industries* (2000), 203–218. <https://cris.vtt.fi/en/publications/new-methods-for-the-analysis-of-the-paper-web-performance-on-the->
- [69] PAROLA, Markku ; PAUKKU, Juhani ; VUORINEN, Samppa: Web widening and lateral movements of paper web in a printing press. In: *International Printing & Graphic Arts Conference* (2004), S. 245–250
- [70] PAROLA, Markku ; VUORINEN, Samppa ; LINNA, Hannu ; KALJUNEN, Timo ; BELETSKI, Nikolai: Modeliling the web tension profile in a paper machine. In: *The science of papermaking*, (2001), Nr. Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford,, 759–781. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/03/2001.1.759.pdf>
- [71] PAROLA, Markku ; VUORINEN, Samppa ; LINNA, Hannu ; KALJUNEN, Timo ; BELETSKI, Nikolai: Modelling the web tension profile in a paper machine. In: *12th Fundamental Research Symposium, Oxford* (2001), S. 759
- [72] PFEIFFER, J. D.: Analysis of the ring patterns formed when periodic distrubances affect roll edges. In: *Tappi Journal* (1989), S. 59–65

- [73] PLASSMANN, Wilfried: Grundlagen der Nachrichtenübertragung. Version: 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-07049-6_92. In: PLASSMANN, Wilfried (Hrsg.) ; SCHULZ, Detlef (Hrsg.): *Handbuch Elektrotechnik*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016. – DOI 10.1007/978-3-658-07049-6_92. – ISBN 978-3-658-07048-9, S. 1127–1145
- [74] QIU, Y. P. ; MILLAN, M. ; LIN, C. H. ; GERHARDT, T. D.: Nonlinear Properties of High Strength Paperboards. In: *Journal of Engineering Materials and Technology* 121 (1999), Nr. 3, S. 272–277. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2812375>. – DOI 10.1115/1.2812375. – ISSN 0094-4289
- [75] R-CYCLE: *R-Cycle Website*. <https://www.r-cycle.org/>. Version: 2023
- [76] RAUL, P. R. ; MANYAM, S. G. ; PAGILLA, P. R. ; DARBHA, S.: Web tension regulation with partially known periodic disturbances in roll-to-roll manufacturing systems. In: *2015 European Control Conference (ECC)* (2015), S. 678–683. <http://dx.doi.org/10.1109/ECC.2015.7330620>. – DOI 10.1109/ECC.2015.7330620
- [77] ROHLING, Hermann: *Einführung in die Informations- und Codierungstheorie*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1995 (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-91860-4>. – ISBN 9783322918604
- [78] ROISUM, David R.: Reading a Roll. (1997), 115–131. https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321739/oksd_icwh_1997_roisum.pdf?sequence=1
- [79] ROISUM, David R.: A mechanistic survey of accumulating, resonant, and self-exciting systems in web handling. (2009). https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321955/oksd_icwh_2009_roisum.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [80] ROISUM, David R.: *Roisum Library*. <https://www.stevenabbott.co.uk/abbottapps/RL/index.html>. Version: 2012
- [81] ROISUM, David R.: *Web20155b - History - Winder Vibration*. https://www.youtube.com/watch?v=LA_q3LgHS_c. Version: 2015
- [82] ROISUM, David R.: Taxonomy of web and winding defects. In: *Fifteenth International Conference on Web Handling (IWEB), Stillwater, OK* (2019). <http://dx.doi.org/10.15763/11244/320259>. – DOI 10.15763/11244/320259
- [83] ROISUM, David R.: *The measurement of web stresses during roll winding*, Oklahoma State University, PhD Thesis, May 1990. <https://core.ac.uk/download/pdf/215261337.pdf>

- [84] ROISUM, David R. ; WALKER, Timothy J. ; JONES, Dilwyn P.: *The Web Handling Handbook*. Lancaster, Pennsylvania : DesTech Publishing, 2020. – ISBN 978–1–60595–598–8
- [85] ROTHER, Astrid ; JELALI, Mohieddine ; SÖFFKER, Dirk: A brief review and a first application of time-frequency-based analysis methods for monitoring of strip rolling mills. In: *Journal of Process Control* 35 (2015), 65–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2015.08.010>. – DOI 10.1016/j.jprocont.2015.08.010. – ISSN 09591524
- [86] SCHABLE, Reinhold: Spotlight on Slitting: Axial, Radial Run Out Can Hurt Blades, Cut Quality: Spotlight on Slitting:. In: *Paper, Film & Foil Converter* (1992). https://www.maxcess.co.uk/sites/default/files/documents/files/additionals/Tidland_RunoutSlitting.pdf
- [87] SCHABLE, Reinhold: Spotlight on Slitting: Don't Overlook Importance Of Slitter-System Overspeed. In: *Paper, Film & Foil Converter* (1992)
- [88] SCHABLE, Reinhold: Spotlight on Slitting: Understanding Side Load Important in Shear Slitting. In: *Paper, Film & Foil Converter* (1992). https://www.maxcess.de/sites/default/files/documents/files/additionals/Tidland_SideLoadPressure.pdf
- [89] SCHABLE, Reinhold: Spotlight on Slitting: Annular rings offer clues. In: *Paper, Film & Foil Converter* (1993). https://www.maxcess.se/sites/default/files/documents/files/additionals/AnnularRings_SlitQuality.pdf
- [90] SCHABLE, Reinhold: A Guide to Slitting: A Compilation of Slitting Articles from Tidland. In: *converting magazine* (2003). https://www.maxcess.eu/sites/default/files/documents/files/Tidland_SlittingSeries.pdf
- [91] SCHNABEL, Holger: *Entwicklung von Methoden zur Registerregelung in Abhängigkeit der Bahnzugkraft bei Rollentiefdruckmaschinen: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss.*, 2009. 1. Aufl. Göttingen : Sierke, 2009. – ISBN 9783868441468
- [92] SCIPY: *scipy.signal.stft — SciPy v1.10.1 Manual*. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.stft.html>. Version: 19.02.2023
- [93] SEKI, Kenta ; KIKUCHI, Takayuki ; IWASAKI, Makoto: Tension Controller Design Considering Periodic Disturbance Suppression in Roll-to-Roll Web Handling Systems. In: *IEEJ Journal of Industry Applications* 9 (2020), Nr. 1, S. 36–42. <http://dx.doi.org/10.1541/ieejjia.9.36>. – DOI 10.1541/ieejjia.9.36. – ISSN 2187–1094

- [94] SESHADRI, Aravind ; PAGILLA, Prabhakar R. ; LYNCH, Jamie E.: Modeling Print Registration in Roll-to-Roll Printing Presses. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 135 (2013), Nr. 3, S. 409. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4023761>. – DOI 10.1115/1.4023761
- [95] SHELTON, John J.: *Lateral Dynamics of a moving web: PhD Thesis*, Oklahoma State University, Diss., July 1968
- [96] SHI, J. ; SMITH, J. ; MARKUM, R. ; GOOD, J. K.: Mechanics of cambered web belts on aligned rollers. In: *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Web Handling* (2019)
- [97] SHIELDS, George ; PEKAROVICOVA, Alexandra ; FLEMING, Paul D. ; PEKAROVIC, Jan: Papermaking Factors Affecting Lateral Web Position during Commercial Heat Set Web Offset Printing. In: *International Circular of Graphic Education and Research* (2018), Nr. 11, S. 14–23
- [98] SHIELDS, George ; PEKAROVICOVA, Alexandra ; FLEMING, Paul D. ; PEKAROVIC, Jan: Lateral paper web shifting during commercial heat set web offset printing. In: *Journal of Print and Media Technology Research* 9 (2020), Nr. 3, S. 163–173. <http://dx.doi.org/10.14622/JPMTR-2010>. – DOI 10.14622/JPMTR-2010. – ISSN 2414-6250
- [99] SHIELDS, George W.: *Papermaking Factors Affecting Lateral Web Position during Commercial Heat Set Web Offset Printing*, Western Michigan University, Master Thesis, 2017. https://scholarworks.wmich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3017&context=masters_theses
- [100] SHIN, Kee-Hyun ; JANG, Jeung-In ; KANG, Hyun-Kyoo ; SONG, Seung-Ho: Compensation method for tension disturbance due to an unknown roll shape in a web transport system. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 39 (2003), Nr. 5, S. 1422–1428. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2003.816508>. – DOI 10.1109/TIA.2003.816508. – ISSN 0093-9994
- [101] SID - SÄCHSISCHES INSTITUT FÜR DIE DRUCKINDUSTRIE: Passer und Papier. In: *Druck & Medien* (2013). <https://www.sidleipzig.de/fileadmin/files/fachartikel/2013/2013-12-druck-und-medien-passer-und-papier.pdf>
- [102] SIEMENS AG: Siemens optimiert Converting-Maschinen mit neuen Kompensationsfunk: Reference Number: PR2017030179DFDE. <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/>

siemens-optimiert-converting-maschinen-mit-neuen-kompensationsfunktionen.
Version: 2017

- [103] SIEVERS, L. ; BALAS, M. J. ; FLOTOW, A. von: Modeling of web conveyance systems for multivariable control. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 33 (1988), Nr. 6, S. 524–531. <http://dx.doi.org/10.1109/9.1247>. – DOI 10.1109/9.1247. – ISSN 00189286
- [104] SMITH, R. D.: *The Ultimate Roll and Web Defect Troubleshooting Guide*. 3rd Edition. TAPPI Press, 2014. – ISBN 9781595102294
- [105] SWANSON, Ronald P.: Lateral dynamics of non-uniform webs. In: *Tenth International Conference on Web Handling (IWEB), Stillwater, OK* (2009), Nr. Proceedings of the International Conference on Web Handling, 429. https://shareok.org/bitstream/handle/11244/321957/oksd_icwh_2009_swanson.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [106] UNGH, Jörgen ; NILSSON, Carl-Magnus ; VERIKAS, Antanas: Analysis of paper, print and press interaction from online measurements in a press room. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 22 (2007), Nr. 3, S. 383–387. <http://dx.doi.org/10.3183/npprj-2007-22-03-p383-387>. – DOI 10.3183/npprj-2007-22-03-p383-387. – ISSN 0283–2631
- [107] URBAN, Peter: *Vorlesungsskript Werkstoffkunde Papier*
- [108] VALMET: *Optimizing winding performance with data-driven analytics*. <https://www.valmet.com/board-and-paper/services-for-board-and-paper/process-and-production-optimization/winder-diagnostic/>. Version: 2023
- [109] VIRTANEN, Timo: *Fault diagnostics and vibration control of paper winders*. 2006 <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/2801/isbn9512284685.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [110] VOITH PAPER: *Voith Doppeltragwalzenroller: Flexible Technologien für ein breites Produktspektrum* (2004)
- [111] VOITH PAPER: Mit neuen Technologien die Qualität steigern: Magazin für Papiertechnik I Sonderausgabe Spezialpapiere. In: *twogether* (2008). https://voith.com/corp-de/voith-paper_twogethers200812_de.pdf
- [112] WANG, W. ; GOLNARAGHI, F. ; ISMAIL, F.: Condition monitoring of multistage printing presses. In: *Journal of Sound and Vibration* 270 (2004), Nr. 4-5, S. 755–766.

- [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00209-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00209-8). – DOI 10.1016/S0022-460X(03)00209-8. – ISSN 0022460X
- [113] WINDMÖLLER & HÖLSCHER KG: Mit RUBY heben Sie Ihre Produktion auf eine neue Stufe: Packaging 4.0. (2023). https://www.wh.group/media/services/iot_system_ruby/one_pager_ruby_1023_de.pdf
- [114] WOOD, Peter: Optimizing the Shear Slitting Process Summary. In: *PLACE, Conference, St. Louis, MO* (2007). <https://www.tappi.org/content/events/07place/papers/wood.pdf>
- [115] WRETSTAM, Sofia: *Characterisation of property variations in paperboard samples: Investigation of variations in thickness, surface roughness and tensile properties in paperboard*, KTH, Degree project in Fibre and Polymer Technology, second cycle, 2018. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1240203/FULLTEXT01.pdf>
- [116] XU, Zhuofei ; ZHANG, Chanchan ; LIU, Shanhui ; ZHANG, Wu ; ZHANG, Yafeng: Research on fault diagnosis of rolling bearings in roller-to-roller printing units based on siamese network. In: *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 42 (2023), Nr. 1, S. 403–419. <http://dx.doi.org/10.1177/14613484221119897>. – DOI 10.1177/14613484221119897. – ISSN 1461–3484
- [117] YANG, Hankang ; ENGELEN, Johan B. ; PANTAZI, Angeliki ; HÄBERLE, Walter ; LANTZ, Mark A. ; MÜFTÜ, Sinan: Mechanics of lateral positioning of a translating tape due to tilted rollers: Theory and experiments. In: *International Journal of Solids and Structures* 66 (2015), S. 88–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.029>. – DOI 10.1016/j.ijsolstr.2015.03.029. – ISSN 00207683
- [118] YANG, Hankang ; MÜFTÜ, Sinan: A General Model of Lateral Web Dynamics between Two Reels. In: *Proceedings of the 13th International Web Handling Conference (IWECB). June 3-5, 2013, Oklahoma State University, Stillwater, OK* (2013). <https://hdl.handle.net/11244/322004>
- [119] ZHANG, Wu ; ZHANG, Yafeng ; XU, Zhuofei ; YU, Dan: A Research on Fault Diagnosis of Rolling Bearing in Printing Press Based on Empirical Wavelet Transform and Symbolization. In: ZHAO, Pengfei (Hrsg.) ; YE, Zhuangzhi (Hrsg.) ; XU, Min (Hrsg.) ; YANG, Li (Hrsg.) ; ZHANG, Linghao (Hrsg.) ; ZHU, Rengao (Hrsg.): *Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging Technology and Materials*. Singapore : Springer Singapore and Imprint Springer, 2021 (Springer eBook Collection). – ISBN 978-981-16-0503-1, S. 495–503

- [120] ZHIVOMIROV, Hristo: STFT and ISTFT with Matlab Implementation. In: *TEM Journal* (2019), Nr. Volume 8, 56–64. <http://dx.doi.org/10.18421/TEM81-07>. – DOI 10.18421/TEM81-07
- [121] ZSCHIESCHANG, Torsten: *Schwingungsanalyse an Maschinen mit ungleichförmig übersetzenden Getrieben*, Technischen Universität Chemnitz, Dissertation, 14. Juli 2000
- [122] ZWART, Jake ; LINDGREN, Derek: Paper Machine Winder Vibration Testing Using TVDFT. Version: 2020. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-47721-9_1. In: DI MAIO, Dario (Hrsg.) ; BAQERSAD, Javad (Hrsg.): *Rotating machinery, optical methods & scanning LDV methods*. Cham : Springer International Publishing, 2020 (Proceedings of the 38th IMAC, a Conference and Exposition on Structural Dynamics 2020 / SEM). – DOI 10.1007/978-3-030-47721-9_1. – ISBN 978-3-030-47720-2, S. 1–16
- [123] ZWART, Jake ; TARNOWSKI, Walter: *Case Studies of Set Throw-outs*. https://www.academia.edu/6117956/Case_Studies_of_Winder_Roll_Throwouts
- [124] ZWART, Jake ; TARNOWSKI, Walter: Winder Vibration Related to Set Throw-outs. In: *89th Annual Meeting PAPTAC 2003* (2003). <https://www.spectrum-tec.com/PDFs/WinderRollThrowouts.pdf>

A Anhang

A.1 Druckversuche - Validierung 2 a)

Versuchsbeschreibung: Die Voruntersuchungen wurden 2020 in [17] bereits vorveröffentlicht und sind als Vorversuche im Rahmen dieser Arbeit entstanden. Die Versuche wurden auf derselben Rollentiefe druckmaschine und mit grundsätzlich vergleichbaren Substraten durchgeführt wie in der Fallstudie. Ziel der Voruntersuchungen war es herauszufinden, inwieweit Regelparameter der Registerregelung Einfluss auf die resultierende Registerqualität bzgl. verschiedener Papierqualitäten nehmen können. Außerdem sollte herausgefunden werden, welcher der drei Kartonherstellungsparameter für die Bahnlaufinstabilität am relevantesten ist. Für die Versuche wurden in einer Papierfabrik gezielt verschiedene Papierqualitäten produziert, die sich im Versuch über 13 Fertigrollen aufteilen. Jede der Rollen wurde auf der Druckmaschine mit unterschiedlich definierten Registerregelparametern verdruckt. Tabelle A.1 zeigt die Versuchsmatrix. Jede Experiment ID steht damit für eine bestimmte Versuchsbedingung.

Boardmaking Process				Reel number	Printing Process							
Boardmaking conditions					CD and MD register control strategies							
Name:	Δv	WS	CDP		Name:	A	B	C	D	E	A2	
Parameter:	Jet/wire Δv [m/min]	Wire shaker	CD position on tambour		MD:	Default	Off	Default	Default	Default	Default	
Value:	Default	Off	Middle	1 (ref.)	Experiment ID:	1	2	4	5	6	7	
	2	On	Middle	2		10	11	13	14	15	16	
	2	On	Edge	3		19	20	22	23	24	25	
	2	Off	Middle	4		28	29	31	32	33	34	
	2	Off	Edge	5		37	38	40	41	42	43	
	6	Off	Middle	6		46	47	49	50	51	52	
	6	Off	Edge	7		55	56	58	59	60	61	
	6	On	Middle	8		64	65	67	68	69	70	
	6	On	Edge	9		73	74	76	77	78	79	
	10	On	Middle	10		82	83	85	86	87	88	
	10	On	Edge	11		91	92	94	95	96	97	
	10	Off	Middle	12		100	101	103	104	105	106	
	10	Off	Edge	13		109	110	112	113	114	115	

Tabelle A.1 Versuchsmatrix mit sämtlichen Kombinationen von Kartonherstellungsparametern und Registerregelungsstrategien bzgl. CD und MD, die über eine eigenständige Experiment ID zuordenbar wird [17]

Die Bahnlauf- und Registerschwankungen wurden für jede Parameterkombination mit statistischen Größen wie Standardabweichung σ und Mittelwerte μ quantifiziert. Da die Schwankungen in der Regel als Normalverteilung vorlagen, liefern die Kennzahlen gut miteinander vergleichbare und robuste Ergebnisse zur Seitenbewegung. Abbildung A.2 zeigt exemplarisch den Wahrscheinlichkeitsplot der ID1 bzgl. CD-Registerdaten in PU9, der die Abweichung zu einer Normalverteilung darstellt.

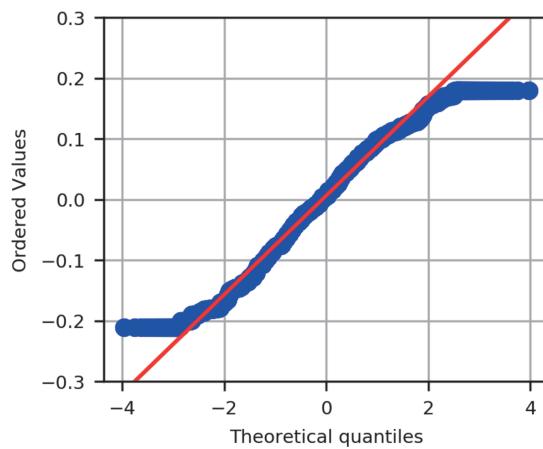


Tabelle A.2 Exemplarischer P-P-Plot für CD-Registerdaten in PU9 zeigt eine breite Übereinstimmung mit einer Normalverteilung [17]

Zur Untersuchung der Schwankungscharakteristik wurden außerdem Frequenzanalysen genutzt, die eine komplette Versuchsbedingung auswertet, welche etwa 500 m lang ist.

Ergebnis: Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die CD-Position der Fertigrolle bzgl. der Mutterrolle sowohl den stärksten Einfluss auf den generellen seitlichen Bahnweg durch die Maschine besitzt, als auch auf die laterale Schwankung der Bahn. Der generelle Pfad durch die Maschine hängt dabei vom jeweils CD-positionsabhängigen und über MD grundlegenden CD-Profil in den Materialeigenschaften ab, die ebenfalls untersucht wurden. Abbildung A.1 zeigt die Mittelwerte der Bahnkantenmesswerte entlang der Maschine, relativ zur Referenzrolle (grün bzw. ID2). Die offensichtlich systematische Nichtlinearität im Pfad durch die Maschine hängt mutmaßlich mit der Referenzierung auf eine einzelne Referenzrolle zusammen. Eine absolute Kalibrierung der Seitenposition der Sensoren war nicht möglich.

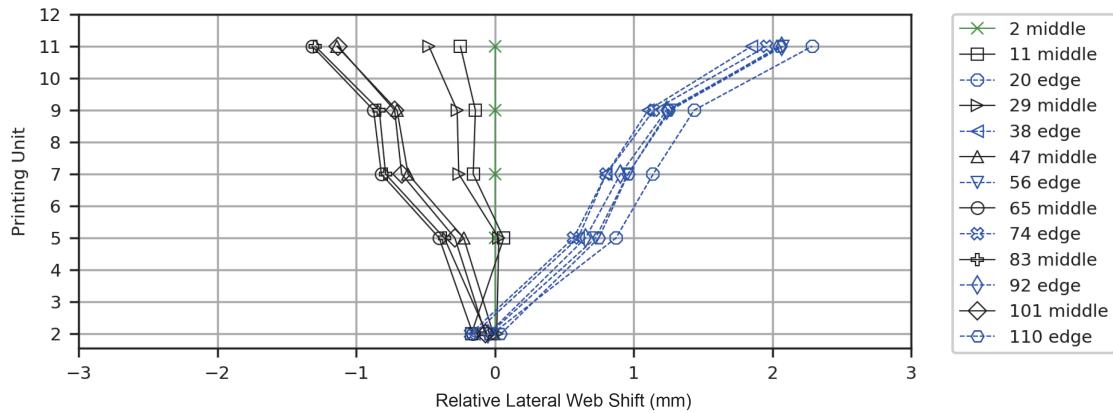


Abbildung A.1 Mittelwert der Seitenbewegung zeigt den relativen generellen Pfad der Bahn durch die konkrete Rollentiefdruckmaschine [17]

Die seitliche Instabilität (siehe Abbildung A.2) kann durch die Standardabweichung μ ausgedrückt werden. Sie muss insbesondere durch MD-Schwankungen in den Materialeigenschaften hervorgerufen werden oder durch eine Kombination aus MD und CD, da insbesondere Randrollen ein sehr flaches CD-Profil aufweisen. Aus dieser Beobachtung kann man ableiten, dass nicht pauschal gesagt werden kann, das Randrollen grundsätzlich schlechter sind als Rollen aus einer CD-Mittenposition der Mutterrolle.

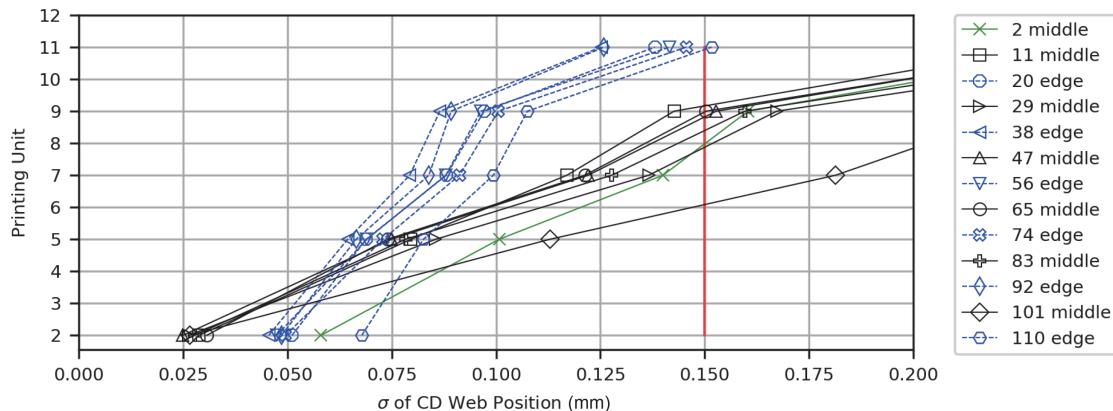


Abbildung A.2 Standardabweichung der Bahnkantenmessungen zeigt auch bei deaktivierter Registerregelung eine sukzessive Verstärkung der seitlichen Bahnlaufschwankungen entlang der konkreten Rollentiefdruckmaschine [17]

Ein etwas genaueres Bild des Anstiegs der Bahnlaufstörungen entlang der Maschine konnte über die gezielte Deaktivierung der Registerregelung (Setting B) aus einer stabil laufenden Produktion (Setting A) heraus ermittelt werden. Die Registerschwankungen in Abbildung A.3 zeigen diesmal einen nahezu linearen Anstieg der Bahnlaufschwankungen (σ) entlang der Maschine.

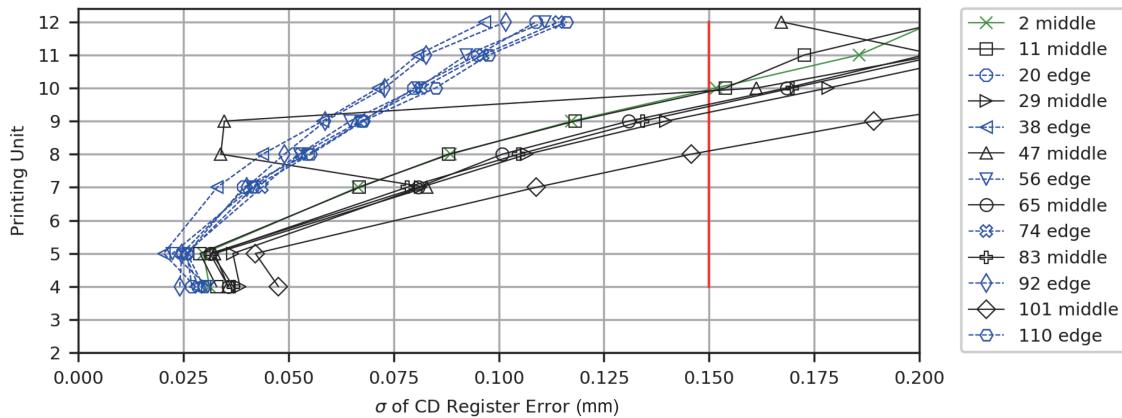


Abbildung A.3 CD-Registerschwankung bei deaktivierter Registerregelung (Setting B) [17]

Der charakteristische Anstieg in der lateralen Bahnlaufschwankungen findet sich bei allen getesteten Regelungsstrategien der Registerregelung (außer B) mehr oder weniger intensiv wieder. Exemplarisch wird das Regelergebnis bzgl. σ der CD-Registerschwankungen gezeigt.

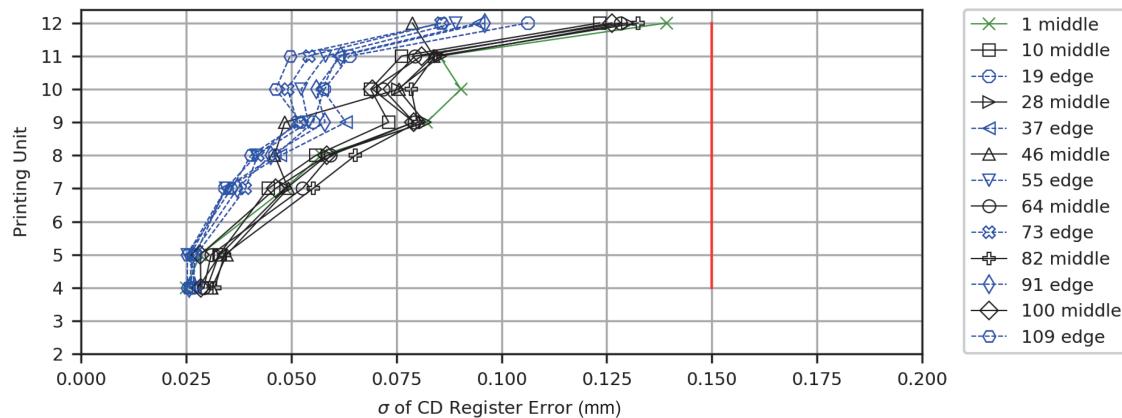


Abbildung A.4 CD-Registerschwankung bei deaktivierter Registerregelung (Setting A) [17]

In den Längsregisterdaten konnte der Verstärkungseffekt nur bei deaktivierter Registerregelung (Setting B) beobachtet werden (siehe Abbildung A.5), wobei anzumerken ist, dass die Daten relativ stark verunreinigt sind, da die Registermarken teilweise außerhalb des Messbereiches liegen und die Datenverteilung nicht einer Normalverteilung entsprechen.

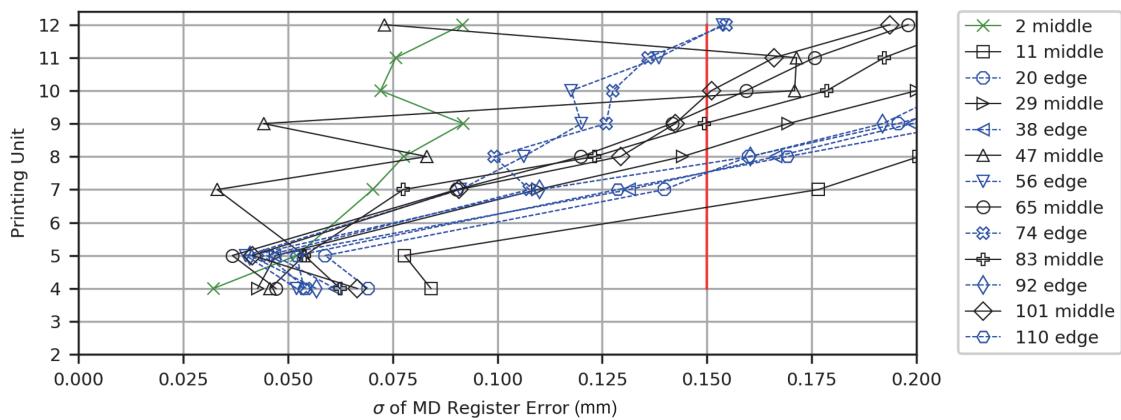


Abbildung A.5 MD-Registerschwankungen (B)[17]

Bei Aktivierung der Registerregelung (Setting A) kompensiert diese die Bahnlaufschwankungen im Druckbild offensichtlich gut (siehe Abbildung A.6) und es ist keine systematische Verstärkung entlang der Druckmaschine zu erkennen.

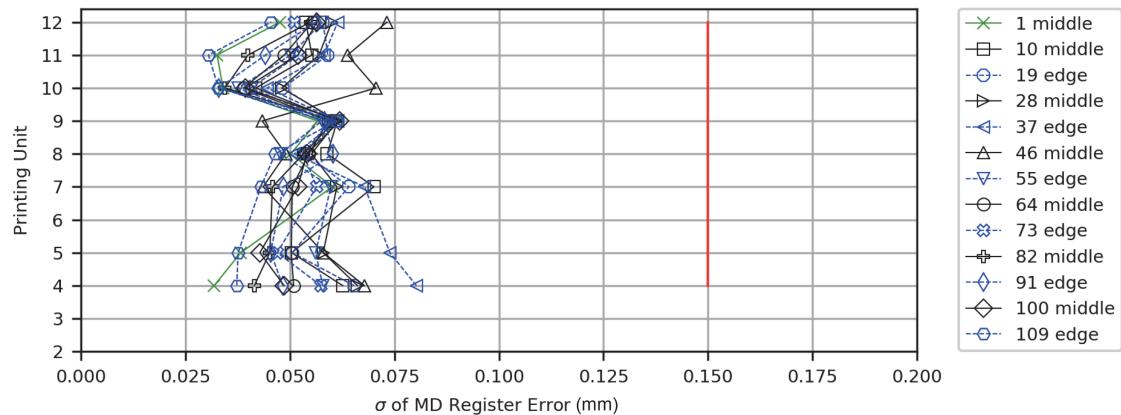


Abbildung A.6 MD-Registerschwankungen (A)[17]

Bei frequenzanalytischer Betrachtung der Bahnkantendaten (siehe Abbildung A.7) wird deutlich, dass insbesondere niederfrequente Seitenbewegungen im Bereich 0,01/m den größten Unterschied in der Bahnlaufstabilität zwischen Mittelrollen und Randrollen ausmachen.

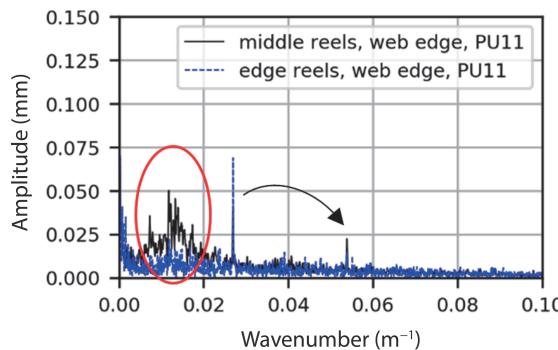
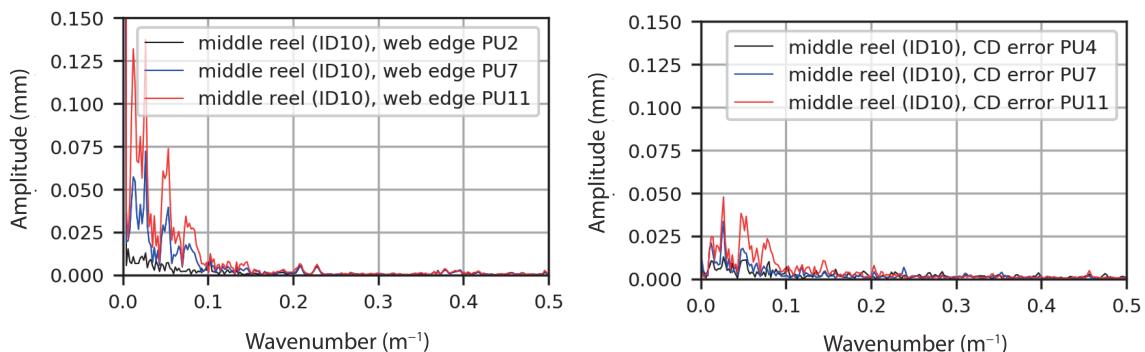


Abbildung A.7 Frequenzspektren der lateralen Bahnlauftschwankung über jeweils alle Mittel- und Randrollen (Setting A-A2) [17]

Der Vergleich zwischen dem Frequenzspektrum der Bahnkanten und den CD-Registersensoren entlang der Maschine für eine exemplarische Rolle aus der Mitte der Mutterrolle im Standard Regelungssetting A (ID10) zeigt, dass dieselben niederfrequenten lateralen Bahnlauftörungen in den Registerschwankungen wiederzufinden sind, da sie spektral sehr ähnlich aufgebaut sind. Offensichtlich kann die Registerregelung die Bahnlauftschwankungen nicht ausreichend ausregeln. Besonders niederfrequente Anteile können aber gut kompensiert werden, wodurch ein diffuser Peak im niedrigen Frequenzbereich (zwischen 0/m und 0,1/m) entsteht, der entlang der Druckmaschine sukzessive anwächst. Auffällig ist, dass das Spektrum nicht nur zwischen Bahnkante und Register sehr ähnlich ist, sondern auch entlang der Maschine quasi identisch bleibt. Daraus folgt, dass an jedem Druckwerk dieselbe Ursache für die Schwankung verantwortlich ist. Das spricht ebenfalls für eine Ursache im Material und nicht in der Maschine.



(a) Frequenzspektrum bzgl. ID10 zeigt niederfrequente laterale Bahnlauftschwankungen die entlang der Druckmaschine ansteigen [17]

(b) Frequenzspektrum bzgl. ID10 zeigt niederfrequente laterale CD-Registerstörungen die entlang der Druckmaschine ansteigen [17]

Abbildung A.8 Beobachtung der lateralen Bahnlauft- und Registerschwankungen im Frequenzspektrum bzgl. ID10 entlang der Druckmaschine (Register Regelungsstrategie A)

Insgesamt zeigt die Untersuchung deutlich, dass die grundlegende Ursache für die größten seitlichen Bahnbewegungen das Material selbst ist. Diese Schlussfolgerung stützt sich im Kern auf die Beobachtung, dass die seitlichen Bahnlaufeffekte ausschließlich von der CD-Position der Rollen (bzgl. Mutterrolle) abhängig waren, obwohl alle anderen Prozessparameter identisch gehalten wurden. Schwankungen in der Faserorientierung konnten in der Studie nicht direkt als Ursache für die Bahnlauf- und Registerstörungen nachgewiesen werden. An dieser Stelle sei anzumerken, dass das Analysefenster der TSI/TSO Messungen wohl zu kurz war, um die potentiell sehr niederfrequenten Wechsel in der Faserorientierung nachzuweisen, die entsprechend niederfrequente Bahnlauf- und Registerschwankungen hervorrufen. Bei Analysen der Bahnkantendaten konnte jedoch festgestellt werden, dass neben einem einzelnen identifizierten Peak, der eindeutig der Oszillation des Siebes in der Papiermaschine zugeordnet werden konnte (schwarzer Pfeil in Abbildung A.9), noch zahlreiche andere Frequenzinformationen in den Bahnkanten enthalten sind, die sich offensichtlich über die einzelnen Rollen signifikant unterscheiden und kein stochastisches Rauschen sind.

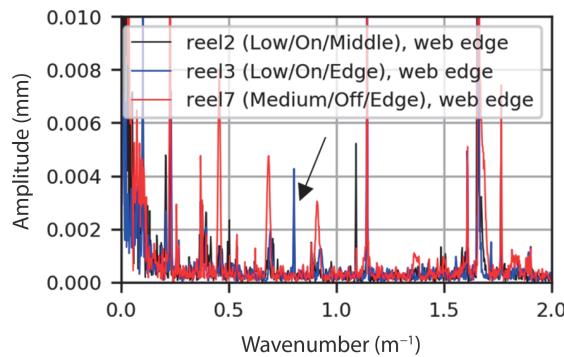


Abbildung A.9 Viele unbekannte Informationen in Bahnkante [17]

Grundsätzlich bestätigen die Voruntersuchungen den für diese Arbeit relevanten und im Stand der Forschung beschriebenen Effekt der sukzessiven Verstärkung von Bahnlaufstörungen, aufgrund materialspezifischer und ortsfester Inhomogenitäten (weave regeneration) entlang mehrerer Walzen (siehe S.92) und damit die Hypothese 2 a). Außerdem zeigt sich, dass in der Bahnkante viele Informationen enthalten sind, die man ihrer Ursache im Prozess zuordnen kann, wie am Beispiel der Siebschüttelung erkennbar wird.

A.2 WGS Oszillationsversuch - Validierung 2 b)

Versuchsbeschreibung: Zur gezielten Überprüfung der Hypothesen 2 b), welche eine dämpfende lineare Verzerrung entlang mehrerer Walzen bzgl. von außen auf die Bahn ein-

gebrachter Störungen postuliert, wird mit Hilfe des Drehgestells der seitlichen Bahnlaufregelung eine definierte seitliche Ablenkung in den Bahnlauf in Form eines Oszillation-Chirps eingebracht. Über die verteilten Bahnkantensensoren wird anschließend das Übertragungsverhalten der eingebrachten Bahnlaufstörung entlang der Maschine beobachtet. In dem Versuch wurde zunächst eine Testrolle durch die Druckmaschine gefahren, ohne dass sie bedruckt oder getrocknet wurde. Dadurch sind auch potentielle Einflüsse aus der Registerregelung, also den Bewegungen der Kompensationswalzen oder dem seitlichen Verfahren der Druckwerke, vollständig eliminiert. Einflüsse durch Luftströmungen in den Trocknern auf den Bahnlauf sind ebenfalls eliminiert. In diesem ersten Durchlauf wurde an der Bahnlaufregelung auch die Oszillation in den Bahnlauf eingebracht. Am Ende der Druckmaschine wurde die Bahn wieder aufgewickelt. Die resultierenden Bahnlaufstörungen wurden also am Aufwickler wieder eingewickelt.

Anschließend wurde die aufgewickelte Rolle am Aufwickler wieder abgerollt und erneut durch die Druckmaschine gefahren um zu überprüfen, wie die Bahnlaufregelung auf eine definierte initiale Bahnlaufstörung bzw. einen initialen Lagefehler reagiert. Durch den zweiten Durchlauf wurde überprüft ab wann die Bahnlaufregelung auf initiale Bahnlaufstörungen reagiert.

Ergebnis 1: Das reale Übertragungsverhalten des Systems kann sowohl in der Zeitreihe in Abbildung A.10 (oben) als auch im direkten Vergleich der beiden Frequenzspektren bei PU02 und PU11 (mitte) und schließlich in der berechneten Übertragungsfunktion nachvollzogen werden, die das Ausgangsspektrum bei PU11 ins Verhältnis zum Eingangsspektrum PU02 setzt (unten). Die ermittelte Übertragungsfunktion ist jedoch nur im grün markierten Bereich zwischen 0,01/m und 0,15/m valide, da hier überhaupt signifikante Frequenzinformationen ins System eingehen. Man erkennt deutlich, dass die extern aufgeprägten Bahnstörungen entlang der Maschine umso stärker gedämpft werden, desto höher die Frequenz. Man erkennt auch, dass hohe Frequenzen trotz gleicher Soll Amplitude durch die WGS nicht vollständig auf die Bahn übertragen werden konnten, da es irgendwann zu Schlupf an der WGS kam.

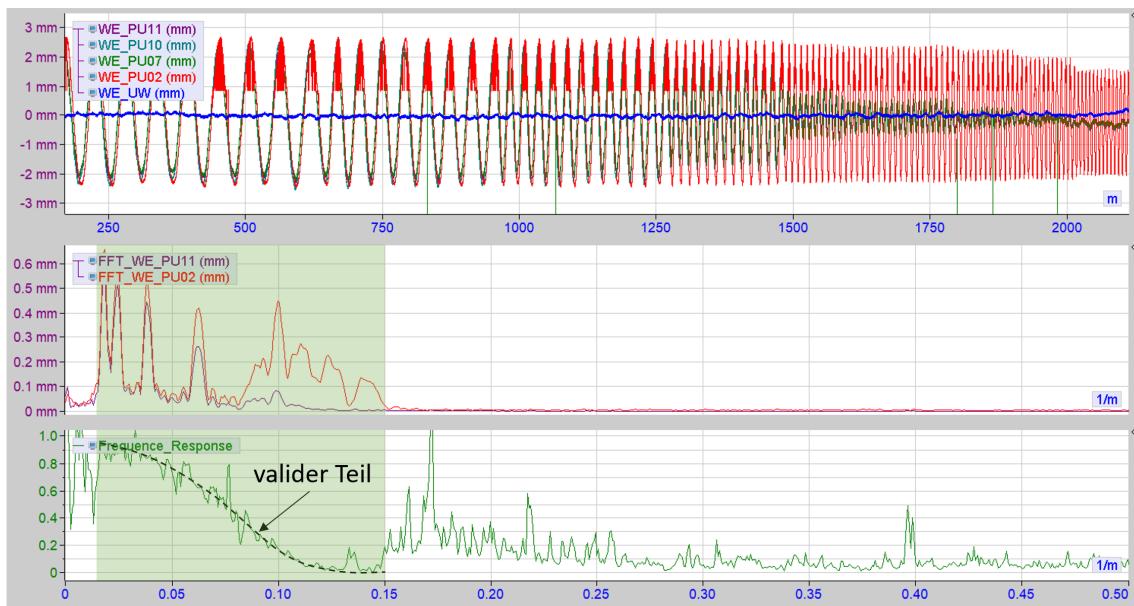


Abbildung A.10 Zeitreihen und Frequenzspektren der Bahnkantenmessungen entlang der Druckmaschine zeigen bei steigender Frequenz eine umso größere Dämpfung bzgl. extern auf den seitlichen Bahnlauf eingebrachter Störungen

Der Versuch konnte zweifelsfrei die Hypothese 2 b) bestätigen. Extern in den Bahnlauf aufgebrachte Störungen werden tatsächlich entlang der Druckmaschine systematisch gedämpft. Je höher die Frequenz der ins System eingebrachten Bahnlaufstörung, desto stärker wird sie gedämpft. Langsame Bahnlaufstörungen werden deutlich besser übertragen. Damit bestätigt sich außerdem die Hypothese 2 c).

Ergebnis 2: Das Material, das im ersten Durchlauf zuletzt wieder aufgewickelt wurde, wird im zweiten Durchlauf als erstes wieder abgewickelt. Die im Wickel eingerollte initiale seitliche Bahnlaufstörung wird zum einen durch das System selbst etwas gedämpft und zum anderen aktiv durch die WGS ausgeregelt. Beim Vergleich der einlaufenden Störung vom Wickel bei WE_{UW} mit der resultierenden Störung unmittelbar nach der Bahnlaufregelung, also bei WE_{WGS2} , erkennt man, dass die resultierende Bahnlaufstörung über die komplette Rolle innerhalb einer bestimmten Zone bleibt, egal ob die einlaufende Störung groß oder klein ist. Der Versuch zeigt damit deutlich, dass die WGS nicht direkt auf eine Gegenbewegung reagiert, sondern erst dann, wenn ein gewisser Wert überschritten wird. Die sogenannte Totzone. Die Einhüllende bei WE_{WGS2} hat eine Amplitude von $\approx 0,2$ mm. Dies entspricht einem absoluten Pegel von -7 dB. Eine einzelne Bahnkantenvariation, die δOS bzw. $\delta DS < -7$ dB ist, wird durch die Bahnlaufregelung also offensichtlich nicht ausgeregelt. Bei mehreren überlagerten Störungen summieren sich die Abweichungen zu einer kumulierten Störung.

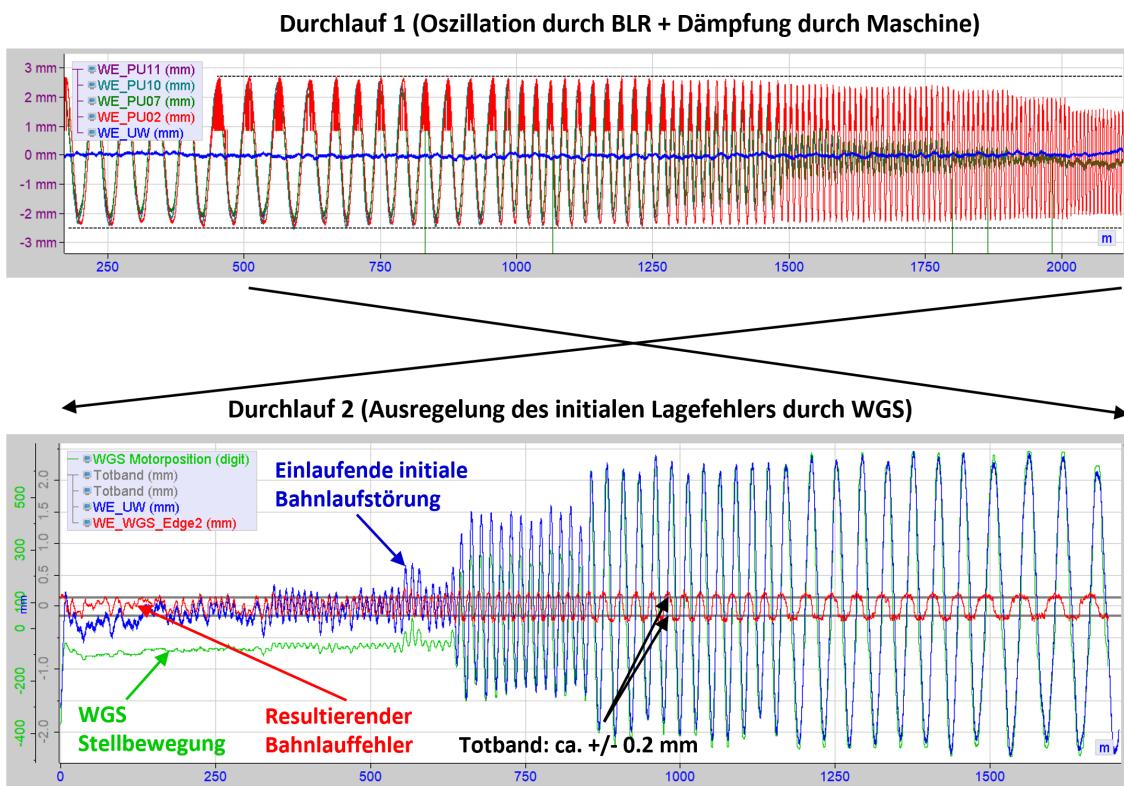


Abbildung A.11 Die definierte initiale Bahnlauftörung aus dem ersten Durchlauf des Oszillationsversuch wird im zweiten Durchlauf durch die Druckmaschine nur dann durch die Bahnlauftregelung (WGS) ausgeregelt, wenn sie größer als 0,15 mm ist, was die effektive Totzone der Bahnlauftregelung offenbart

A.3 Bahnkantenmessung an Klinikroller

Versuchsbeschreibung: Zur Abschätzung in wieweit Rollenvibrationen innerhalb der Fertigrollenwicklung auf dem Maschinenroller den Bahnlauft in diesem Prozess beeinflussen können und möglicherweise auf den Schneidprozess wirken und so etwaige Prozessschwankungsinformationen in die Bahnkante schneiden, wurde stellvertretend an einem Klinikroller untersucht. Die Untersuchungen wurden in derselben Papierfabrik durchgeführt aus der auch die Testrollen aus Versuch A.1 stammen und die meisten Rollen in der Fallstudie. Der Klinikroller ist vom Aufbau und von seiner Funktionsweise nahezu identisch zum Maschinenroller dieser Papierfabrik, der die maschinenbreite Mutterrolle direkt hinter der Papiermaschine zu Fertigrollen konfektioniert. Der Klinikroller ist nur deutlich schmäler undwickelt eine Fertigrolle ab anstatt eine Mutterrolle. Der Versuch wurde bewusst auf einem Klinikroller durchgeführt, weil eine Bahnkantenmessung kurz vor oder nach der Schneidpartie auf dem Maschinenroller aus Sicherheits-, Prozess- und Platzgründen nicht einfach

möglich war. So existiert auf einem Maschinenroller vor der Schneidpartie keine saubere Bahnkante, die sinnvolle Messdaten liefern würde. Nach der Schneidpartie ist nicht genügend Platz für die Sensoren. Außerdem ist eine temporäre Installation von Messequipment ohne betriebsinterne Abnahmegenehmigung am Maschinenroller nicht einfach möglich, da der Prozess kritisch für den gesamten Papierproduktionsprozess ist und keinesfalls durch einen Zwischenfall im Versuch unterbrochen werden darf. Die Vibrationen der Rolle im Walzenbett des Klinikrollers wurden per Video erfasst und rein visuell ausgewertet. Durch Auszählen der Rotationen der Rolle und dem optisch gut erkennbaren Springen der Rolle auf der hinteren Tragwalze und dem Vor- und Zurückschwingen der Hülsenführungsköpfe, wurde die Vibrationscharakteristik grob abgeschätzt. Zur Überprüfung inwieweit die Vibration der Rolle im Walzenbett bis auf die Schneidpartie zurückwirken, wurden beide Bahnkanten OS und DS mit Hilfe der gleichen Bahnkantensensoren erfasst, die auch in der konkreten Rollentiefdruckmaschine verbaut waren. Um eine in ZD-Richtung möglichst ruhige Bahn zu messen, wurden die Kanten beim Überlauf über die erste Leitwalze der Schneidpartie gemessen, also noch vor den Schneidmessern. Abbildung A.12 zeigt den schematischen Versuchsaufbau.

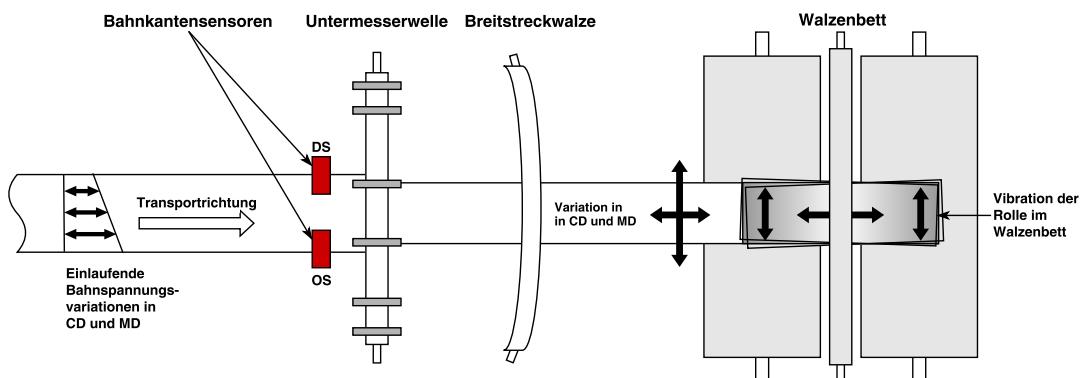


Abbildung A.12 Versuchsaufbau am Klinikroller

Das linke Foto in Abbildung A.13 zeigt wie die Bahnkanten kurz vor der Schneidpartie erfasst wurden. Rechts sind die Vibrationen der aufgewickelten Rolle im Walzenbett als rote Pfeile dargestellt.

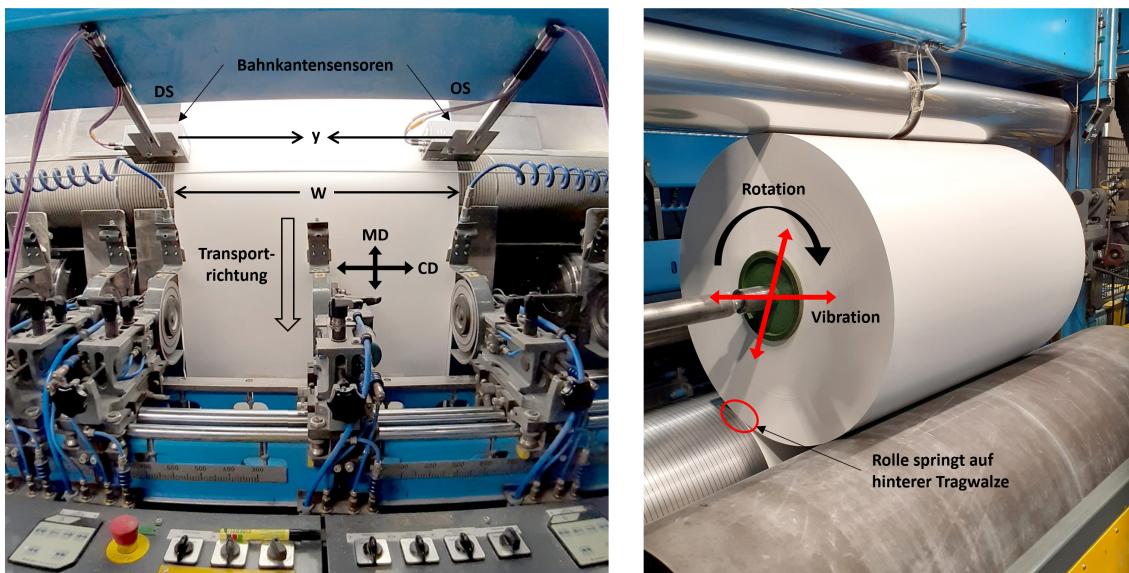


Abbildung A.13 Bahnkantenmessung kurz vor Schneidpartie (links) und Fertigrolle im Walzenbett (rechts)

Ergebnis 1: Der Versuch hat gezeigt, dass die Rolle im Walzenbett exakt 2 mal pro Fertigrollenumdrehung im Walzenbett auf der hinteren Tragwalze deutlich erkennbar springt. Auf der vorderen Tragwalze konnte kein Springen beobachtet werden. Abbildung A.14 zeigt Momentaufnahmen aus einer Sequenz von 1,5 Rollenumdrehungen.

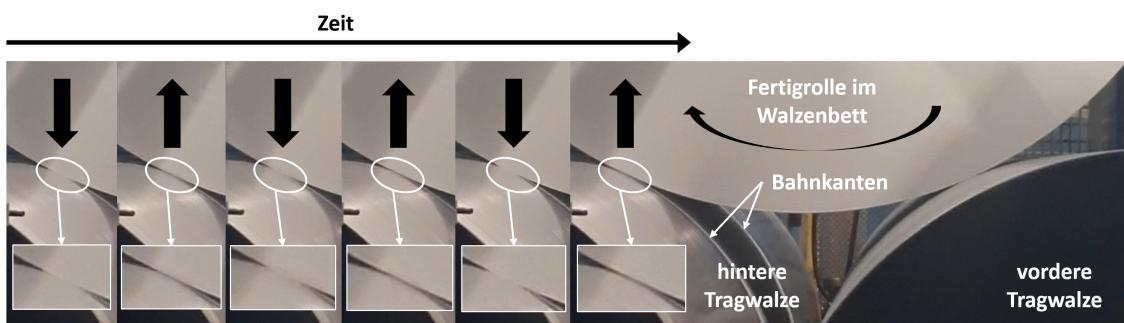


Abbildung A.14 Rolle springt 2 mal pro Rollenumdrehung gut sichtbar auf der hinteren Tragwalze

Die Häufigkeit des Springens auf der Tragwalze passt exakt zu einer zweimaligen Deformation der Rolle pro Umdrehung, die zu einer leicht oval förmigen Rolle führt. Eine potentielle Störung des Bahnlaufs entgegen der Bahnlaufrichtung sollte nach Abbildung 7.2 (S.158) zu einer 1. Obertonschwingung (2x) der Fertigrollengrundfrequenz führen. Die visuellen Beobachtungen bestätigen zunächst beispielhaft, dass Rollen im Walzenbett grundsätzlich vibrieren. So wird es im Stand der Forschung 4.4.2 (S.86) ebenfalls beschrieben.

Abbildung A.15 zeigt die beiden Bahnkantenmessungen kurz vor der Schneidpartie und die Breitenvariation (σW), die sich durch die Differenz beider Signale ergibt.

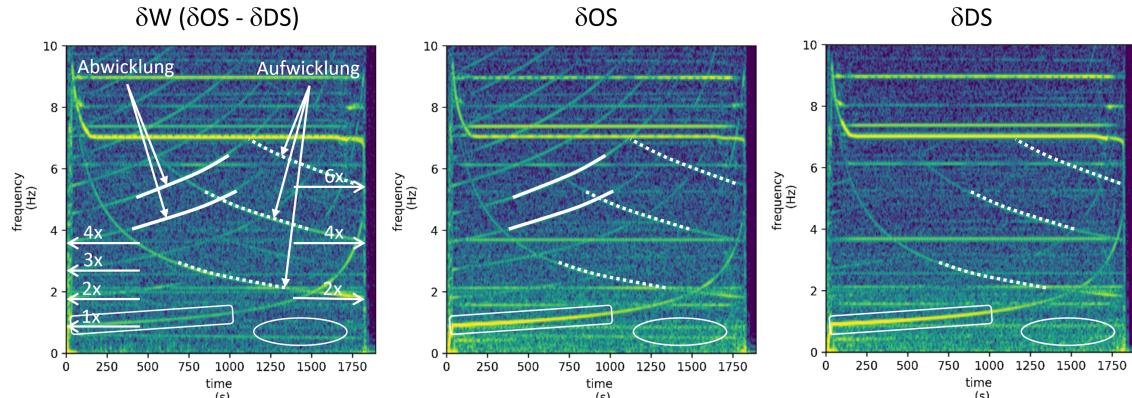


Abbildung A.15 Die Auswirkungen der charakteristischen Rollenvibration im Walzenbett (2 Sprünge pro Umdrehung auf vorderer Tragwalze) bis zurück zum Slitter zeigen sich in konkav abfallenden Linien (gestrichelt), die genau der 2x Harmonischen und deren Obertönen (4x, 6x usw.) der ursprünglichen Rolle entsprechen

Tatsächlich zeigt sich der 1. Oberton (2x) der Aufwicklungsdriftfrequenz der Rolle im Walzenbett (gepunktete Linie) in beiden Bahnkanten. Im Spektrogramm der Breitenvariation bleibt diese Information vollständig erhalten. Das bedeutet, dass die Bahn im Rhythmus der Rollenvibration offensichtlich symmetrisch gedehnt wird, wodurch sie minimal schmäler wird. Dadurch, dass sich die Bahn bei jeder Umrollung in der Richtung umkehrt, kann definitiv ausgeschlossen werden, dass die Effekte aus der ursprünglichen Fertigrollenwicklung, also vom Maschinenroller stammen. Derartige Effekte wären an der Frequenzachse gespiegelt und würden eher den markierten Abwicklungslien entsprechen.

Der Versuch zeigt ergänzend zu den Beschreibungen von [89], dass Bahnkantenvariationen nicht nur durch Prozessschwankungen vor der Schneidpartie (z.B. Abwicklungsprobleme) oder durch die Schneidpartie selbst (z.B. Messervibrationen) verursacht werden können, sondern auch durch Ursachen, die in Bahntransportrichtung nach der Schneidpartie verzögert sind. Es kann damit gerechnet werden, dass Rollenvibrationen im Walzenbett grundsätzlich bis auf die Schneidpartie zurückwirken können.

Ergebnis 2: Im Gegensatz zu den Informationen bzgl. der Aufwicklung heben sich die stochastischen niederfrequenten Anteile (eingekreist) in den beiden separaten Bahnkanten Spektrogrammen in der Bahnbreite offensichtlich vollständig auf. Das Verschwinden bedeutet, dass es sich bei dieser Information um eine absolut seitenparallele, stochastische Variation beider Bahnkanten handelt. In dieser Form spricht das sehr stark für eine

stochastische seitliche Bahnbewegung, die durch materialspezifische Inhomogenität verursacht wird. Sie ist im Vergleich zu späteren Versuchen nicht besonders stark, was daran liegen mag, das der Bahnweg im Klinikroller insgesamt und bis zu den Sensoren recht kurz war.

Bei der Fertigrollengrundfrequenzlinie (1x) (eckiger Kasten) der Abwicklungslien (durchgezogene Linie) kann ebenfalls eine Seitenbewegung beobachtet werden. Die Fertigrollengrundfrequenzlinie der Abrollung ist zwar sehr stark in den einzelnen Bahnkanten ausgeprägt, hebt sich aber in der Bahnbreite fast vollständig auf. Der schwach sichtbare Rest ist dann tatsächlich als Breitenvariation zu deuten. Diese Breitenvariation kann nun entweder durch induzierte Bahnspannungsschwankungen aus der Klinikrollerabwicklung aufgrund einer Rollenumrundheit stammen oder bereits im Fertigrollenwicklungsprozess auf dem Maschinenroller entstanden sein. Die vielen Obertöne (2x, 3x, 4x, ...) der Abwicklungs-drehfrequenz und eine visuelle Beobachtung der Rolle in der Abwicklung deuten aber eher darauf hin, dass die Rolle in der Abwicklung eine leichte Delle besitzt, die den Bahnlauf offensichtlich hauptsächlich auf der OS Seite beeinflusst. Die Obertöne sind im OS Sensor viel deutlicher sichtbar als im DS Sensor. Wahrscheinlich induziert die Delle in der Rolle eine Bahnspannungsvariation, die die Bahn besonders auf dieser Seite etwas mehr dehnt und dadurch schmäler werden lässt als auf der anderen Seite. In jedem Fall liegt auch diese Information als Breitenvariation in der Bahn auf Höhe der Schneidmesser vor.

In den Bahnkanten liegen seitenunabhängige Informationen und seitenparallele Informationen in Form von Seitenbewegungen und Bahnbreiteninformationen vor.

Ergebnis 3: Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass es bei einigen Rollen gegen Ende einer Umrollung zu einem starken Aufschaukeln der Rolle im Walzenbett kommt, was häufig nur durch Geschwindigkeitsreduktion reduziert werden kann, genau wie in Kapitel 4.4.2 (S.86) beschrieben. Bei einer Rolle entstehen genau dann signifikante Intermodulationsprodukte, wenn sich die Aufwicklungs- und Abwicklungslien kreuzen. Offensichtlich vermischen sich diese beiden Bahnlaufstörungen und schaukeln sich stark auf. Die Linie bei 0/m ergibt sich nach Gleichung 3.44 (S.70) rechnerisch durch das Intermodulationsprodukt 2. Ordnung, also der Betragsdifferenz aus der Drehfrequenz der Aufwicklung X_1 und der Abwicklung X_2 .

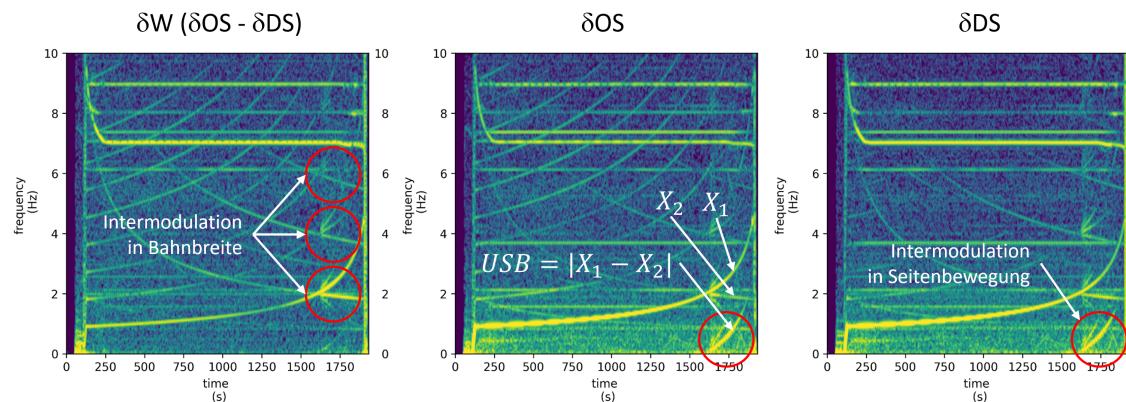


Abbildung A.16 Die Bahnlaufschwankungen durch Auf- und Abwicklung führen bei Überkreuzung an einem bestimmten Punkt zum Aufschaukeln der Rolle im Walzenbett. Durch die Vermischung beider Vibratoren entstehen Intermodulationsprodukte

Diese Beobachtung zeigt, dass es in der Fertigrollenwicklung zur Vermischung von Anregungsfrequenzen kommen kann, die sich als modulierte Bahnlaufstörungen auf Höhe der Schneidpartie auswirken.

Da sowohl Variationen in der Bahnbreite als auch seitenparallele Bahnlaufschwankungen im Klinikroller kurz vor der Schneidpartie nachgewiesen werden können, bestätigt sich damit grundsätzlich die Vermutung, dass derartige Informationen potentiell durch die kurz darauf folgende Schneidpartie auch im Maschinenroller fest in die Bahnkante geschnitten werden können. Diese Bahnkanteninformationen müssen daher, genau wie Effekte die aus den Messern selbst stammen, (Messervibrationen) entlang einer Druckmaschine praktisch unveränderlich sein.

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

