

M a s t e r a r b e i t

**Validierung, Erweiterung und automatisierte Adaption eines  
Prozessmodells für Kaltwalzanlagen**

angefertigt am

Fachgebiet für IT in Produktion und Logistik

Fakultät Maschinenbau

TU Dortmund

von

Jannis Willerscheid

Matrikel-Nr.: 176975

Studiengang: Maschinenbau

Erstgutachter/-in:

Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Anne Antonia Scheidler

Zweitgutachter/-in:

Dipl.-Ing. Dietrich Mathweis

Ausgegeben am 28. Oktober 2021

Eingereicht am 14. April 2022

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen des Kaltwalzens</b>	<b>4</b>
2.1 Aufgabe und Bauarten von Kaltwalzanlagen . . . . .	5
2.2 Umformtechnische und technologische Grundlagen . . . . .	8
2.2.1 Plastizitätstheorie . . . . .	10
2.2.2 Walzspaltgeometrie . . . . .	13
2.2.3 Reibverhältnisse im Walzspalt . . . . .	16
2.2.4 Einfluss des Bandzuges auf den Walzprozess . . . . .	17
2.2.5 Vor- und Nacheilung . . . . .	18
2.3 Verbreitete Ansätze zur Modellierung des Walzens . . . . .	21
2.3.1 Streifenmodell . . . . .	21
2.3.2 Walzenabplattung nach Hitchcock . . . . .	25
2.3.3 Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis . . . . .	27
2.3.4 Walzmodell nach Fleck und Johnson . . . . .	28
2.4 Datenverarbeitung im Umfeld des Kaltwalzens . . . . .	30
<b>3 Untersuchte Tandemstraße und verwendete Modelle</b>	<b>33</b>
3.1 Aufbau und Betriebsweise der untersuchten Anlage . . . . .	33
3.2 Datenverarbeitung an der Tandemstraße . . . . .	35
3.3 Steuerung und Regelung des Walzprozesses . . . . .	36
3.3.1 Relevante Messgrößen . . . . .	36
3.3.2 Stichplanberechnung . . . . .	37
3.3.3 Steuerung und Regelung der Tandemstraße . . . . .	39
3.4 Prozessmodell von Mathweis Engineering und allpcloud . . . . .	40
3.5 Adaptionlogik von Mathweis Engineering . . . . .	44
<b>4 Datenaufbereitung und Plausibilisierung für die Verwendung im Prozessmodell</b>	<b>48</b>
4.1 Festlegung von Geschwindigkeitsphasen für die Datenaufbereitung . . . . .	48
4.2 Überprüfung der Eignung der Datenbankwerte als Referenzwerte für die Validierung anhand der festgelegten Geschwindigkeitsphasen . . . . .	52
4.3 Aufbereitung und Verknüpfung der Datensätze . . . . .	54

---

4.3.1	Extraktion von textbasierten Daten aus iba-Messdateien . . . . .	55
4.3.2	Zusammenführung der Daten aus verschiedenen Quellen . . . . .	60
4.4	Plausibilitätsprüfung der erhaltenen Referenzwerte für Walzkräfte und Walz- momente . . . . .	62
4.4.1	Betrachtung der Walzkräfte . . . . .	65
4.4.2	Betrachtung der Walzmomente . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Erweiterung des Prozessmodells von Mathweis Engineering und allpc- cloud</b>	<b>70</b>
5.1	Umsetzung einer Schnittstelle zum automatisierten Einlesen von Datensätzen	70
5.2	Integration der Adaption in das Prozessmodell . . . . .	72
5.2.1	Anpassungen an der Adaptionslogik im Zuge der Automatisierung .	72
5.2.2	Einbindung der Adaption im Prozessmodell . . . . .	74
5.2.3	Funktionsweise der automatisierten Adaption von Fließspannung und Reibwert . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Validierung des erweiterten Prozessmodells</b>	<b>81</b>
6.1	Validierung des FE-Modells anhand der Anlagendaten im Vergleich mit der Theorie nach Bland, Ford und Ellis . . . . .	81
6.1.1	Auswertung der Simulationsergebnisse bezüglich Kräften und Mo- menten . . . . .	82
6.1.2	Bewertung des FE-Modells anhand der Vergleichsrechnung . . . . .	92
6.2	Adaption von Fließspannung und Reibwert für einen Teildatensatz . . . . .	93
6.2.1	Ergebnisse der Adaption für die Stahlmarken 321, 319 und 341 . . .	93
6.2.2	Nutzung der Adaptionsergebnisse zur Anpassung des Reibgesetzes .	96
6.2.3	Nutzung der Adaptionsergebnisse zur Anpassung der Fließkurve . .	98
6.2.4	Vergleichsrechnung für die Stahlmarke 321 mit adaptierten Werten	99
6.2.5	Bewertung der Adaption . . . . .	102
6.3	Untersuchung des Einflusses des Voreilungsfehlers auf die Eingangsgrößen des Walzmodells . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>106</b>
	<b>Literatur</b>	<b>109</b>
	<b>Anhang</b>	<b>114</b>

# Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$A$	$\text{mm}^2$	Bandquerschnittsfläche
$a$		Walzspaltbeiwert (Bland, Ford, Ellis)
$B$		Bandzugverhältnis (Bland, Ford, Ellis)
$B_i$		betrachtetes Bund
$B_{i-1}$		Vorgängerbund
$b$	mm	Bandbreite
$C$	$\text{mm}^2/\text{N}$	Materialkonstante (Hitchcock)
$E$	MPa	Elastizitätsmodul
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibkraft
$F_W$	N	Walzkraft
$h$	mm	Banddicke
$h_0$	mm	Einsatzdicke
$i_G$		Getriebeübersetzung
$k_e$	MPa	ebene Fließspannung
$k_{e,m}$	MPa	Mittelwert für $k_e$ über den Walzspalt
$k_f$	MPa	Fließspannung (einachsig)
$k_{f0}$	MPa	Anfangsfließspannung
$l_d$	mm	gedrückte Länge
$l_d'$	mm	abgeplattete gedrückte Länge
$M_M$	Nm	Motormoment

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$M_V$	Nm	Verlustmoment
$M_W$	Nm	Walzmoment
$p$	MPa	Querdruck
$p_n$	MPa	Normaldruck
$q$	MPa	Längsdruck
$R_{p0,2}$	MPa	0,2%-Dehngrenze
$R_W$	mm	Walzenradius
$R_W'$	mm	abgeplatteter Walzenradius
$T$	N	Bandzug
$T_A$	N	Auslaufzug (zwischen G4 und Aufhaspel)
$T_E$	N	Einlaufzug (zwischen Abhaspel und G1)
$T_{i,j}$	N	Bandzug zwischen den Gerüsten $i$ und $j$
$T_R$	N	Rückzug (einlaufseitig im Walzspalt)
$T_V$	N	Vorzug (auslaufseitig im Walzspalt)
$V$	mm <sup>3</sup>	Volumen
$\dot{V}$	mm <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
$v$	m/s	Bandgeschwindigkeit
$\dot{v}$	m/s <sup>2</sup>	Steigung der Bandgeschwindigkeit
$\ddot{v}$	m/s <sup>3</sup>	Krümmung der Bandgeschwindigkeit
$v_W$	m/s	Walzenumfangsgeschwindigkeit
$x$	mm	Längenkoordinate im Walzspalt
$\alpha$	°	Winkelkoordinate im Walzspalt

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\alpha_0$	°	Walzwinkel
$\Delta$		Symbol für Differenz, in Verbindung mit anderen Formelzeichen
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\kappa_N$		Nacheilung
$\kappa_V$		Voreilung
$\sigma$	MPa	Normalspannung
$\sigma_R$	MPa	spezifischer Rückzug
$\sigma_V$	MPa	spezifischer Vorzug
$\sigma_v$	MPa	Vergleichsspannung
$\tau$	MPa	Schubspannung
$\varphi$		Umformgrad
$\dot{\varphi}$	s <sup>-1</sup>	Umformgeschwindigkeit
$\Omega$		Dämpfungsfaktor in der Adaptionlogik
$\omega_W$	m/s	Walzenwinkelgeschwindigkeit

<b>Index</b>	<b>Beschreibung</b>
A	Auslaufseitig (bezogen auf den Walzspalt)
E	Einlaufseitig (bezogen auf den Walzspalt)
F	Fließeiche
$i, j, k$	Laufindizes
W	Walze
*	adaptierte Größe

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
AW	Arbeitswalze(n)
BFE	Ansatz nach Bland, Ford und Ellis
BH	Body High, Hochgeschwindigkeitsphase beim Walzen
BL	Body Low, Niedriggeschwindigkeitsphase beim Walzen
$BL_i$	Phase BL bei Walzgeschwindigkeit $i$ m/s in G4, $i \in \{1, 2\}$
CPU	Hauptprozessor (Central Processing Unit)
EB	Exabyte
FE(M)	Finite Elemente (Methode)
GB	Gigabyte
$G_i$	Gerüst Nr. $i$ , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$
GPU	Grafikprozessor (Graphics Processing Unit)
LD-Verfahren	Linz-Donawitz-Verfahren
MB	Megabyte
MK	Materialklasse
SW	Stützwalze(n)
WBNr	Warmbandnummer zur Identifikation eines Bundes
ZB	Zettabyte
ZW	Zwischenwalze(n)

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Walzenanordnungen für das Duo-, Quarto- und Sextogerüst (angelehnt an Hoffmann et al. (2012, S. 124)), der Horizontalversatz der Arbeitswalzen ist stark übertrieben dargestellt . . . . .	8
2.2	Einteilung der Umformverfahren nach DIN 8582 (2003) . . . . .	8
2.3	Einteilung der Walzverfahren nach DIN 8583-2 (2003) . . . . .	9
2.4	Spannungen am Volumenelement, a) in der Grundausrichtung, b) in den Hauptspannungszustand gedreht (angelehnt an Hinkfoth (2003, S. 22)) . .	10
2.5	Skizze der Walzspaltgeometrie unter Berücksichtigung der Walzspaltsymmetrie (angelehnt an Kopp und Wiegels (1999, S. 165)) . . . . .	14
2.6	Ausschnitt aus der Bandzugverteilung am Quartotandem . . . . .	18
2.7	Grafische Darstellung der Geschwindigkeiten an der Fließscheide sowie in der Vor- und Nacheilzone (angelehnt an Hinkfoth (2003, S. 138)) . . . . .	19
2.8	a) Geometrie des Streifens, b) statisches Gleichgewicht unter Berücksichtigung der Walzspaltsymmetrie nach Pawelski und Pawelski (2000, S. 27) . .	22
2.9	Qualitative Verläufe von $p$ , $q$ und $\tau$ nach dem Streifenmodell beim Walzen ohne Bandzug und unter Annahme konstanter Fließspannung $k_e$ (angelehnt an Weber (1974, S. 40)) . . . . .	25
2.10	Walzenabplattung nach Hitchcock (angelehnt an Kopp und Wiegels (1999, S. 172)) . . . . .	26
2.11	Banddickenverläufe über die Walzspaltlänge gemäß der Theorie nach Fleck und Johnson. Die Verläufe (a) bis (f) zeigen die Dickenverlauf verschiedener Bänder mit jeweils 50% Dickenabnahme über den Walzspalt. Die Ausgangsdicke $h_0 = 2b_0$ nimmt von 0,14 mm (a) bis 0,013 mm (f) ab. Aus Fleck et al. (1992). . . . .	29
2.12	Verläufe des Walzdrucks $p$ bezogen auf die Fließgrenze $Y_s = 230$ MPa über die Walzspaltlänge gemäß der Theorie nach Fleck und Johnson. Die Druckverläufe sind den Dickenverläufen (a) bis (f) aus Abbildung 2.11 zuzuordnen. Aus Fleck et al. (1992). . . . .	30
3.1	Schematischer Aufbau der untersuchten Tandemstraße (angelehnt an Kämper (2020, S. 9)) . . . . .	33
3.2	Benutzeroberfläche des an der Anlage verwendeten Stichplanmodells mit a) Eingabemöglichkeit für Bunddaten und weitere Optionen, b) berechnetem Stichplan und c) Visualisierung von Reduktionsverteilung, Zügen, Walzkräften und Leistungsaufnahme . . . . .	38
3.3	Im FE-Modell genutzte Diskretisierung des Walzspalts . . . . .	42



3.4	Nachbildung der Walzspaltberechnung von Fleck et al. (1992) mit dem FE-Modell von Mathweis Engineering und allpccloud. Die Randbedingungen entsprechen Fall (e) aus den Abbildungen 2.11 und 2.12 . . . . .	43
3.5	Auszüge aus einer beispielhaften Line-Datei mit a) Definition einer einfachen Fließkurve, b) Definition der Bandbreite, c) Festlegung der Reduktionsverteilung, d) Definition der Eintrittsgeschwindigkeit in die Walzstraße, e) Start der Stichplanberechnung mit zuvor definiertem Parametersatz . . .	44
3.6	Adaptionslogik von Mathweis Engineering . . . . .	45
4.1	Verlauf der Bandgeschwindigkeit in G4 über der Zeit für ein beispielhaftes Bund. Ausschnitt aus <i>ibaAnalyzer</i> . . . . .	49
4.2	Verlauf der Bandgeschwindigkeit in G4 über der Zeit und sich daraus ergebende Definition der Geschwindigkeitsphasen für ein beispielhaftes Bund. Ausschnitt aus <i>ibaAnalyzer</i> . . . . .	52
4.3	Verteilung der in den .csv-Dateien für die Phase BL angegebenen Werte für die Geschwindigkeit in G4 . . . . .	53
4.4	Verlauf der Geschwindigkeit in G4 für die WBNr. 2109026013 mit eingetragenen Phasen . . . . .	54
4.5	Vergleich der Bandbreitenverteilung der mittels <i>ibaAnalyzer</i> gefilterten Daten und der Ausgangsdatenbasis . . . . .	59
4.6	Vergleich der Einsatzdickenverteilung der mittels <i>ibaAnalyzer</i> gefilterten Daten und der Ausgangsdatenbasis . . . . .	60
4.7	Schematischer Ablauf des Programms zur Zusammenführung der verschiedenen .csv-Dateien . . . . .	62
4.8	Durchschnittswerte der gemessenen und extrahierten Walzkräfte für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH . . . . .	65
4.9	Durchschnittswerte der berechneten Walzmomente für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH. Die Walzmomente wurden ohne Berücksichtigung von Verlusten gemäß Gleichung 4.8 aus den gemessenen Motormomenten berechnet . . . . .	66
4.10	An der Anlage in zurückliegenden Versuchen bestimmte Verlustmomente zwischen Antrieb und Walzspalt in Abhängigkeit von Gerüst, Walzgeschwindigkeit und Walzkraft . . . . .	68
4.11	Durchschnittswerte der berechneten Walzmomente für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH. Die Walzmomente wurden unter Berücksichtigung der in Abbildung 4.10 aufgeführten Verlustmomente gemäß Gleichung 4.9 aus den Motormomenten berechnet. . . . .	68
5.1	Benötigte Zeilen der Line-Datei zur Berechnung des Walzvorgangs für die Datensätze aus den Zeilen 3 bis 12 der Datei "input_data.csv". Die Berechnungsergebnisse werden in der Datei "results_data.csv" gespeichert. . . . .	71

---

5.2	Zur Integration in das Prozessmodell erweiterte Adaptionlogik . . . . .	73
6.1	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G1 für die Phase BL2 . . . . .	82
6.2	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G1 für die Phase BH . . . . .	83
6.3	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G1 für die Phase BL2 . . . . .	83
6.4	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G1 für die Phase BH . . . . .	84
6.5	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G2 für die Phase BL2 . . . . .	85
6.6	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G2 für die Phase BH . . . . .	85
6.7	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G2 für die Phase BL2 . . . . .	86
6.8	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G2 für die Phase BH . . . . .	86
6.9	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G3 für die Phase BL2 . . . . .	87
6.10	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G3 für die Phase BH . . . . .	87
6.11	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G3 für die Phase BL2 . . . . .	88
6.12	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G3 für die Phase BH . . . . .	88
6.13	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G4 für die Phase BL2 . . . . .	89
6.14	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G4 für die Phase BH . . . . .	90
6.15	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G4 für die Phase BL2 . . . . .	91
6.16	Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G4 für die Phase BH . . . . .	91
6.17	Adaptierte Fließspannungswerte für die Stahlmarke 321, G1 bis G3 . . . . .	94
6.18	Adaptierte Reibwerte für die Stahlmarke 321, G1 bis G3 . . . . .	95
6.19	Verteilung der Walzwinkel in den Gerüsten 1 bis 3 für die Stahlmarken 321, 319 und 341 . . . . .	95
6.20	Adaptierte Reibwerte in den Phasen BL2 und BH für die Stahlmarken 321, 319 und 341 aufgetragen über die Walzgeschwindigkeit . . . . .	96

---

6.21	Adaptierte Reibwerte sowie originales und angepasstes Reibgesetz für den Walzwinkel $\alpha_0(G1) = 3,60^\circ$ . . . . .	97
6.22	Adaptierte Reibwerte sowie originales und angepasstes Reibgesetz für den Walzwinkel $\alpha_0(G2) = 3,08^\circ$ . . . . .	98
6.23	Adaptierte Fließspannungswerte sowie originale und angepasste Fließkurve für die Stahlmarke 321 . . . . .	99
6.24	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3) . . . . .	100
6.25	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3) . . . . .	100
6.26	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3) . . . . .	101
6.27	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3) . . . . .	101
A.1	Abhaspel am Beginn der Beiz-Walz-Linie . . . . .	114
A.2	Schweißeinheit beim Zusammenfügen zweier Bunde . . . . .	115
A.3	Bandspeicher zwischen Schweißeinheit und Beize. Die Bandoberfläche wurde noch nicht behandelt, die Zunderschicht ist erkennbar. . . . .	115
A.4	Salzsäure-Beizbehandlung, bestehend aus vier Beizbecken . . . . .	116
A.5	Abgedeckeltes Beizbecken . . . . .	116
A.6	Koppelspeicher zwischen Beize und Tandem. Die in der Beize erfolgte Behandlung der Bandoberfläche ist im Vergleich mit Abbildung A.3 deutlich erkennbar. . . . .	117
A.7	Zugrollengerüst vor der Tandemstraße zum Aufbau des Einlaufzuges . . . . .	117
A.8	Geschwindigkeits- und Dickenmessgerät vor dem Einlauf in die Tandemstraße	118
A.9	Geschwindigkeits- und Dickenmessgerät zwischen G1 und G2 . . . . .	118
A.10	Aufhaspel mit Bandschere und Planheitsmessrolle . . . . .	119
A.11	Gesamtansicht der Tandemstraße. Hinter den Rolltoren befinden sich die Walzgerüste. Im Vordergrund ist eine aufbereitete Arbeitswalze erkennbar, die für den nächsten Walzenwechsel bereitsteht. . . . .	119
C.1	Adaptierte Fließspannungswerte für die Stahlmarke 319, G1 bis G3 . . . . .	125
C.2	Adaptierte Fließspannungswerte für die Stahlmarke 341, G1 bis G3 . . . . .	125
C.3	Adaptierte Reibwerte für die Stahlmarke 319, G1 bis G3 . . . . .	126
C.4	Adaptierte Reibwerte für die Stahlmarke 341, G1 bis G3 . . . . .	126
D.1	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G1) . . . . .	127
D.2	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G1) . . . . .	127

---

D.3	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G1) . . . . .	128
D.4	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G1) . . . . .	128
D.5	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G2) . . . . .	129
D.6	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G2) . . . . .	129
D.7	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G2) . . . . .	130
D.8	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G2) . . . . .	130
D.9	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G3) . . . . .	131
D.10	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G3) . . . . .	131
D.11	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G3) . . . . .	132
D.12	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G3) . . . . .	132
D.13	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G4) . . . . .	133
D.14	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G4) . . . . .	133
D.15	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G4) . . . . .	134
D.16	Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G4) . . . . .	134

# Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der aus den .dat-Messdateien extrahierten Signale . . . . .	56
4.2	Übersicht der benötigten Informationen aus den Datenbankauszügen . . . .	61
4.3	Einfluss der Erhöhung verschiedener Parameter auf die resultierende Walzkraft und das Walzmoment (Pawelski, 2017) . . . . .	63
4.4	Einfluss der Erhöhung verschiedener Parameter auf die Fließspannung und den Reibwert . . . . .	64
6.1	Arbeitspunkt für die Abschätzung des Einflusses des Voreilungsfehlers auf die Banddicke . . . . .	104
B.1	Geschwindigkeits- und walzwinkelabhängiges Reibgesetz für G1, G2 u. G3 .	120
B.2	Anhand der Adaption in G1 und G2 angepasstes Reibgesetz für die Gerüste 1 bis 3 . . . . .	121
B.3	Geschwindigkeits- und walzwinkelabhängiges Reibgesetz für G4 4 . . . . .	122
B.4	Tabellarische Auflistung der Fließkurven für die Materialklassen 1 bis 15 (übernommen von ArcelorMittal Eisenhüttenstadt, alle Angaben für $k_f$ in MPa) . . . . .	122
B.5	Experimentell ermittelte 0,2%-Dehngrenzen für verschiedene Stahlmarken (Versuchsdaten von ArcelorMittal Eisenhüttenstadt, alle Angaben für $R_{p0,2}$ in MPa) . . . . .	123
B.6	Adaptierte Fließkurve für die Stahlmarke 321 . . . . .	124

# 1 Einleitung

Flachstahlerzeugnisse sind eine wichtige Produktgruppe der Stahlindustrie. Nach Overhagen (2018) betrug die im Jahr 2016 in Deutschland in Auftrag gegebene Menge für Walzprodukte 38,2 Millionen Tonnen, was 90,7% des in Deutschland im selben Jahr erzeugten Rohstahls entspricht. Die wirtschaftliche und technologische Bedeutung des Kaltwalzens wird auch von Wehr (2021) bestätigt. Neben dem Einsatz als Fertigprodukt eignen sich Flachstahlerzeugnisse vor allem als Halbzeuge für weiterführende Fertigungsverfahren wie Biegen, Tiefziehen oder Walzprofilieren. Die weiterverarbeiteten Endprodukte finden in den unterschiedlichsten Branchen wie der Automobilindustrie, dem Baugewerbe, aber beispielsweise auch bei der Herstellung von Haushaltsgeräten Anwendung und sind damit ein wichtiger Bestandteil des täglichen Lebens. Mit den vielfältigen Verwendungszwecken gehen im Gegenzug auch verschiedenste, stetig wachsende Anforderungen an die Produktqualität einher. Insbesondere kaltgewalzte Bleche zeichnen sich hier durch einstellbare mechanische Eigenschaften wie eine hohe Festigkeit, sowie eine gute Oberflächenqualität aus (Weber, 1974). Die wachsende Nachfrage nach dünnen und hochfesten Blechen bringt allerdings eine erhöhte Belastung von Kaltwalzanlagen mit sich. Diese drückt sich neben erhöhten mechanischen Belastungen wie Walzkräften oder -momenten auch dadurch aus, dass die Vorhersagegüte der zur Prozessbeschreibung genutzten Berechnungsmodelle aufgrund der immer dünneren Banddicken und höherfesten Werkstoffe an ihre Grenzen stößt. Bei diesen Berechnungsmodellen handelt es sich um mathematische Simulationsmodelle, welche im Wesentlichen die Aufgabe haben, durch Vorhersage des Kraft- und Arbeitsbedarfs der Walzanlage Prozessplanung und Produktionsplanung zu ermöglichen. Eine Untergruppe der Berechnungsmodelle sind die Stichplanmodelle. Sie dienen zur Berechnung material- und umformtechnischer Zusammenhänge, indem sie Sollwerte für die erforderlichen Walzkräfte und -momente sowie die Geschwindigkeits- und Walzkraftverhältnisse unter Berücksichtigung prozesstechnischer Grenzen ermitteln. Dazu werden Eingangsgrößen wie Anlagenparameter, die Bandgeometrie sowie Material- und Reibgesetze genutzt. Die Vorhersagegüte aktuell verfügbarer Modelle bezüglich Walzkraft und Drehmoment ist allerdings gerade für sehr dünne und hochfeste Bänder begrenzt. Ursachen dafür sind das Fehlen von Messungen des Materialverhaltens und der Reibverhältnisse im Walzspalt sowie die Annahme einer Vielzahl von Vereinfachungen in der Walztheorie. Diese Annahmen treffen für dünne und hochfeste Bänder allerdings nur begrenzt zu (Fleck und Johnson, 1987).

Mit der Zielsetzung eines Walzmodells, das auch für dünne und hochfeste Bänder zuverlässige Ergebnisse mit einer praktisch nutzbaren Rechengeschwindigkeit liefert, haben die Mathweis Engineering GmbH und die allpcloud GmbH ein neues, auf der Finite Elemente Methode basierendes Prozessmodell entwickelt. Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Validierung und Erweiterung dieses Prozessmodells anhand von realen

Anlagen- und Prozessdaten. Vor der eigentlichen Validierung muss zunächst die Datengrundlage aufbereitet und plausibilisiert werden. Die Daten werden von der ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH bereitgestellt und umfassen die Kaltbandproduktion an einer Tandemstraße von August bis Oktober 2021. Zur Validierung des Prozessmodells wird ein Soll-Ist-Vergleich der Messgrößen Walzkraft und Walzmoment, jeweils für den High-Speed- und Low-Speed-Bereich, durchgeführt. Dabei sollen die Eingangsparameter Fließspannung und Reibwert gemäß einer Adaptionlogik iterativ so lange angepasst werden, bis die vom Modell berechneten Werte für Walzkraft und Walzmoment mit den Ist-Werten hinreichend genau übereinstimmen. Dieses Vorgehen soll an einer Tandemstraße stichweise angewendet werden.

Zur Automatisierung der Adaption soll ein Algorithmus implementiert werden, der die Daten automatisch einliest und gemäß der Adaptionlogik die Material- und Reibgesetze iterativ verändert, bis die hinreichende Übereinstimmung der Kräfte und Momente erreicht ist. Die Ergebnisse sollen anschließend zur Verbesserung der Präzision der Stichplanberechnung genutzt werden.

Im folgenden Kapitel 2 werden zunächst ausgewählte Grundlagen des Kaltwalzens behandelt. Der Autor ordnet zunächst das Kaltwalzen in der Prozesskette ein und beschreibt verschiedene Anlagentypen, weiterhin werden die für diese Arbeit relevanten umformtechnischen und technologischen Prozessgrößen eingeführt. Anschließend wird eine Auswahl bekannter Walzmodelle sowie die Datenverarbeitung im Umfeld des Kaltwalzens behandelt.

Kapitel 3 behandelt vorrangig die Tandemstraße als untersuchten Anlagentyp sowie das weiterzuentwickelnde Prozessmodell von allpcloud und Mathweis Engineering und die zu implementierende Adaptionlogik von Mathweis Engineering. Zunächst wird der Aufbau und die Funktionsweise der Tandemstraße beschrieben, weiterhin geht der Autor auf die Datenverarbeitung an der Anlage sowie die Anlagensteuerung und -regelung ein. Anschließend folgt die Einführung des Prozessmodells und der Adaptionlogik.

In Kapitel 4 wird die Aufbereitung und Plausibilisierung der Anlagendaten behandelt. Zunächst werden verschiedene Datenquellen in Bezug auf die Eignung der Daten zur Modellvalidierung untersucht. Anschließend wird die Datenaufbereitung beschrieben und es folgt eine kritische Bewertung der erhaltenen Referenzwerte für die Modellvalidierung. Kapitel 5 beschreibt die im Zuge dieser Arbeit vorgenommenen Erweiterungen des Prozessmodells von Mathweis Engineering und allpcloud. Diese betreffen das automatisierte Einlesen von Eingangsgrößen sowie die Implementierung der Adaptionlogik.

In Kapitel 6 wird das erweiterte Prozessmodell mithilfe der aufbereiteten Anlagendaten von AMEH validiert. Dazu wird zunächst die Vorhersagegenauigkeit des Modells unter gleichen Randbedingungen mit der eines etablierten Walzmodells verglichen. Anschließend wird die Implementierung der Adaptionlogik kritisch bewertet.

Im abschließenden Kapitel 7 werden die im Zuge dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Weiterhin wird ein Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells gegeben.



## 2 Grundlagen des Kaltwalzens

Das Kaltwalzen ist die vierte Prozessstufe der Erzeugung von Flachstahlprodukten. Neben Stahl werden auch Aluminiumlegierungen und andere Nichteisenmetalle kaltgewalzt, diese werden allerdings in deutlich kleineren Mengen verarbeitet (Weber, 1974). Die erste Prozessstufe bei der Flachstahlerzeugung ist der Hochofenprozess. Hier wird Eisenerz mithilfe von Kohlenstoff in Form von Koks und weiteren Zuschlägen zu Roheisen reduziert, welches allerdings aufgrund seiner Materialzusammensetzung sehr spröde und daher nicht zur weiteren umformtechnischen Bearbeitung geeignet ist (Hoffmann et al., 2012). Um die Materialzusammensetzung und damit die Materialeigenschaften gezielt einzustellen, wird das Roheisen in der zweiten Prozessstufe im Stahlwerk zu Stahl weiterverarbeitet. Hierbei wird vor allem der Kohlenstoffgehalt zur Erhöhung der Duktilität des Metalls deutlich abgesenkt (Hegemann und Guder, 2020). Das aktuell vorherrschende Verfahren zur Stahlherstellung ist das Anfang der 1950er Jahre in Österreich entwickelte Linz-Donawitz-Verfahren (kurz LD-Verfahren), nach Hegemann und Guder (2020) werden heute ca. 72% des weltweit erzeugten Stahls auf Basis dieses Verfahrens hergestellt. Der flüssige Stahl wird anschließend in der Gießanlage zu Brammen gegossen. Die dritte Prozessstufe ist das Warmwalzen. Dabei werden die Brammen mit Dicken bis zu 250 mm zu Warmband mit Banddicken zwischen 1,25 und 25 mm ausgewalzt (Hoffmann et al., 2012).

Die vierte Prozessstufe beginnt vor dem Kaltwalzen selbst mit der Beize, in der beim Warmwalzen durch Oxidation auf der Bandoberfläche entstandener Zunder entfernt wird. Dies geschieht meist durch eine chemische Behandlung mit Salzsäure ( $\text{HCl}$ ) oder Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), in speziellen Anwendungen kann auch Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) verwendet werden (Behringer et al., 1971). Die Oberflächenbehandlung ist notwendig, weil der im Vergleich zum Grundmaterial härtere und sprödere Zunder ansonsten die Walzen der Kaltwalzanlagen beschädigt sowie die Qualität des Kaltbandes verschlechtert. Nach der Beize ist das Band für den Kaltwalzprozess aufbereitet, der üblicherweise an einem Reversiergerüst oder einer mehrgerüstigen Tandemstraße durchgeführt wird (Weber, 1974). Diese Anlagentypen werden in Kapitel 2.1 näher beschrieben.

Im Anschluss an das Kaltwalzen wird das Band zur Rekristallisationsglühung in einem Ofen erhitzt, um die durch den Walzprozess eingebrachten Eigenspannungen abzubauen und das ursprüngliche Werkstoffgefüge wiederherzustellen. Dabei können die mechanischen Eigenschaften durch die Einstellung von Ofentemperatur, Haltezeit und Abkühlrate gezielt beeinflusst werden (Hoffmann et al., 2012). Nach dem Glühen erfolgt das sogenannte Dressieren, ein Kaltwalzprozess mit geringer Reduktion. Der vorrangige Nutzen des Dressierens ist die Einstellung einer gleichmäßigen Bandoberfläche mit definierter Bandrauigkeit nach dem Glühen sowie die Eliminierung einer ausgeprägten Steckgrenze, falls diese vorhanden ist (Koll et al., 2016). Außerdem wird die Bandplanheit des Fertigprodukts final eingestellt (Hoffmann et al., 2012). Das Glühen und Dressieren kann

isoliert stattfinden, es sind allerdings auch Kombinationen mit zusätzlichen Prozessen, beispielsweise zur Oberflächenveredelung, möglich. Eine Möglichkeit einer solchen Kombination sind Verzinkungslinien mit integriertem Durchlaufglühofen und Dressiergerüst. Hier wird zunächst die Bandoberfläche gereinigt, anschließend erfolgt die Rekristallisation im Glühofen. Nach dem Verlassen des Ofens läuft das Band durch ein Zinkbad und wird anschließend mit Luft gekühlt, bevor es am Dressiergerüst fertiggestellt wird (Hoffmann et al., 2012). Alternativ oder zusätzlich zur Verzinkung können darüber hinaus weitere Prozessschritte zur Veredelung vorgenommen werden, etwa eine Kunststoffbeschichtung oder das Zuschneiden an Quer- oder Längsteilanlagen (Hoffmann et al., 2012).

In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen des Kaltwalzens behandelt. Zunächst werden dazu verschiedene Bauarten von Kaltwalzanlagen sowie die umformtechnischen und technologischen Grundlagen beschrieben, anschließend wird eine Auswahl bekannter Walzmodelle vorgestellt. Darüber hinaus wird die Datenverarbeitung im Umfeld des Kaltwalzens kurz eingeführt.

## 2.1 Aufgabe und Bauarten von Kaltwalzanlagen

Die Aufgabe von Kaltwalzanlagen ist die Erfüllung der technologischen Zielstellungen des Kaltwalzens. Nach Hensel und Spittel (1978) können diese folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Erzielung dünnerer Abmessungen der warmgewalzten Bleche und Bänder
- Herstellung einer blanken Oberfläche geringer Rautiefe
- Erreichung enger Dickentoleranzen und guter Ebenheit über Breite und Länge
- verbesserte mechanische Eigenschaften durch eine gezielte Kaltverfestigung
- Beeinflussung der physikalischen Eigenschaften.

Hier ist zu beachten, dass je nach Werkstoff und Verwendungszweck des Werkstücks Teilmengen der oben genannten Ziele zurückgestellt werden können, um die Erfüllung von anderen, in der jeweiligen Anwendung priorisierten Zielen zu gewährleisten (Hensel und Poluchin, 1990). Um die hier genannten Zielsetzungen für ein breites Spektrum von Bandwerkstoffen und -geometrien erreichen zu können, werden abhängig von der Walzaufgabe unterschiedliche Arten von Kaltwalzanlagen benötigt.

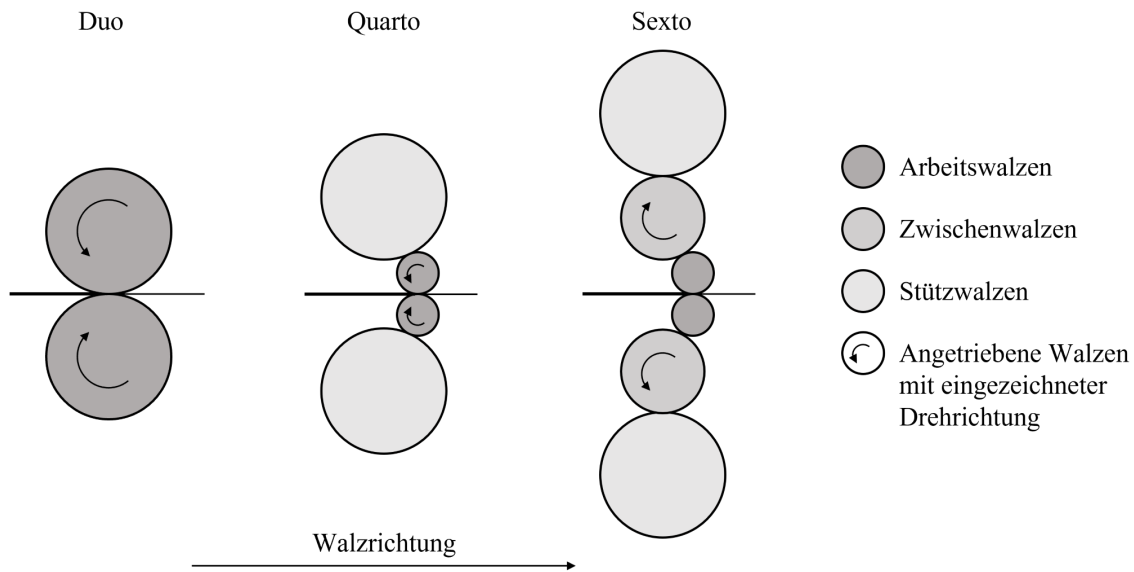
Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt angesprochen, sind die Tandemstraße und das Reversiergerüst die beiden bedeutendsten Bauarten von Kaltwalzanlagen. Im Folgenden werden die Einsatzzwecke und wichtigsten Unterschiede dieser Anlagentypen ausgeführt. Beim Walzen an einer Tandemstraße durchläuft das Band die hintereinander

geschalteten Walzgerüste genau einmal in einer Richtung, wobei in jedem Gerüst eine Einzeldickenreduktion, ein sogenannter Stich, erfolgt. Durch diesen Aufbau haben Tandemstraßen eine höhere Effizienz im Vergleich zu Reversiergerüsten, diese kann durch zusätzliche Automatisierungsmaßnahmen weiter gesteigert werden. Im einfachsten Fall ist die Tandemstraße technisch nicht an die vor- und nachgelagerten Prozesse gekoppelt, sondern wird eigenständig betrieben. Das zu walzende Material wird in Form von Bündeln (oft wird auch der englische Begriff Coil genutzt) angeliefert. Jedes Bündel muss vor dem ersten Walzgerüst aufgesetzt, abgewickelt und durch die Walzspalte der Tandemstraße gefädelt werden. Anschließend wird das Band am Aufhaspel angewickelt und der eigentliche Walzprozess beginnt. Diese entkoppelte Anordnung hat zwar den Vorteil einer gewissen Flexibilität, allerdings bedeutet jeder Coilwechsel mit Einfädeln und Anwickeln effektiv einen Anlagenstillstand. In dieser Konfiguration werden üblicherweise Durchsätze im Bereich von 600.000 - 800.000 Tonnen erreicht (Pittner und Simaan, 2011). Zur Steigerung der Produktivität kann die Tandemstraße weiter automatisiert werden, sodass ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist. Der dazu benötigte Anlagenaufbau wird im Folgenden nach Pittner und Simaan (2011) erläutert. Zunächst ist vor dem Eintritt in die Tandemstraße eine Schweißeinheit notwendig, an der die Bündel zu einem Endlosband zusammengefügt werden. Um einen ununterbrochenen Walzprozess zu gewährleisten, wird zwischen Schweißeinheit und Tandemstraße ein zusätzlicher Bandspeicher benötigt, der in den Zeiträumen zwischen den einzelnen Schweißprozessen gefüllt wird. Während das Bandende zum Verschweißen des nächsten Coils an der Schweißmaschine angehalten wird, wird das gespeicherte Band dem Walzprozess zugeführt, sodass dieser unterbrechungsfrei fortgesetzt werden kann. Auch das Trennen des Endlosbandes in die ursprünglichen Bündel nach dem letzten Walzgerüst kann durch die Installation einer fliegenden Schere bei reduzierter Geschwindigkeit durchgeführt werden, ohne dass die Anlage komplett gestoppt werden muss. Durch den kontinuierlichen Betrieb kann die Produktivität einer Tandemstraße um bis zu 100% gesteigert werden, sodass Durchsätze von 1,2 bis 1,5 Millionen Tonnen im Jahr erreicht werden können (Pittner und Simaan, 2011). Üblicherweise werden in diesem Zuge direkt Beiz- und Walzprozess gekoppelt, wobei die Beize zwischen Schweißeinheit und Tandemstraße angeordnet ist (Hensel und Poluchin, 1990). Aufgrund des höheren Durchsatzes werden möglichst alle Bänder, bei denen die anlagenseitigen Prozessgrenzen nicht verletzt werden, an der Tandemstraße gewalzt. Das Walzen an einem Reversiergerüst zeichnet sich hingegen dadurch aus, dass das Band in seiner Gesamtlänge den Walzspalt mit wechselnder Laufrichtung mehrmals durchläuft (Weber, 1974). Mit jeder Richtungsänderung wird dabei der Walzspalt immer kleiner angestellt und das Band somit über die einzelnen Umformschritte (Stiche) bis auf die Zieldicke, auch Fertigdicke genannt, gewalzt. Das Reversiergerüst wird vor allem für das Walzen von hochfesten Bändern mit großen Querschnitten genutzt, die aufgrund des hohen Kraft- und/oder Arbeitsbedarfs nicht in der bauartbedingt vorgegebenen Anzahl an Stichen am Tandem

gewalzt werden können. Die Herstellung dieser Produkte am Reversiergerüst ist deshalb möglich, weil durch die wechselnde Laufrichtung und schrittweise Reduktion mehr als zehn Stiche hintereinander erfolgen können.

Neben der Bauart der gesamten Anlage können auch die einzelnen Walzgerüste unterschiedlich ausgeführt sein. Die Gerüsttypen unterscheiden sich vor allem in der Anzahl und Anordnung der verwendeten Walzen. Die kleinste walzbare Banddicke eines Gerüsts hängt dabei wesentlich vom Walzendurchmesser ab (Weber, 1974), umgekehrt ist die Eignung eines Gerüsts für eine Walzaufgabe abhängig vom Verhältnis zwischen Walzendurchmesser und Banddicke. Um eine Dickenreduktion des Bandes zu erreichen, muss ein hinreichend hoher lokaler Walzdruck erreicht werden, es muss also eine große Kraft auf eine kleine Fläche wirken. Je größer der Walzenradius ist, desto größer wird die Kontaktfläche zum Walzgut, was bei gleicher Walzkraft zu einem geringeren Walzdruck führt. Der einfachste Aufbau eines Walzgerüsts ist das Duo-Gerüst. Es besteht aus einem Walzenständer mit zwei Walzen, die den Walzspalt bilden und die Umformung durchführen. Aufgrund der zuvor genannten Zusammenhänge zwischen Banddicke, Walzenradius und Walzdruck sind bei dünnen Bändern hohe Walzkräfte und dünne Walzen notwendig, um eine Dickenreduktion zu erzielen. Die Kombination aus dünneren Walzen und höheren Walzkräften führt allerdings zu einer größeren Walzendurchbiegung, welche eine verschlechterte Planheit des Bandes nach sich zieht. Um stabile Walzprozesse auch bei hohen Umformgraden zu gewährleisten, werden in Tandemstraßen und Reversiergerüsten ausschließlich Quarto- oder Sextogerüste mit vier bzw. sechs Walzen betrieben. Dabei hat das Quarto-Gerüst in der Praxis die größte Bedeutung. Duo-Gerüste kommen beim Kaltwalzen ausschließlich zum Dressieren infrage (Hoffmann et al., 2012). Die dünnen Arbeitswalzen (AW) werden beim Quarto durch Stützwalzen (SW), beim Sexto durch Stützwalzen und zusätzliche Zwischenwalzen (ZW) mit deutlich größeren Durchmessern abgestützt. Nach Weber (1974) beträgt das Durchmesser Verhältnis von Arbeits- und Stützwalze beim Quarto etwa 1:3. Durch die Abstützung der schlanken Arbeitswalzen kann auch bei dünnen Bändern ein hoher Walzdruck in Verbindung mit einer guten Oberflächenqualität gewährleistet werden.

Um eine stabile Abstützung der Arbeitswalzen zu gewährleisten und beispielsweise eine Biegung um die Stützwalze herum zu verhindern, werden die Arbeitswalzen außerdem in Walzrichtung um wenige Millimeter aus der Gerüstachse versetzt (Bähr und Falkenhagen, 1970). Die Walzenanordnung für die Gerüsttypen Duo, Quarto und Sexto sowie der Arbeitswalzenversatz sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Für spezielle Anwendungen wie das Walzen von höchstfesten (Edel-)Stählen oder das Folienwalzen von Stahl und Aluminiumlegierungen kommen darüber hinaus auch Mehrrollengerüste wie das 18- oder 20-Rollen-Gerüst zum Einsatz (Hoffmann et al., 2012). Sie ermöglichen das Walzen mit extrem schlanken Arbeitswalzen, indem diese von mehreren Seiten durch Stützwalzen stabilisiert werden. Da die schlanken Arbeitswalzen das nötige Antriebsmoment häufig

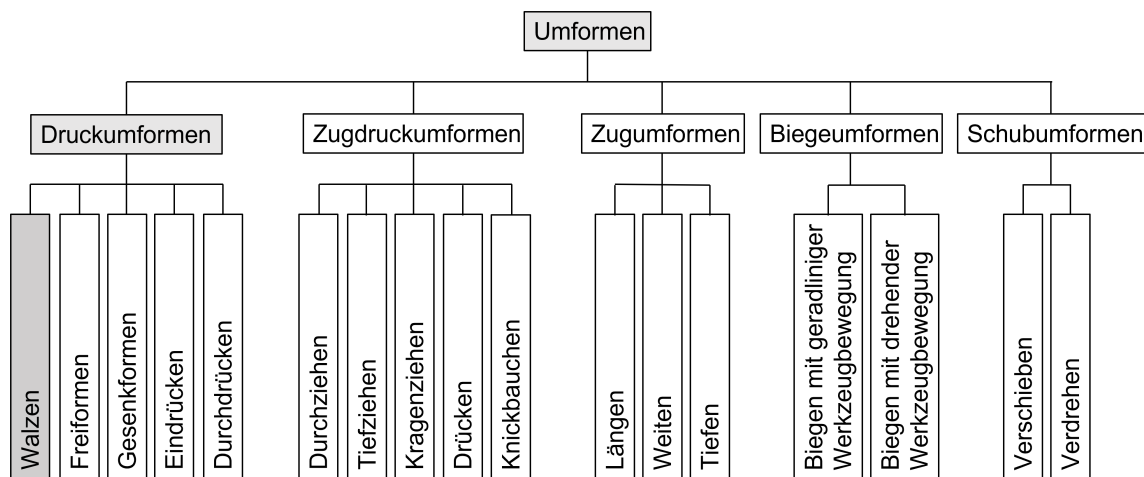


**Abbildung 2.1:** Walzenanordnungen für das Duo-, Quarto- und Sextogerüst (angelehnt an Hoffmann et al. (2012, S. 124)), der Horizontalversatz der Arbeitswalzen ist stark übertrieben dargestellt

nicht übertragen können, werden sie durch Reibschluss von den Stützwalzen angetrieben (Schwenzfeier, 1979).

## 2.2 Umformtechnische und technologische Grundlagen

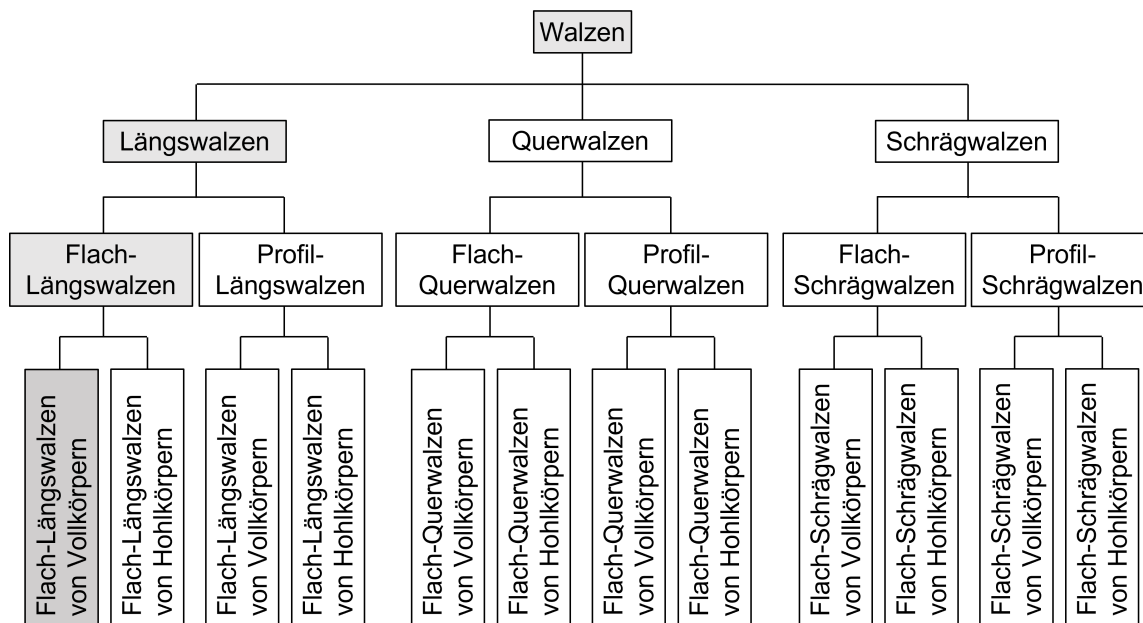
Aus umformtechnischer Sicht ist das Walzen ein Umformverfahren mit direkter Druckwirkung (Hensel und Spittel, 1978). Nach DIN 8582 (2003) ist das Walzen demnach in der Untergruppe der Druckumformverfahren eingeteilt (vgl. Abbildung 2.2).



**Abbildung 2.2:** Einteilung der Umformverfahren nach DIN 8582 (2003)

Nach Lange (1988) kann das Walzen als stetiges oder schrittweises Druckumformen mit einem oder mehreren sich drehenden Werkzeugen beschrieben werden. Weiterhin können dabei Zusatzwerkzeuge zum Einsatz kommen, während die Krafteinwirkung entweder

durch angetriebene oder vom Walzgut mitgeschleppte Walzen erfolgen kann (Lange, 1988). Die Gesamtheit aller Walzprozesse lässt sich anhand verschiedener Kriterien weiter unterteilen, nach DIN 8583-2 (2003) sind diese Kriterien die Kinematik (Längs-/Schräg-/Querwalzen), die Werkzeuggeometrie (Flach-/Profilwalzen) und die Werkstückgeometrie (Walzen von Hohl-/Vollkörpern). Die Unterteilung ist schematisch in Abbildung 2.3 dargestellt. In dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich das Flach-Längswalzen von Vollkörpern, genauer gesagt warmgewalztem Band, behandelt, bei dem das Walzgut sich zwischen zwei in entgegengesetzter Richtung drehenden Walzen mit parallelen Achsen bewegt. Hierbei erfolgt eine Dickenabnahme und damit eine Streckung in Längsrichtung (Hensel und Spittel, 1978), wobei unterschiedliche, bedarfsabhängige Walzgerüste zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 2.1).



**Abbildung 2.3:** Einteilung der Walzverfahren nach DIN 8583-2 (2003)

Eine weitere, in Abbildung 2.3 nicht dargestellte, aber in der Praxis sehr wichtige Möglichkeit zur Gruppierung der Walzprozesse ist die Prozesstemperatur. Anhand dieser werden die Prozesse des Warm- und Kaltwalzens unterschieden. Die Unterteilung findet anhand der Rekristallisationstemperatur des jeweiligen Werkstoffes statt. Das in dieser Arbeit vorrangig behandelte Kaltwalzen ist dabei so definiert, dass es bei Temperaturen unterhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffes durchgeführt wird, üblicherweise bei Raumtemperatur (Teupel, 1980). Durch die eingebrachte Umformenergie findet allerdings auch beim Kaltwalzen eine Erwärmung des Walzgutes auf über  $200^{\circ}\text{C}$  statt, in Bähr und Falkenhagen (1970) wird die maximal mögliche Auslauftemperatur des Bandes beim Walzen auf mehrgerüstigen Straßen auf ungefähr  $300^{\circ}\text{C}$  geschätzt. Die Grenztemperatur beim Kaltwalzen wird dabei durch die Beständigkeit des Ölfilms im Walzspalt limitiert. Dieser verringert die Reibung im Walzspalt und damit den Kraft- und Arbeitsbedarf des Prozes-

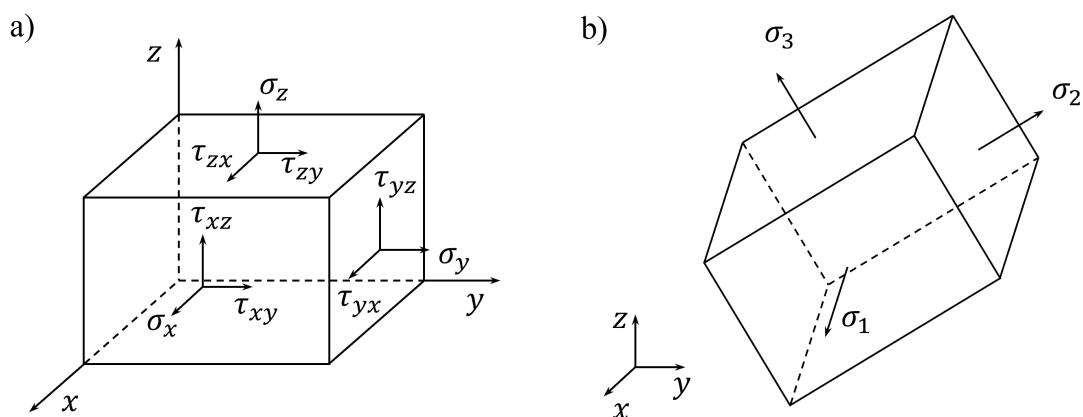
ses, außerdem wirkt der Schmierstoff gleichzeitig als Kühlmedium (Hensel und Poluchin, 1990).

### 2.2.1 Plastizitätstheorie

Grundsätzlich wird in der Umformtechnik zwischen elastischer und plastischer Verformung unterschieden. Sobald ein metallischer Körper mit einer Kraft belastet wird, verformt er sich zunächst proportional zur aufgebrachten Kraft elastisch. Nach der Entlastung kehrt der Körper in seine ursprüngliche Gestalt zurück, die Verformung ist also reversibel. In allen umformtechnischen Prozessen, und damit auch beim Walzen, soll ein Körper jedoch plastisch, also bleibend, verformt werden. Die dazu notwendigen Bedingungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### Fließgrenze, Spannungszustand und Vergleichsspannung

Um den Zustand einer plastischen Verformung zu erreichen, muss der metallische Körper einer hinreichend großen Belastung ausgesetzt werden, sodass die innere Spannung die sogenannte Fließgrenze  $k_f$  erreicht und plastisches Fließen einsetzt. Der Spannungszustand in einem belasteten Körper ist im Allgemeinen dreidimensional. In einem kartesischen Koordinatensystem kann er durch neun Größen, drei Normalspannungen  $\sigma_i$  sowie sechs Schubspannungen  $\tau_{ij}$  beschrieben werden (Hinkfoth, 2003). Der Spannungszustand eines Volumenelements in der Grundausrichtung nach dem Koordinatensystem ist in Abbildung 2.4 a) dargestellt. Nach Hinkfoth (2003) kann jedes Volumenelement so im Raum



**Abbildung 2.4:** Spannungen am Volumenelement, a) in der Grundausrichtung, b) in den Hauptspannungszustand gedreht (angelehnt an Hinkfoth (2003, S. 22))

gedreht werden, dass die Schubspannungen verschwinden und ausschließlich Normalspannungen auftreten. Dieser Spannungszustand wird Hauptspannungszustand genannt und ist in Abbildung 2.4 b) dargestellt. Die Hauptspannungen werden als  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  bezeichnet, wobei  $\sigma_1$  als größte und  $\sigma_3$  als kleinste Zugspannung definiert ist (Hinkfoth,

2003). Es gilt also die Notation

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \quad (2.1)$$

Zum Vergleich des dreidimensionalen Spannungszustandes mit der skalaren Fließgrenze wird eine ebenfalls skalare Vergleichsspannung  $\sigma_v$  gebildet. Nach Hinkfoth (2003) lautet die Fließbedingung demnach:

$$\sigma_v = k_f. \quad (2.2)$$

Die Vergleichsspannung ist je nach Prozess unterschiedlich zu bestimmen. Bei einfachen Referenzprozessen wie dem Zugversuch herrscht ein einachsiger Spannungszustand vor. Die Vergleichsspannung der Probe kann hier direkt über die Zugkraft und die Querschnittsfläche berechnet werden (Gross et al., 2021a). Bei umformtechnisch komplexeren Prozessen wie dem Walzprozess herrscht ein mehrachsiger Spannungszustand vor. Zur Überführung mehrachsiger Spannungszustände in die einachsige Vergleichsspannung werden verschiedene Ansätze genutzt. Eine der bekanntesten Vorschriften ist die bereits Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte Vergleichsspannung nach Tresca (1864):

$$\sigma_{v,Tresca} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|). \quad (2.3)$$

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  sind dabei die drei Hauptspannungen. Eine weitere sehr bekannte Vergleichsspannungshypothese wurde knapp 50 Jahre später von v. Mises (1913) eingeführt:

$$\sigma_{v,v.Mises} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (2.4)$$

Nach Hinkfoth (2003) kann beim Flachwalzen ein mittelwertiger Spannungszustand angenommen werden. Unter Berücksichtigung von Gleichung (2.1) gilt demnach

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (2.5)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.5) in die Gleichungen (2.3) und (2.4), können diese zu

$$\sigma_{v,Tresca} = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (2.6)$$

und

$$\sigma_{v,v.Mises} = \frac{\sqrt{3}}{2} [\sigma_1 - \sigma_3]. \quad (2.7)$$

vereinfacht werden, ebenfalls unter der Annahme aus Gleichung (2.1). In der Praxis wird heute meist die Vergleichsspannung nach von Mises verwendet, da sie das reale Werk-



stoffverhalten besser beschreibt. Dies wird durch experimentelle Ergebnisse untermauert (Wandinger, 2020). Wird also die Vergleichsspannungshypothese nach von Mises genutzt, so lautet unter der Annahme aus Gleichung (2.5) die Bedingung zum Beginn plastischen Fließens beim Walzen

$$\frac{\sqrt{3}}{2}[\sigma_1 - \sigma_3] = k_f. \quad (2.8)$$

Zur Vereinfachung der Gleichung wird die Fließgrenze für die ebene Formänderung als

$$k_e = \frac{2}{\sqrt{3}}k_f \quad (2.9)$$

definiert, sodass sich final die Fließbedingung

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_e \quad (2.10)$$

ergibt. Beim Walzprozess wird die Spannung im Band vor allem von der Walzkraft beeinflusst, die durch die Walzen eine Druckspannung auf die Bandoberfläche überträgt. Da die Bänder meist unter Zugeinwirkung (Vor- und Rückzug, s. Kapitel 2.2.4) gewalzt werden, sorgen diese Züge zusätzlich für eine Zugspannung im Band. Das Einbringen der Zugspannung erhöht die Vergleichsspannung und verringert somit die erforderliche Druckspannung (und damit auch die erforderliche Walzkraft). Darüber hinaus werden durch die Reibung bei der Übertragung des Walzenmoments Schubspannungen im Band erzeugt.

### **Einflussgrößen auf die Fließgrenze**

Die Fließgrenze  $k_f$  ist nicht konstant, sondern wird von mehreren Einflussfaktoren bestimmt. Diese sind im Allgemeinen der zu verarbeitende Werkstoff, der Umformgrad  $\varphi$ , die Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$  und die Temperatur  $\vartheta$  (Hinkfoth, 2003). Somit ergibt sich

$$k_f = f(\text{Werkstoff}, \varphi, \dot{\varphi}, \vartheta) \quad (2.11)$$

Neben dem Werkstoff selbst ist der wichtigste Einflussfaktor auf die Fließgrenze der Umformgrad  $\varphi$ . Dieser ist im Kontext des Walzens als

$$\varphi = \ln \left( \frac{h_E}{h_A} \right) \quad (2.12)$$

definiert, wobei  $h_E$  die Banddicke vor und  $h_A$  die Banddicke nach dem Walzprozess bezeichnet. Die plastische Umformung von Metallen führt zu Versetzungen auf mikroskopischer Ebene, die den Gleitvorgang der einzelnen Gitterebenen und damit das plastische Fließen erschweren (Hensel und Spittel, 1978). Somit führt jede plastische Verformung zu einer Erhöhung der Fließgrenze für nachfolgende Umformschritte (Lange, 2002). Mit

zunehmendem Umformgrad nimmt der Einfluss von weiteren Umformungen allerdings ab, sodass der Anstieg der Fließkurve immer flacher ausfällt (Bähr und Falkenhagen, 1970). Zur Ermittlung von Fließkurven werden verschiedene Verfahren angewendet. Die Eignung eines solchen Verfahrens zur Fließkurvenermittlung ist dabei abhängig vom Umformprozess. Für das Kaltwalzen sind laut Bähr und Falkenhagen (1970) der Zugversuch und der Flachstauchversuch geeignet.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Fließgrenze ist die Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$ . Bei hohen Umformgeschwindigkeiten können die bei der Umformung entstehenden Versetzungen und die daraus resultierenden Eigenspannungen nicht schnell genug abgebaut werden, sodass der Materialwiderstand gegen weitere Verformungen steigt Kopp und Wiegels (1999).

Als letzte Einflussgröße bleibt nach Gleichung (2.11) die Temperatur  $\vartheta$ . Die Kaltverfestigung infolge der Umformung findet vor allem bei niedrigen Temperaturen in der Nähe der Raumtemperatur statt (Weber, 1974). Bei höheren Temperaturen, vor allem oberhalb der Rekristallisationstemperatur, wird sie von Erholungs- und Entfestigungsvorgängen überlagert, die der Kaltverfestigung entgegenwirken (Kopp und Wiegels, 1999). Dieser Effekt sorgt beim Warmwalzen und anderen Warmumformverfahren für einen geringeren Kraftbedarf gegenüber der Kaltumformung (Herbertz et al., 2013). Die Entfestigung durch die Temperatur kann darüber hinaus den Einfluss der Umformgeschwindigkeit abschwächen (Weber, 1974). Bei höheren Geschwindigkeiten bleibt weniger Zeit für die Abfuhr der Umformenergie, was eine Erhöhung der Temperatur nach sich zieht. Somit treten gleichzeitig verfestigende Effekte durch die Umformgeschwindigkeit und entfestigende Effekte durch Temperatureinflüsse auf.

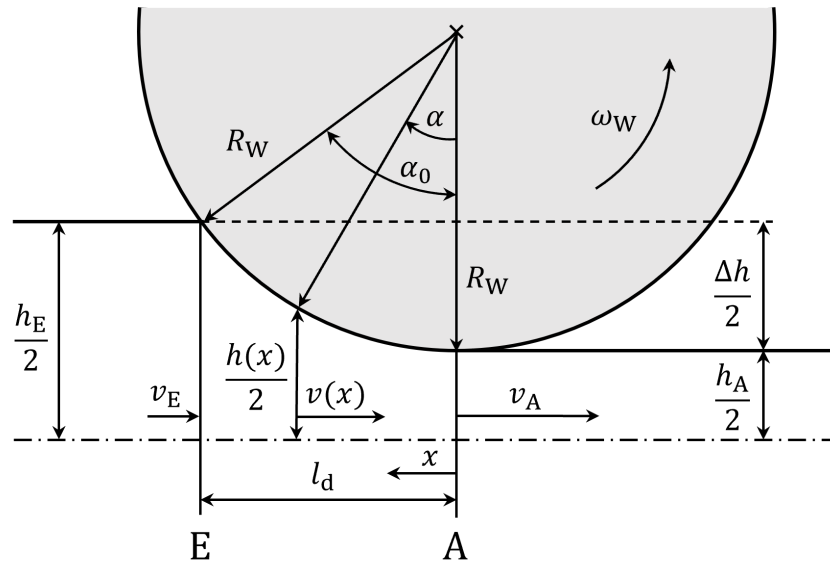
### 2.2.2 Walzspaltgeometrie

Im folgenden Abschnitt wird die Geometrie des Walzspalts beschrieben. Dabei werden einige geometrische Größen eingeführt, die für den Walzprozess charakteristisch sind. Sämtliche Zusammenhänge, die in diesem Kapitel hergeleitet werden, können anhand von Abbildung 2.5 nachvollzogen werden. Aufgrund der Walzspaltsymmetrie ist es ausreichend, dass nur die obere Hälfte des Walzspaltes dargestellt wird.

Der Walzspalt ist vom Punkt des ersten Kontakts des Walzgutes mit der Walze (E) bis zum Kontaktverlust (A) definiert (Schwenzfeier, 1979). Im Punkt E tritt das Walzgut mit der Dicke  $h_E$  und der Geschwindigkeit  $v_E$  in den Walzspalt ein, im Punkt A verlässt es den Walzspalt mit der Dicke  $h_A$  und der Geschwindigkeit  $v_A$ . Eine zentrale Größe des Walzprozesses ist die absolute Dickenabnahme des Bandes zwischen Walzspaltein- und -austritt, die als

$$\Delta h = h_E - h_A \quad (2.13)$$

definiert ist und zur Bestimmung weiterführender Kennwerte benötigt wird. Mithilfe der



**Abbildung 2.5:** Skizze der Walzspaltgeometrie unter Berücksichtigung der Walzspaltsymmetrie (angelehnt an Kopp und Wiegels (1999, S. 165))

Dickenabnahme kann beispielsweise die Reduktion

$$\varepsilon = \frac{h_E - h_A}{h_E} = \frac{\Delta h}{h_E} \quad (2.14)$$

berechnet werden, diese ist eine wichtige Kenngröße bei der Auslegung und Bewertung von Walzvorgängen in der Praxis (Weber, 1974). Die Dimension des Walzspaltes kann durch die gedrückte Länge  $l_d$  oder den Walzwinkel  $\alpha_0$  ausgedrückt werden. Die gedrückte Länge bezeichnet dabei die horizontale Länge des Walzspaltes und kann aus der Geometrie zu

$$l_d = \sqrt{R_W^2 - \left[R_W - \frac{\Delta h}{2}\right]^2} = \sqrt{R_W \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (2.15)$$

bestimmt werden. Da  $R_W \gg \Delta h$  gilt, kann der quadratische Anteil vernachlässigt und die Gleichung zu

$$l_d \approx \sqrt{R_W \Delta h} \quad (2.16)$$

vereinfacht werden. Der Walzwinkel  $\alpha_0$  lässt sich ebenfalls mithilfe der Walzspaltgeometrie aus dem Walzenradius und der Dickenabnahme bestimmen. Die Vorschrift lautet

$$\alpha_0 = \arccos\left(\frac{R_W - \frac{\Delta h}{2}}{R_W}\right). \quad (2.17)$$

Neben den Ein- und Austrittsgrößen sowie der Dimension des Walzspaltes sind vor allem die Prozessgrößen im Walzspalt interessant. Jeder Punkt im Walzspalt kann durch die Längenkoordinate  $x$  oder die Winkelkoordinate  $\alpha$  beschrieben werden. Mithilfe des

Walzenradius  $R_W$  kann die Beziehung

$$x = R_W \sin(\alpha). \quad (2.18)$$

zwischen beiden Systemen hergestellt werden. Aus den bisher bekannten Größen kann beispielsweise die Banddicke in Abhängigkeit der  $x$ -Koordinate ermittelt werden. Aus dem geometrischen Ansatz

$$R_W^2 = x^2 + \left[ R_W + \frac{h_A}{2} - \frac{h(x)}{2} \right]^2 \quad (2.19)$$

ergibt sich durch einige Umformungen die Banddicke

$$h(x) = h_A + 2R_W \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_W^2}} \right] \quad (2.20)$$

in Abhängigkeit von  $x$ . Durch Einsetzen von Gleichung (2.18) lässt sich alternativ die Banddicke in Abhängigkeit von  $\alpha$  zu

$$h(\alpha) = h_A + 2R_W [1 - \cos(\alpha)] \quad (2.21)$$

bestimmen. Um aus der Banddicke  $h(x)$  auf die zugehörige Bandgeschwindigkeit  $v(x)$  schließen zu können, muss zunächst die Volumenkonstanz betrachtet werden. Diese ist eine grundlegende Annahme der Plastizitätstheorie und besagt, dass sich der Werkstoff inkompressibel verhält und damit während des Fließvorgangs keine Volumenänderungen auftreten (Lange, 2002). Auf den Walzspalt bezogen gilt also

$$V_E = V(x) = V_A. \quad (2.22)$$

Abgeleitet nach der Zeit ergibt sich daraus die Kontinuitätsgleichung

$$\dot{V}_E = \dot{V}(x) = \dot{V}_A, \quad (2.23)$$

welche sich zu

$$A_E v_E = A(x) v(x) = A_A v_A \quad (2.24)$$

und schließlich zu

$$h_E b_E v_E = h(x) b(x) v(x) = h_A b_A v_A \quad (2.25)$$

präzisieren lässt. Da beim Kaltwalzen von Bändern nahezu kein Werkstofffluss in Quer-

richtung stattfindet, kann die Breitung vernachlässigt und

$$b = \text{const.} \quad (2.26)$$

angenommen werden (Weber, 1974). Dadurch lässt sich Gleichung (2.25) zu

$$h_E v_E = h(x) v(x) = h_A v_A \quad (2.27)$$

vereinfachen. Dieser Zusammenhang zeigt, dass aufgrund der Dickenreduktion im Walzspalt die Austrittsgeschwindigkeit immer größer sein muss als die Eintrittsgeschwindigkeit, also

$$v_E \leq v(x) \leq v_A \quad (2.28)$$

gilt. Die Geschwindigkeit an jedem Punkt  $x$  im Walzspalt lässt sich somit zu

$$v(x) = \frac{h_E v_E}{h(x)} = \frac{h_A v_A}{h(x)} \quad (2.29)$$

berechnen. Analog ergibt sich die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  zu

$$v(\alpha) = \frac{h_E v_E}{h(\alpha)} = \frac{h_A v_A}{h(\alpha)}. \quad (2.30)$$

Zusammenfassend können aus der Walzspaltgeometrie die horizontale und tangentielle Ausdehnung des Walzspaltes sowie der Dicken- und Geschwindigkeitsverlauf im Walzspalt berechnet werden. Als bekannte Randbedingungen werden dazu mindestens der Walzenradius  $R_W$ , eine Geschwindigkeit ( $v_E$  oder  $v_A$ ), eine Banddicke ( $h_E$  oder  $h_A$ ) sowie eine Information über die Dickenabnahme ( $\Delta h$ ,  $\varepsilon$  oder die jeweils andere Geschwindigkeit/Banddicke) vorausgesetzt.

### 2.2.3 Reibverhältnisse im Walzspalt

Die Reibung im Walzspalt ist eine grundlegende Bedingung für den Walzprozess. Sie ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass das von den Walzen aufgebrachte Drehmoment auf das Walzgut übertragen und dieses durch den Walzspalt durchgezogen werden kann. Zur Quantifizierung der Reibverhältnisse wird meist der Coulombsche Reibbeiwert  $\mu$  verwendet, der die auf das Walzgut drückende Normalkraft  $F_N$  mit der daraus resultierenden und tangential zur Kontaktfläche wirkenden Reibkraft  $F_R$  ins Verhältnis setzt (Weber, 1974). Es gilt

$$F_R = \mu F_N. \quad (2.31)$$

Um das Walzmoment auf das Walzgut zu übertragen, muss  $\mu$  hinreichend hoch sein, da bei Unterschreitung einer kritischen Mindestreibung die Walzen durchrutschen. Die Reibung kann allerdings auch nicht beliebig hoch eingestellt werden, da mit höherer Reibung auch der Kraft- und Arbeitsbedarf beim Walzen steigt. Aufgrund dieser Einflüsse ist eine möglichst genaue Beschreibung der Reibverhältnisse sehr wichtig, da sie die Prozessstabilität sowie die Vorausberechnung von Kraft- und Arbeitsbedarf der Anlage maßgeblich beeinflussen.

Die Reibung ist allerdings ähnlich wie die Fließspannung  $k_f$  von verschiedenen Faktoren abhängig, was eine genaue Beschreibung erschwert. In Weber (1974) werden in diesem Zuge die Oberflächenbeschaffenheiten der Reibpartner, die vorhandene Form der Reibung sowie Druck, Walzgeschwindigkeit und Walztemperatur genannt. Mit steigender Walzgeschwindigkeit sinkt der Reibbeiwert aufgrund hydrodynamischer Effekte und nähert sich bei sonst konstanten Verhältnissen schließlich einem unteren Grenzwert (Hensel und Spittel, 1978). In Overhagen (2018) werden die Einflussfaktoren darüber hinaus um die Stichformänderung sowie die Eigenschaften der Schmierung ergänzt. Aufgrund der Vielzahl von Einflüssen, die zum Teil in Wechselwirkung zueinander stehen, ist nach heutigem Stand keine exakte mathematische Beschreibung der Reibung im Walzspalt möglich. In Becker (1980) wird die empirische Gleichung

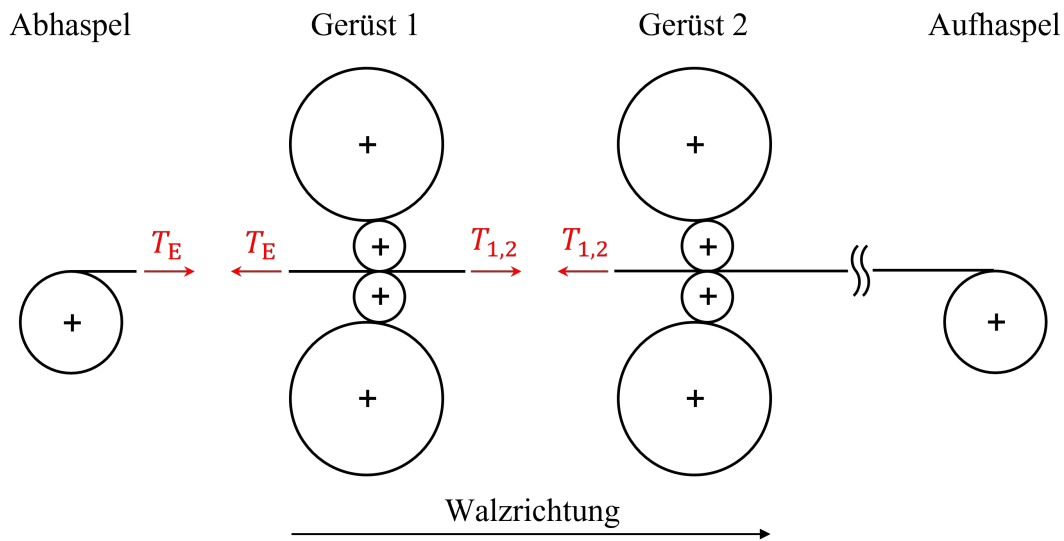
$$\mu = Q_6[Q_4 + Q_5 \ln(v_W)] \quad (v_W \text{ in m/min}) \quad (2.32)$$

zur Ermittlung des Reibbeiwerts beim Kaltwalzen vorgestellt, wobei  $Q_4$ ,  $Q_5$  und  $Q_6$  empirisch bestimmte Konstanten darstellen.  $Q_4$  und  $Q_5$  beinhalten dabei die Walzenoberfläche sowie den Einfluss der Schmierung,  $Q_6$  ist abhängig vom Walzgutwerkstoff. Werte für  $Q_4$ ,  $Q_5$  und  $Q_6$  lassen sich für verschiedene Konstellationen aus der in Becker (1980, S. 69) beigefügten Tabelle ermitteln. In der Praxis werden häufig empirische Reibwertkurven, die vorrangig den Einfluss der Geschwindigkeit abbilden, zur grundlegenden Beschreibung der Reibung genutzt. Um die Vorhersagequalität von Kraft- und Arbeitsbedarf zu erhöhen, werden die Kurven darüber hinaus häufig mithilfe von Anlagendaten adaptiert.

#### 2.2.4 Einfluss des Bandzuges auf den Walzprozess

Eine weitere wichtige Komponente beim Walzen ist der Bandzug  $T$ . Dieser bezeichnet eine Zugkraft im Band, die durch Geschwindigkeitsunterschiede der Haspel und Walzen erzeugt wird. An nahezu jeder Kaltwalzanlage wird über den Abhaspel ein Einlaufzug  $T_E$  und über den Aufhaspel ein Auslaufzug  $T_A$  eingebracht. Bei mehrgerüstigen Tandemstraßen werden darüber hinaus Züge zwischen den einzelnen Gerüsten aufgebaut. Diese Zwischengerüstzüge können deutlich höher sein als die Haspelzüge, was in der höheren Leistungsaufnahme der Walzantriebe begründet ist (Weber, 1974).

Für jeden Stich werden außerdem der einlaufseitige Rückzug  $T_R$  und der auslaufseitige



**Abbildung 2.6:** Ausschnitt aus der Bandzugverteilung am Quartotandem

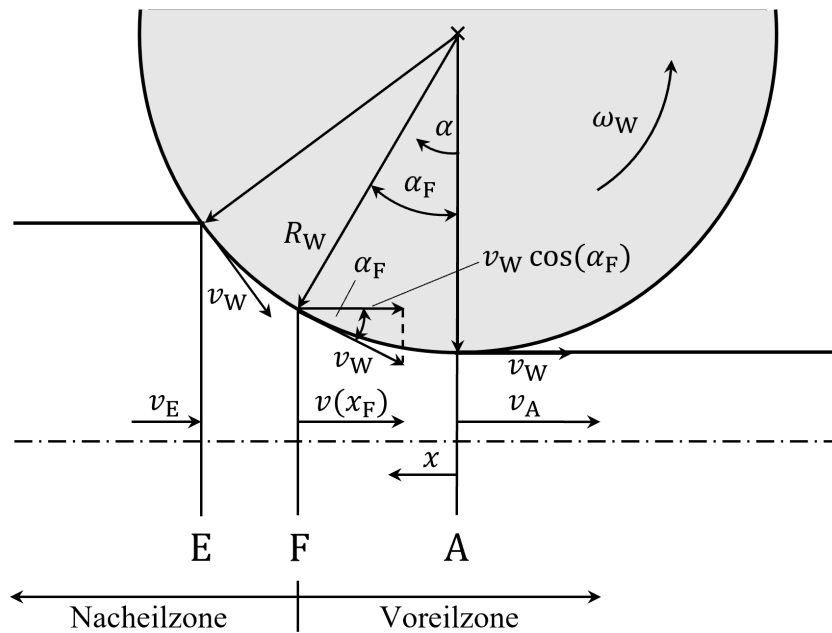
Vorzug  $T_V$  definiert. Da der Bandzug immer im Zwischengerüstbereich wirkt, entspricht bei einer mehrgerüstigen Tandemstraße jeder Zwischengerüstzug  $T_{i,j}$  sowohl dem Vorzug im Vorgängergerüst  $G_i$  als dem Rückzug im nachfolgenden Gerüst  $G_j$ . Diese Beziehung ist beispielhaft in Abbildung 2.6 dargestellt, wo aufgrund des Kräftegleichgewichts sowohl für den Vorzug in  $G_1$  als auch für den Rückzug in  $G_2$  der Zwischengerüstzug  $T_{1,2}$  eingetragen ist.

Im Walzprozess erfüllt der Bandzug vornehmlich zwei Aufgaben. Zum ersten muss das Band durch Aufbringen einer Mindestzugkraft vor und hinter dem Walzspalt straff gehalten werden, ansonsten könnte das Band im Walzspalt seitlich verlaufen (Hoffmann et al., 2012). Ein möglicher Grund für ein solches Verhalten ist eine unterschiedliche Dickenabnahme über die Bandbreite. Der zweite wichtige Nutzen des Bandzuges ist sein Einfluss auf den Spannungszustand im Band. Aufgrund der Zugkraft steigt der  $\sigma_1$ -Anteil der Vergleichsspannung an (vgl. Gleichung (2.10)), wodurch zum Erreichen der Fließgrenze  $k_f$  weniger Druck ( $\sigma_3$ ) und damit weniger Walzkraft aufgewendet werden muss (Hoffmann et al., 2012). Durch den Bandzug kann also im Zuge der Walzkraftabsenkung die Anlagenbelastung reduziert werden. Demzufolge können Walzaufgaben durchgeführt werden, die ohne Bandzüge die prozesstechnischen Grenzen verletzen würden.

### 2.2.5 Vor- und Nacheilung

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, gilt für das gewalzte Band die Volumenkonstanz. Dies führt neben unterschiedlichen Geschwindigkeiten am Ein- und Auslauf eines Walzgerüsts auch zu einer sich kontinuierlich ändernden Geschwindigkeit über die Walzspalllänge, da jede infinitesimale Dickenabnahme durch einen entsprechenden Anstieg der Bandgeschwindigkeit ausgeglichen wird. Im Gegensatz dazu kann die Walzenumfangsgeschwindigkeit  $v_W$  nach Gross et al. (2021b) über die gesamte Walzspalllänge als konstant

angenommen werden, da sie das Produkt aus dem Radius  $R_W$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_W$  der Walze ist (vgl. Abbildung 2.7). Dabei gilt üblicherweise  $v_E < v_W < v_A$ .



**Abbildung 2.7:** Grafische Darstellung der Geschwindigkeiten an der Fließscheide sowie in der Vor- und Nacheilzone (angelehnt an Hinkfoth (2003, S. 138))

Aus der kontinuierlichen Änderung der Bandgeschwindigkeit  $v(x)$  zwischen Einlauf und Auslauf ergibt sich, dass an genau einer Position im Walzspalt die Bandgeschwindigkeit gleich dem horizontalen Anteil der Walzenumfangsgeschwindigkeit sein muss. Dieser Punkt im Walzspalt wird als Fließscheide (Punkt F in Abbildung 2.7) mit der Fließscheidenlage  $x_F$  bezeichnet (Weber, 1974). Es gilt

$$v(x_F) = v_W \cos(\alpha_F). \quad (2.33)$$

Da die Walzwinkel beim Bandwalzen nach Weber (1974) kaum größer als  $10^\circ$  sind, kann  $\cos(\alpha_F) \approx 1$  angenommen werden, sodass meist die Vereinfachung

$$v(x_F) \approx v_W \quad (2.34)$$

genutzt wird. Die Fließscheide ist für den Walzprozess von besonderer Bedeutung, da sich hier die Richtung der Relativgeschwindigkeit zwischen Band und Walze ändert. Zwischen Walzspalteintritt ( $x_E$ ) und der Fließscheide ( $x_F$ ) ist die Relativgeschwindigkeit negativ, zwischen Fließscheide und Walzspaltaustritt ( $x_A$ ) ist sie positiv. Der Bereich zwischen Walzspalteintritt und Fließscheide heißt demnach Nacheilzone, da das Band der Walze „nacheilt“, der Bereich zwischen Fließscheide und Walzspaltaustritt wird analog Voreil-



zone genannt. Zusammenfassend gilt für die Relativgeschwindigkeit

$$v(x) - v_W \begin{cases} < 0 & \text{wenn } x_E \geq x > x_F, \\ = 0 & \text{wenn } x = x_F, \\ > 0 & \text{wenn } x_F > x \geq x_A. \end{cases} \quad (2.35)$$

Aus dem Vorzeichenwechsel der Relativgeschwindigkeit ergeben sich weitere Zustandsänderungen an der Fließscheide. Direkt aus dem Vorzeichenwechsel der Geschwindigkeit folgt ein Richtungswechsel der Reibung zwischen Walze und Band. Die resultierende Reibkraft zwischen zwei Flächen wirkt per Definition immer entgegen der Relativgeschwindigkeit der beiden Flächen, sodass die dadurch resultierenden Schubspannungen in der Voreilzone entgegen und in der Nacheilzone in Walzrichtung gerichtet sind (Weber, 1974). Gängige Größen zur Beschreibung der Ausprägung der beiden Zonen sind die Vor- und Nacheilung. Diese sind als Abweichung der Bandgeschwindigkeit am Aus- und Einlauf definiert. Nach Lippmann und Mahrenholtz (1967) gilt

$$\kappa_V = \frac{v_A - v_W \cos(\alpha_F)}{v_W \cos(\alpha_F)} \approx \frac{v_A - v_W}{v_W} \quad (2.36)$$

für die Voreilung und

$$\kappa_N = \frac{v_W \cos(\alpha_F) - v_E}{v_W \cos(\alpha_F)} \approx \frac{v_W - v_E}{v_W} \quad (2.37)$$

für die Nacheilung. Üblicherweise werden die Ergebnisse im Nachgang mit 100% multipliziert und als prozentuale Abweichung angegeben. Vor- und Nacheilung sind nach Weber (1974) insbesondere an mehrgerüstigen Tandemstraßen von Bedeutung, da die Zwischengerüstzüge jeweils durch die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Gerüsten eingestellt werden (vgl. Kapitel 2.2.4). Damit die einzelnen Gerüste regelungstechnisch optimal aufeinander abgestimmt werden können, müssen Vor- und Nacheilung berücksichtigt werden. Mithilfe der Volumenkonstanz lassen sich Vor- und Nacheilung in Abhängigkeit der Walzspaltgeometrie bestimmen. Dies wird an dieser Stelle nur für die Voreilung gezeigt, ist aber analog auch für die Nacheilung möglich. Durch Einsetzen von Gleichung (2.33) in (2.27) ergibt sich

$$v_A = \frac{h(x_F)}{h_A} v_W \cos(\alpha_F) \approx \frac{h(x_F)}{h_A} v_W. \quad (2.38)$$

Eingesetzt in Gleichung (2.36) ergibt sich für die Voreilung

$$\kappa_V = \frac{h(x_F)}{h_A} - 1. \quad (2.39)$$

Die Fliescheidenlage  $h(x_F)$  lässt sich mithilfe von Gleichung (2.20) berechnen, analog ist die Berechnung in Abhängigkeit von  $\alpha_F$  mithilfe von Gleichung (2.21) möglich. Die Position der Fließscheide spielt bei der Berechnung der Voreilung also eine zentrale Rolle, die Berechnungsgenauigkeit ist vor allem von einer korrekten Annahme der Fliescheidenlage  $x_F$  und damit auch der Banddicke  $h(x_F)$  abhängig. Ein anderer Ansatz zur Berechnung der Voreilung, bei dem keine Kenntnis der Fliescheidenlage vorausgesetzt wird, wird nach Overhagen (2018) in Ekelund (1933) vorgestellt. Die dort beschriebene empirische Gleichung lautet

$$\kappa_V = \frac{3}{4} \left[ \frac{\psi_E^2}{2} \left[ \frac{2R_W}{h_A} - 1 \right] \right] \quad \text{mit } \psi_E = \sqrt{\frac{\Delta h}{4R_W}} - \frac{1}{\mu} \frac{\Delta h}{4R_W} \quad (2.40)$$

und enthält mit  $R_W$ ,  $h_A$ ,  $\Delta h$  und  $\mu$  Kenngrößen der Walzspaltgeometrie, Formänderung und Reibung. Damit sind nach Overhagen (2018) nahezu alle wichtigen Einflüsse auf die Voreilung berücksichtigt, lediglich die Längsspannungen (Bandzüge) fehlen.

## 2.3 Verbreitete Ansätze zur Modellierung des Walzens

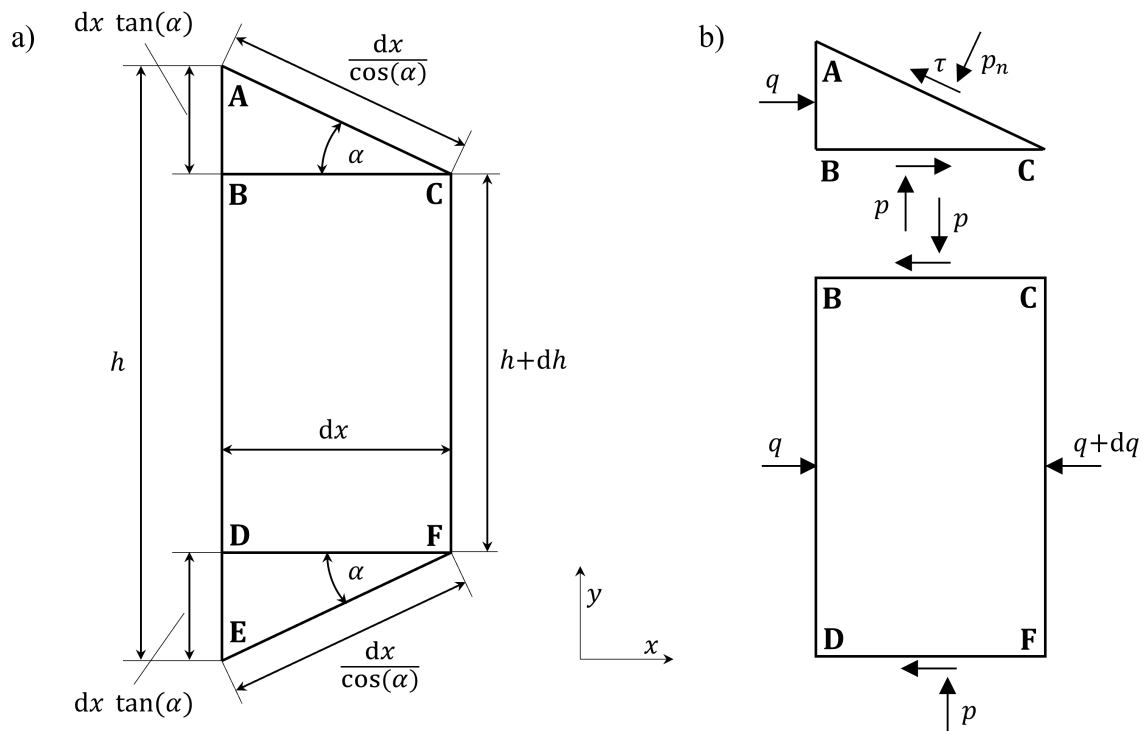
Im folgenden Kapitel wird eine Auswahl an Ansätzen zur Modellierung des Kaltwalzens vorgestellt. Der Autor konzentriert sich dabei vor allem auf Modelle, die einen Bezug zur untersuchten Anlage oder dem zu behandelten Prozessmodell haben. Darüber hinaus existieren auch weitere Theorien und Modelle, die hier allerdings nicht behandelt werden. Das erste behandelte Modell ist das Streifenmodell, welches heute als Teil der elementaren Walztheorie gilt. Es folgt die Modellierung der Walzenabplattung nach Hitchcock sowie das Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis, welches die Hitchcock-Abplattung nutzt und die Basis für die Stichplanberechnung an der untersuchten Anlage ist. Zuletzt wird der FE-Ansatz von Fleck und Johnson behandelt, auf dem das Prozessmodell von Mathweis Engineering und allpcloud teilweise basiert.

### 2.3.1 Streifenmodell

Das grundlegendste Modell zur Beschreibung der Vorgänge im Walzspalt ist das Streifenmodell. Es wurde in den 1920er Jahren unabhängig voneinander nahezu gleichzeitig von Siebel (1924) und v. Krmn (1925) veröffentlicht. Die zentrale Annahme des Streifenmodells ist nach Pawelski und Pawelski (2000) die ebene Formänderung, wobei die Breite des Werkstücks (hier das Walzgut) als konstant angenommen wird. Weiterhin wird angenommen, dass ein streifenförmiges Materialelement seine Streifenform während der Umformung beibehält. Ein Bandquerschnitt kann sich also nur als Ganzes durch den Walzspalt bewegen, wobei er durch die Walzspaltgeometrie stetig verkleinert wird. Aufgrund dieser parallelepipedischen Verformung wächst die Elementlänge nach Hoff und Dahl (1955) hingegen während des Walzvorgangs an. Werden die Streifen hinreichend

schmal gewählt, kann die Krümmung der Walze vernachlässigt werden und die Elemente als Trapez angesehen werden, was die Annahme einer konstanten Fließspannung für jedes Streifenelement zulässt (Lippmann und Mahrenholtz, 1967). Trotz der Vereinfachungen und Annahmen hat sich das Streifenmodell für das Kaltwalzen bewährt und ist Teil der elementaren Walztheorie (Weber, 1974).

Im Folgenden wird die v. Kármánsche Differentialgleichung, die die Grundlage für die Bestimmung der Druckverläufe im Walzspalt bildet, auf Basis eines Streifenelements hergeleitet. Das zugrundeliegende Streifenelement AEFC ist in Abbildung 2.8 dargestellt.



**Abbildung 2.8:** a) Geometrie des Streifens, b) statisches Gleichgewicht unter Berücksichtigung der Walzspaltsymmetrie nach Pawelski und Pawelski (2000, S. 27)

Aufgrund der Walzspaltgeometrie ist das Dreieck ABC deckungsgleich mit dem Dreieck DEF, auch die Einwirkung der äußeren Kräfte wird als symmetrisch angenommen. Daher gilt das statische Gleichgewicht des Dreiecks ABC analog für das Dreieck DEF. Für den gesamten Streifen AEFC wird zunächst die Kräftebilanz in  $x$ -Richtung gebildet. Das in Abbildung 2.8 b) nicht dargestellte Dreieck DEF wird berücksichtigt, indem alle am Dreieck ABC wirkenden Kräfte mit dem Faktor 2 eingehen. Die Bilanz lautet

$$qh = [q + dq][h + dh] + 2p_n \sin(\alpha) \frac{dx}{\cos(\alpha)} + 2\tau \cos(\alpha) \frac{dx}{\cos(\alpha)}. \quad (2.41)$$

Dabei bezeichnet  $p_n$  den durch die Walze eingebrachten Normaldruck und  $\tau$  die an der Kontaktfläche zwischen Band und Walze auftretenden Schubspannungen. In Walzrichtung

wirkt der Längsdruck  $q$  und orthogonal dazu der Querdruck  $p$ . Gleichung (2.41) kann unter der Annahme  $dqdh \approx 0$  zu

$$h \frac{dq}{dx} + q \frac{dh}{dx} + 2p_n \tan(\alpha) + 2\tau = 0 \quad (2.42)$$

umgestellt werden. Die Kräftebilanz in  $y$ -Richtung des Dreiecks ABC lautet

$$p dx = [p_n \cos(\alpha) - \tau \sin(\alpha)] \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (2.43)$$

und lässt sich zu

$$p_n = p + \tau \tan(\alpha) \quad (2.44)$$

umstellen. Aus Abbildung 2.8 a) folgt außerdem

$$\frac{dh}{dx} = -2 \tan(\alpha). \quad (2.45)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2.44) und (2.45) in Gleichung (2.42) ergibt sich

$$h \frac{dq}{dx} - 2q \tan(\alpha) + 2p \tan(\alpha) + 2\tau[1 + \tan^2(\alpha)] = 0. \quad (2.46)$$

Mit  $p$  und  $q$  enthält die Gleichung nun ein Hauptspannungssystem. Beim Walzen ist der Querdruck  $p$  aufgrund der Stauchung größer als der Längsdruck  $q$ , sodass nach Hinkfoth (2003) unter Berücksichtigung der Notation aus Gleichung (2.1)  $p = -\sigma_3$  und  $q = -\sigma_1$  gilt. Damit lässt sich die Fließbedingung aus Gleichung (2.10) zu

$$p - q = k_e \quad (2.47)$$

umformulieren, Einsetzen in Gleichung (2.46) liefert die Differentialgleichung erster Ordnung

$$h \frac{dq}{dx} + 2k_e \tan(\alpha) + 2\tau[1 + \tan^2(\alpha)] = 0. \quad (2.48)$$

Zur Vereinfachung der Differentialgleichung kann im nächsten Schritt die Schubspannung  $\tau$  eliminiert werden. Dazu eignet sich beispielsweise das Coulombsche Reibgesetz, nach dem die Schubspannung das Produkt aus Reibbeiwert und Normaldruck ist (Pawelski und Pawelski, 2000). Es ist allerdings zu beachten, dass die Richtung der in Abbildung 2.8 b) eingezeichneten Schubspannung nur im Bereich der Nacheilzone korrekt ist. In der Voreilzone zeigt die Schubspannung in die entgegengesetzte Richtung. Um beide Fälle

abzudecken, wird die Schubspannung als

$$\tau = \pm \mu p_n \quad (2.49)$$

definiert. Die obere Gleichung gilt für die Voreilzone, die untere für die Nacheilzone. Wird weiterhin Gleichung (2.44) in Gleichung (2.49) eingesetzt, so ergibt sich für die Schubspannung

$$\tau = \frac{\pm \mu p}{1 \mp \mu \tan(\alpha)}. \quad (2.50)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.50) sowie erneutes Einsetzen der Fließbedingung (2.47) in Gleichung (2.48) ergibt sich schlussendlich die lineare Differentialgleichung erster Ordnung für  $q$ :

$$h \frac{dq}{dx} + 2k_e \tan(\alpha) \pm \frac{2\mu[q + k_e][1 + \tan^2(\alpha)]}{1 \mp \mu \tan(\alpha)} = 0. \quad (2.51)$$

Gleichung (2.51) enthält durch die doppelten Vorzeichen genau genommen zwei Differentialgleichungen, je eine für die Vor- und Nacheilzone. Zur Auswertung der Differentialgleichungen können die Randbedingungen

$$q(x_E) = q(\alpha_E) = q_E = \sigma_R = \frac{T_R}{bh_E} \quad (2.52)$$

$$q(x_A) = q(\alpha_A) = q_A = \sigma_V = \frac{T_V}{bh_A} \quad (2.53)$$

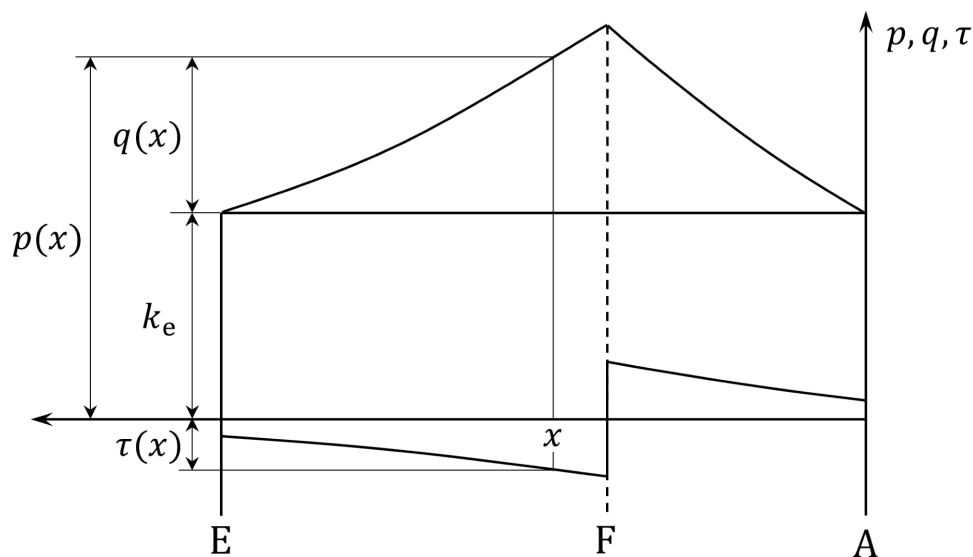
genutzt werden, wobei  $\sigma_R$  und  $\sigma_V$  den auf die Bandquerschnittsfläche bezogenen spezifischen Rück- und Vorzug am Ein- bzw. Auslauf des Walzspalts repräsentieren. Beim Walzen ohne Bandzug gilt  $q_E = q_A = 0$ . Die obere Hälfte von Gleichung (2.51) wird nun mithilfe der Randbedingung (2.53) vom Walzspaltauslauf bis zum Einlauf ausgewertet, die untere analog mithilfe der Randbedingung (2.52) vom Einlauf bis zum Auslauf. Im Schnittpunkt der beiden Verläufe, der Fließscheide, tritt der maximale Druck auf. Mithilfe von Gleichung (2.47) kann dann aus dem Längsdruck  $q$  der Querdruck  $p$  berechnet werden, im nächsten Schritt lässt sich der zugehörige Schubspannungsverlauf  $\tau$  aus Gleichung (2.50) ermitteln. Die Verläufe sind in Abbildung 2.9 qualitativ dargestellt. Durch Integration von  $p$  und  $\tau$  über den Walzspalt lassen sich schließlich die erforderliche Walzkraft  $F_W$  und das erforderliche Walzmoment  $M_W$  berechnen. Die Gleichungen lauten

$$F_W = bR_W \int_0^{\alpha_0} p(\alpha) d\alpha \quad (2.54)$$

für die Walzkraft und

$$M_W = -bR_W^2 \int_0^{\alpha_0} \tau(\alpha) d\alpha \quad (2.55)$$

für das Drehmoment je Walze (Weber, 1974). Durch die Multiplikation des Walzmoments  $M_W$  mit der Walzenwinkelgeschwindigkeit  $\omega_W$  ergibt sich die benötigte Leistung pro Walze (Kopp und Wiegels, 1999). In Kämper (2020, S. 31-35) wird anhand von Beispielrechnungen mit dem Streifenmodell der Einfluss verschiedener Parameter auf die Druckverläufe gezeigt.



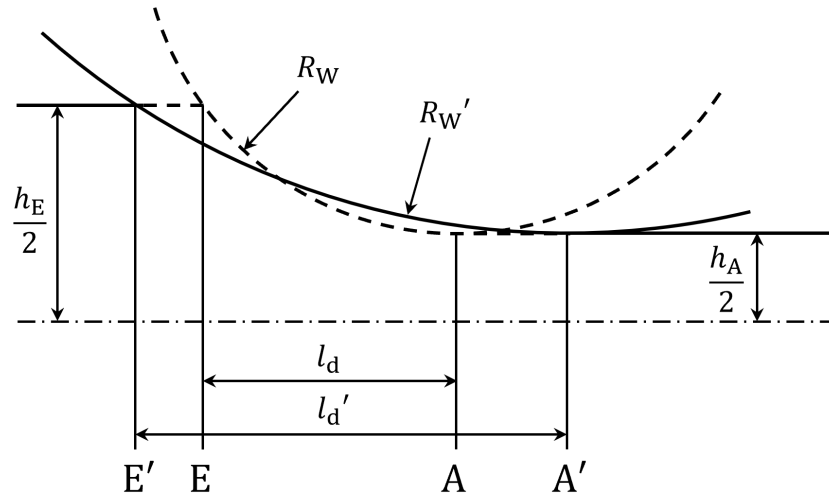
**Abbildung 2.9:** Qualitative Verläufe von  $p$ ,  $q$  und  $\tau$  nach dem Streifenmodell beim Walzen ohne Bandzug und unter Annahme konstanter Fließspannung  $k_e$  (angelehnt an Weber (1974, S. 40))

### 2.3.2 Walzenabplattung nach Hitchcock

In der zuvor behandelten Streifentheorie wird eine Verformung der Walzen nicht berücksichtigt, sie werden wie Starrkörper behandelt. Infolge der hohen Walzkraft werden allerdings die Walzen elastisch verformt, es kommt zur Walzenabplattung im Bereich des Walzspaltes. Ein in der Praxis häufig genutzter, weil simpler Ansatz zur Modellierung dieser Verformung ist die Walzenabplattung nach Hitchcock (1935). Hier wird angenommen, dass die Walze bei der Abplattung im Walzspalt ihre zylindrische Form beibehält und sich ein abgeplatteter Radius  $R_W' > R_W$  einstellt. Durch die Walzenabplattung verändert sich auch die gedrückte Länge, es gilt  $l_d' > l_d$  (vgl. Abbildung 2.10). Die Formel zur Berechnung des abgeplatteten Radius lautet

$$R_W' = R_W \left[ 1 + \frac{CF_W}{b\Delta h} \right] \quad \text{mit} \quad C = \frac{16}{\pi} \frac{1 - \nu^2}{E}. \quad (2.56)$$

Dabei bezeichnet  $F_W$  die Walzkraft,  $E$  den Elastizitätsmodul und  $\nu$  die Querkontraktionszahl der Walze. Für Stahlwalzen kann  $C = 22 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}^2}{\text{N}}$  angenommen werden (Pawelski, 2017).



**Abbildung 2.10:** Walzenabplattung nach Hitchcock (angelehnt an Kopp und Wiegels (1999, S. 172))

Ein großer Vorteil der Theorie nach Hitchcock ist die einfache Möglichkeit, sie in die allgemeine Walztheorie zu integrieren. Eine Änderung der Formeln ist nicht notwendig, der Nennradius der Walze  $R_W$  muss lediglich an entsprechender Stelle durch den abgeplatteten Radius  $R_W'$  ersetzt werden. Da die Hitchcock-Formel für viele Walzfälle die Walzenabplattung hinreichend genau abbildet und zudem einfach in bestehende Modelle zu integrieren ist, wird sie in der Praxis häufig verwendet. Auch das weit verbreitete Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis (vgl. Kapitel 2.3.3) nutzt die Walzenabplattung nach Hitchcock.

Beim Walzen von hochfesten und dünnen Bändern, bei denen die Walzenabplattung besonders stark auftritt, nimmt die Vorhersagegenauigkeit der Hitchcock-Formel allerdings deutlich ab. Laut Buchholz (1976) ist die Vorhersage der Walzenabplattung nach Hitchcock für Radienverhältnisse  $R_W'/R_W < 4$  hinreichend genau, Kopp und Wiegels (1999) legen sogar nahe, bei berechneten Radienverhältnissen  $R_W'/R_W > 2$  genauere Berechnungsverfahren anzuwenden. Weiterhin zeigt Pawelski (2017), dass bei dünnen Bändern die Walztheorie unter Berücksichtigung der Hitchcock-Formel mit Erhöhung der Fließspannung  $k_f$  divergiert.

### 2.3.3 Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis

Das Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis (Ford et al., 1951) ist ein weit verbreitetes Modell zur Berechnung von Walzkraft und Walzmoment. Es baut auf der Streifentheorie sowie den hier nicht näher erläuterten theoretischen Grundlagen nach Orowan (1943) auf und berücksichtigt zusätzlich die Walzenabplattung nach Hitchcock (Weber, 1974). Die allgemeine Walztheorie nach Orowan ist so komplex, dass sie zum Zeitpunkt ihrer Entstehung aufgrund begrenzter Rechenleistung für praktische Rechnungen nicht genutzt werden konnte (Overhagen, 2018). Bland und Ford (1948) treffen allerdings Vereinfachungen für diese Theorie, sodass die Walzkraft „ziemlich treffsicher und relativ zeitsparend berechnet werden können“ (Weber, 1974, S. 54). Die Gleichung zur Berechnung der Walzkraft  $F_W$  nach Bland, Ford und Ellis lautet

$$F_W = k_{e,m} b \sqrt{R_W' \Delta h} \left[ 1 - \frac{\sigma_R}{k_{e,m}} \right] \cdot f_3(a, B, \varepsilon), \quad (2.57)$$

für das Walzmoment  $M_W$  (Summenmoment beider Walzen) gilt

$$M_W = 2b \left[ k_{e,m} R_W \Delta h \left[ 1 - \frac{\sigma_R}{k_{e,m}} \right] \cdot f_5(a, B, \varepsilon) + \frac{R_W}{2} [\sigma_R h_E - \sigma_V h_A] \right] \quad (2.58)$$

(Bähr und Falkenhagen, 1970). Dabei stellt  $k_{e,m}$  die über den Walzspalt gemittelte Fließspannung für den ebenen Formänderungszustand dar,  $\sigma_R$  und  $\sigma_V$  entsprechen dem auf den Eintritts- bzw. Austrittsquerschnitt bezogenen spezifischen Rück- bzw. Vorzug. Zur Berechnung von Walzkraft und Walzmoment werden außerdem die Hilfsfunktionen  $f_3$  und  $f_5$  genutzt, deren Funktionswerte von der im Walzspalt vorgenommenen Reduktion  $\varepsilon$  sowie den Parametern  $a$  und  $B$  abhängen. Die Größe  $a$  ist als

$$a = \mu \sqrt{\frac{R_W'}{h_A}} \quad (2.59)$$

definiert und beinhaltet somit den Einfluss der Walzspaltgeometrie und der Reibung. Der Quotient

$$B = \frac{1 - \frac{\sigma_V}{k_{e,m}}}{1 - \frac{\sigma_R}{k_{e,m}}} \quad (2.60)$$

setzt die Zugspannungen am Ein- und Auslauf des Walzspalts ins Verhältnis. Auf die Berechnungsformeln für  $f_3$  und  $f_5$  wird hier nicht näher eingegangen, die Hilfsfunktionen wurden aufgrund der in den 1950er Jahren im Vergleich zu heute stark begrenzten Rechenkapazität vorgelöst und für praktische Berechnungen in Tabellen zur Verfügung gestellt (Overhagen, 2018). Zahlenwerte für  $f_3$  und  $f_5$  in Abhängigkeit von  $a$ ,  $B$  und  $\varepsilon$  können beispielsweise den Abbildungen und Tabellen in (Bähr und Falkenhagen, 1970, S.



253 - 257) entnommen werden.

Bei genauer Betrachtung von Gleichung (2.57) fällt auf, dass zur Berechnung der Walzkraft der abgeplattete Walzenradius nach Hitchcock  $R_W'$  benötigt wird. Dieser wird allerdings nach Gleichung (2.56) wiederum mithilfe der Walzkraft  $F_W$  ermittelt. Die Größen  $F_W$  und  $R_W'$  bedingen sich also gegenseitig, sodass sie im Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis iterativ berechnet werden müssen. Das Vorgehen dazu wird im Folgenden nach Bähr und Falkenhagen (1970) erläutert. Zunächst wird ein erster Näherungswert für die Walzkraft  $F_W$  mithilfe des nicht abgeplatteten Radius  $R_W$  berechnet, es wird also in Gleichung (2.57)  $R_W' = R_W$  angenommen. Mit dem erhaltenen Wert für  $F_W$  wird nach Gleichung (2.56) der abgeplattete Radius  $R_W'$  ermittelt, welcher wiederum zur Berechnung eines neuen Näherungswerts für die Walzkraft nach Gleichung (2.57) genutzt wird. Dieses Vorgehen wird so lange iterativ durchgeführt, bis der berechnete Wert für die Walzkraft konvergiert, also die Änderung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten einen vorher festgelegten Grenzwert unterschreitet. Anschließend kann das Walzmoment  $M_W$  gemäß Gleichung (2.58) berechnet werden (Bähr und Falkenhagen, 1970). Ein beispielhaftes Rechenschema ist in (Bähr und Falkenhagen, 1970, S. 258) dargestellt.

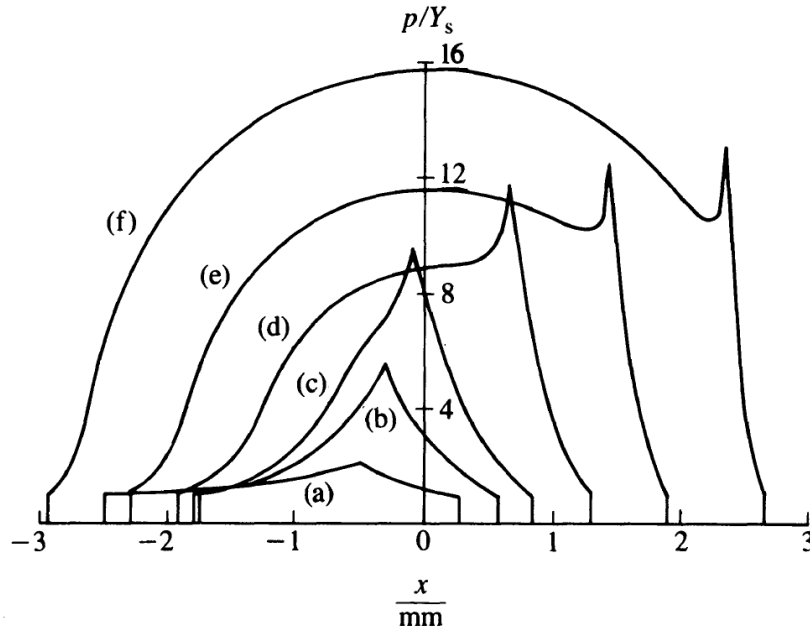
Aufgrund der schnellen und relativ genauen Walzspaltberechnung ist die Theorie nach Bland, Ford und Ellis bis heute an vielen Walzanlagen die Grundlage für die Stichplanberechnung, ein Beispiel ist das in Feldmann et al. (2009) behandelte Walzspaltmodell. Da sie unter anderem auf der Walzenabplattung nach Hitchcock basiert, ist die Vorhersagegenauigkeit der Theorie für dünne Bänder allerdings beschränkt.

### 2.3.4 Walzmodell nach Fleck und Johnson

Ein Modell für das Folienwalzen wurde in den 1980er Jahren von Fleck und Johnson entwickelt. In (Fleck und Johnson, 1987) beschreiben die Autoren ihre Motivation darin, dass zum damaligen Zeitpunkt trotz der großen Bedeutung von kaltgewalzten Folien für die Verpackungs- und Elektronikindustrie keine zufriedenstellende Walztheorie für das Folienwalzen bekannt war. Die Theorie wird von den Autoren in dem Sinne als neu vorgestellt, dass sie versucht, die Walzenabplattung sowie die Reibungsbedingungen im Walzspalt exakt zu modellieren. Der Einfluss der wirkenden Kräfte auf die Walzspaltgeometrie wird dabei mithilfe der Finite Elemente Methode (FEM) ermittelt.

Der wesentliche Unterschied zu den zuvor vorgestellten Walzmodellen besteht in der Annahme, dass für geringe Banddicken das Walzgut nicht durchgängig plastisch verformt wird und die elastische Deformation der Walze für dünne Bänder nicht als kreisbogenförmig angenommen werden kann. Im Gegenteil modellieren Fleck und Johnson den Walzspalt mithilfe von mehreren Zonen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Die Bandreduktion geschieht in zwei Zonen in der Nähe des Walzspaltein- und -auslaufs, dazwischen durchläuft das Band eine Transportzone ohne Dickenänderung (vgl. Zonen mit konstanter Banddicke  $b_1$  in Abbildung 2.11). In dieser Transportzone ist der Walzdruck zu gering,





**Abbildung 2.12:** Verläufe des Walzdrucks  $p$  bezogen auf die Fließgrenze  $Y_s = 230$  MPa über die Walzspaltlänge gemäß der Theorie nach Fleck und Johnson. Die Druckverläufe sind den Dickenverläufen (a) bis (f) aus Abbildung 2.11 zuzuordnen. Aus Fleck et al. (1992).

## 2.4 Datenverarbeitung im Umfeld des Kaltwalzens

Die Bedeutung von Daten nimmt im Zuge der Digitalisierung stetig zu, was sich in der jährlich wachsenden Menge an erzeugten Daten zeigt. Im Jahr 2000 wurde unter der Leitung von P. Lyman und H. R. Varian ein Projekt zur Untersuchung der im Vorjahr weltweit angefallene Datenmenge durchgeführt. Für das Jahr 1999 berechneten Lyman und Varian (2000) ein Gesamtvolumen von 1,5 Exabyte (EB), also 1,5 Milliarden Gigabyte (GB). Dies entspricht ungefähr einer Datenmenge von 250 Megabyte (MB) für jede zum damaligen Zeitpunkt auf der Erde lebende Person. Drei Jahre später wurde das Projekt wiederholt, im Jahr 2002 wurden nach Lyman und Varian (2003) bereits Daten in der Größenordnung von 5 EB erzeugt (ca. 800 MB pro Person), wovon 92% magnetisch (vor allem auf Festplatten) gespeichert wurden. Innerhalb von drei Jahren hat sich die weltweit jährlich erzeugte Datenmenge also ungefähr verdreifacht. Dieses Wachstum hat sich in den vergangenen Jahren exponentiell fortgesetzt. Im Jahr 2018 wurden laut Statista (2018) Daten mit einem Gesamtvolumen von ca. 33 Zettabyte (ZB), also 33.000 EB, erzeugt, für das Jahr 2025 wird ein weltweites Datenaufkommen von 175 ZB prognostiziert. In den vergangenen Jahren hat auch der wirtschaftliche Nutzen der in immer größeren Mengen vorkommenden Daten zugenommen, sie werden nach Heistermann et al. (2017) häufig als ‚neues Gold‘ bezeichnet. Es existieren komplette Wirtschaftszweige, deren Betätigungsfeld nahezu ausschließlich die Arbeit mit Daten ist. Ein Beispiel ist die Informationslogistik, deren Hauptaufgabe nach Bucher und Dinter (2008) die Versorgung aller erforderlichen

Akteure in einer oder mehreren Organisationen mit den relevanten Daten zur richtigen Zeit ist.

In Produktionsprozessen wie dem Kaltwalzen können Daten sowohl zur Prozesssteuerung und -regelung als auch zur Prozessüberwachung genutzt werden (Pittner und Simaan, 2011). Produktionsanlagen werden mit kommunizierender Messtechnik ausgestattet und in die digitale Infrastruktur des Unternehmens eingebunden, sodass der Zustand der Anlage jederzeit eingesehen werden kann. Das Ziel ist es, ein vollständiges digitales Abbild der realen Anlage zu erstellen, einen sogenannten digitalen Zwilling (Eigner, 2020). Dieser gibt den Anlagenzustand möglichst detailliert wieder und kann darüber hinaus auch zur Steuerung der physischen Anlage genutzt werden. Neben der direkten Nutzung zur Steuerung und Überwachung des Prozesses können die an der Anlage aufgenommenen Daten auch zur Optimierung von Vorhersagemodellen genutzt werden. Kaltwalzprozesse werden mithilfe von Stichplanmodellen ausgelegt, die unter anderem den Kraft- und Arbeitsbedarf vorhersagen. Im Folgenden wird die Nutzung von Prozessdaten zur Optimierung der Stichplanmodelle anhand von Feldmann et al. (2009) erläutert. Nach der Durchführung jedes Sticks werden im Prozess aufgenommene Messwerte mit den Vorhersagewerten verglichen. Die Abweichung zwischen vorhergesagten und gemessenen Werten wird schließlich zur Berechnung von Adaptionparametern genutzt. Mithilfe der Parameter soll die Berechnung so verändert werden, dass die vorausgerechneten Prozessgrößen für die nachfolgenden Bunde möglichst der Realität entsprechen. Es folgt ein erneuter Soll-Ist-Vergleich, auf dessen Basis neue Adaptionparameter berechnet werden. Die Adaptionprozedur wird also während der Produktion ständig fortgeführt, wobei die Güte der gewählten Adaptionparameter automatisch anhand nachfolgender Coils bewertet und zur Berechnung neuer Parameter genutzt wird, sodass die Vorhersagequalität des Stichplanmodells stetig verbessert wird (Feldmann et al., 2009).

Darüber hinaus können an der Anlage aufgenommene Messdaten für die spätere Verwendung gespeichert werden. Dazu müssen die gemessenen Prozessgrößen in analoge oder digitale Signale umgewandelt und von einem Datenerfassungssystem verarbeitet werden. Eine Möglichkeit zur Verarbeitung von analogen und digitalen Signalen ist die Nutzung des von der iba AG vertriebenen iba-Systems (Heidari et al., 2014). Das zentrale Element dieses im Umfeld des Kaltwalzens weit verbreiteten Systems ist *ibaPDA*, eine Software zur Aufzeichnung von Sensorsignalen (Burnett, 2012). Bei großen und hoch automatisierten Anlagen können mehr als 1000 Signale parallel aufgezeichnet werden, die üblicherweise mit einer Frequenz zwischen 1 und 1000 Messpunkten pro Sekunde aufgenommen werden (Kämper, 2020). Der zeitliche Verlauf der Signale wird dabei in Messdateien mit dem systemeigenen Format “.dat” gespeichert (Burnett, 2012), wobei aufgrund der Vielzahl der Signale und der hohen zeitlichen Auflösung von bis zu 1 ms an einer Tandemstraße täglich Messdaten mit einem Gesamtvolumen von über 100 GB auftreten können (Kämper, 2020). Die erzeugten Messdateien können anschließend mithilfe der Software *ibaAnalyzer* analy-

siert werden, beispielsweise im Zuge einer Untersuchung der Bandplanheit (Pengfei et al., 2016). Im Zuge einer solchen Analyse können die Messsignale der .dat-Dateien ausgewertet, verknüpft oder manipuliert werden, es können allerdings auch komplett neue Signale erstellt werden. Der Aufbau der Analyse mit allen Signalen und Verknüpfungen kann anschließend als iba-Analysedatei (.pdo) gespeichert werden, sodass bei Bedarf die erneute Verwendung zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist.

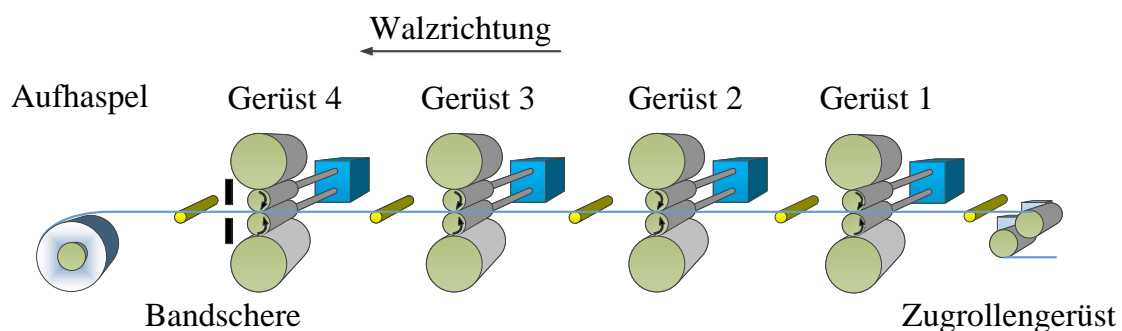
Durch die fortschreitende Digitalisierung und insbesondere im Zuge von Entwicklungen wie dem Internet of Things (IoT) rücken darüber hinaus Anwendungen wie Predictive Maintenance in den Fokus (Wortmann und Flüchter, 2015). Das Ziel von Predictive Maintenance ist es, mithilfe der Überwachung von Prozessdaten verschiedenster Art potenzielle Ausfälle vorherzusehen und vorbeugend Gegenmaßnahmen zu ergreifen (Spendla et al., 2017). Dazu wird im einfachsten Fall der aktuelle Zustand des Prozesses betrachtet, es besteht allerdings auch die Möglichkeit nach Mustern in bestehenden Datensätzen zu suchen. Aus diesen können dann Erkenntnisse in Bezug auf Wartungsintervalle oder das Austauschen von Anlagenkomponenten gewonnen werden, sodass beispielsweise durch einen Werkzeugwechsel bereits präventiv auf eine erwartete Häufung von fehlerhaften Produkten reagiert werden kann (Spendla et al., 2017). Für die Erkennung derartiger Muster an Kaltwalzanlagen könnten sich insbesondere die Messdateien des iba-Systems eignen, da sie das Prozessverhalten sehr detailliert und zeitlich hoch aufgelöst abbilden.

### 3 Untersuchte Tandemstraße und verwendete Modelle

Im folgenden Kapitel wird auf die Tandemstraße als Anlage sowie auf die verwendeten Prozessmodelle eingegangen. Dabei wird zunächst der Aufbau und die Funktionsweise der Tandemstraße beschrieben und von anderen Anlagentypen abgegrenzt. Weiterhin werden die aktuell genutzten Strategien zur Modellierung, Steuerung und Regelung des Walzprozesses an der untersuchten Tandemstraße behandelt. Abschließend folgt die Vorstellung des in dieser Arbeit untersuchten Prozessmodells sowie eine kurze Beschreibung der in das Modell zu integrierenden Adaptionlogik.

#### 3.1 Aufbau und Betriebsweise der untersuchten Anlage

Die in dieser Arbeit untersuchte Walzanlage ist eine viergerüstige Tandemstraße in Quarto-Anordnung, die mit der vorgelagerten Beize gekoppelt ist. Die resultierende Beiz-Walz-Linie wird halbkontinuierlich betrieben, sodass ein jährlicher Durchsatz von etwa 1,2 Millionen Tonnen erreicht werden kann. Die Bezeichnung halbkontinuierlich meint, dass die Bunde vor der Beize zwar im laufenden Betrieb zu einem Endlosband verschweißt werden, die Tandemstraße zum Trennen der einzelnen Bunde nach dem letzten Gerüst allerdings angehalten werden muss. Der Aufbau der Tandemstraße ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt, wobei das Zugrollengerüst die Anbindung an die nicht gezeigte Beize abbildet. Der Aufbau und die Betriebsweise der Beiz-Walz-Linie werden in den folgenden Abschnitten beschrieben, zur Veranschaulichung sind in Anhang A einige Aufnahmen der Anlage in der Reihenfolge der Teilprozesse angefügt.



**Abbildung 3.1:** Schematischer Aufbau der untersuchten Tandemstraße (angelehnt an Kämper (2020, S. 9))

Vor der Beize befindet sich ein Abhaspel mit nachgelagerter Schweißeinheit, wo die warmgewalzten Coils abgewickelt und im laufenden Betrieb zu einem Endlosband verschweißt werden. Dies wird durch einen Bandspeicher zwischen Schweißeinheit und Beizbehand-

lung ermöglicht. Während des Abwickelns des Bandes wird dieser Speicher kontinuierlich gefüllt, indem die Abwickelgeschwindigkeit höher eingestellt wird als die Bandgeschwindigkeit im Beizbad. Wenn ein Coil komplett abgewickelt ist, wird das Bandende in der Schweißeinheit angehalten. Ein neues Coil wird am Abhaspel vor der Schweißeinheit aufgesetzt und der Bandanfang wird mit dem Ende des Vorgängercoils verschweißt. Während dieser Stillstandszeit an der Schweißeinheit können die nachfolgenden Prozesse allerdings trotzdem fortgeführt werden, da nun der Bandspeicher zwischen Schweißeinheit und Beizlinie geleert wird. Dieser kontinuierliche Betrieb ist nicht nur für die Tandemstraße, sondern auch für die Beize von großer Bedeutung. Ohne den Bandspeicher würden während des Aufsetzens und Anschweißens eines neuen Coils einzelne Bandabschnitte im Salzsäurebad zum Stehen kommen. In einem solchen Fall greift die Säure schon nach kurzer Zeit zusätzlich zum Zunder auch das darunterliegende Grundmaterial an, was Oberflächenfehler und sogar Banddickenfehler verursacht und zur Unbrauchbarkeit des entsprechenden Bandabschnittes führen kann.

Nach der Beize wird das Band kontinuierlich zur Tandemstraße geleitet, wo es schließlich gewalzt wird. Nachdem das Band die Tandemstraße durchlaufen hat, wird es am Aufhaspel wieder aufgewickelt. Die zusammengeschweißten Bunde werden durch eine Schere hinter dem letzten Gerüst an der Schweißnaht wieder getrennt und in die ursprünglichen Coils unterteilt, hierzu muss die Tandemstraße kurzzeitig angehalten werden. Zur Überbrückung dieser Bundwechselzeiten befindet sich zwischen Beize und Tandemstraße ein weiterer Bandspeicher, der sogenannte Koppelspeicher. Dieser wird während des Walzprozesses geleert und beim Bundwechsel wieder durch die Beize gefüllt. Darüber hinaus ist die Kapazität des Koppelspeichers auch ausreichend, um bei entsprechend reduzierter Bandgeschwindigkeit in der Beize einen Arbeitswalzenwechsel am Tandem zu überbrücken. Das Abbremsen zum Schneiden des fertigen Bandes erfolgt stufenweise. Kurz bevor die Schweißnaht das erste Gerüst erreicht, wird die Bandgeschwindigkeit im letzten Gerüst auf ca. 60 m/min abgesenkt. Somit kann der Durchlauf der Schweißnaht durch das Tandem besser kontrolliert und das Risiko eines Schweißnahttrisses verringert werden. Für den Schnitt und den folgenden Coilwechsel wird das Tandem dann angehalten, anschließend wird das nächste Coil angewickelt und danach wieder auf die Betriebsgeschwindigkeit von bis zu 1200 m/min im letzten Gerüst beschleunigt.

Es ist zu beachten, dass sich die geometrischen Abmessungen sowie das Materialverhalten des Bandes an der Schweißnaht aufgrund eines Produktwechsels sprunghaft ändern können. Dies führt - zusammen mit der Beschaffenheit der Schweißnaht selbst - dazu, dass der Durchlauf der Schweißnaht durch ein Walzgerüst eine sprunghafte Änderung der Walzkraft in diesem Gerüst verursacht. Die Kenntnis des Zeitpunktes, an dem die Schweißnaht das Tandem erreicht, ist für die Prozessumschaltung im Moment des Schweißnahtdurchlaufs essenziell. Dieser Zeitpunkt wird mithilfe eines Lochsuchgeräts bestimmt, das sich vor dem ersten Walzgerüst befindet. Das Lochsuchgerät erkennt mithilfe einer Lichtschranke

ein an der Schweißmaschine eingebrachtes Loch im Band, welches einen genau definierten Abstand zur folgenden Schweißnaht hat. Mit den bekannten Abständen zwischen Loch und Schweißnaht sowie zwischen Lochsuchgerät und Walzspalteintritt lässt sich mithilfe der Bandgeschwindigkeit vor dem ersten Gerüst der Zeitpunkt des Schweißnahtdurchlaufs in Gerüst 1 genau vorhersagen. Die benötigte Ist-Geschwindigkeit vor Gerüst 1 wird durchgängig mittels Laser gemessen. Weiterhin muss der Wechsel der Abmessungen und Stahlgüten an der Schweißnaht bekannt sein, um die für die neue Situation passenden Walzparameter zu berechnen. Um eine möglichst genaue Vorsteuerung und Regelung des gesamten Walzprozesses sowie insbesondere der Umschaltvorgänge zu gewährleisten, ist eine Vielzahl von Messinstrumenten sowie die zugehörige Datenverarbeitung notwendig. Neben dem Schweißnahtdurchlauf betrifft dies vor allem die Dickenregelung des gesamten Bandes, welche wiederum weitere Regelungseingriffe nach sich zieht (vgl. Kapitel 3.3.3).

### 3.2 Datenverarbeitung an der Tandemstraße

Die untersuchte Anlage verfügt über eine Vielzahl von Sensoren, welche die gemessenen Prozessgrößen in digitale Signale umwandeln. Diese Signale werden teilweise direkt zur Steuerung und Regelung der Anlage genutzt, beispielsweise im Zuge der Banddickenregelung. Darüber hinaus werden die Signale aufgezeichnet und gespeichert, sodass sie auch nach Beendigung des Walzprozesses verfügbar sind und beispielsweise bei der Ermittlung der Ursachen von Walzproblemen genutzt werden können.

Zur Erfassung und Speicherung der Sensorsignale wird das in Kapitel 2.4 bereits eingeführte *iba*-System genutzt. Aufgrund der zeitsynchronen Aufzeichnung der Signale durch *ibaPDA* können die zeitlichen Verläufe verschiedener Messgrößen sowohl online bei der Steuerung der Anlage als auch im Nachgang im Zusammenhang betrachtet werden. Somit kann durch die parallele Betrachtung der verschiedenen Verläufe beispielsweise ein vor dem ersten Gerüst gemessener Dickenfehler (sprunghafte Änderung des Dickensignals) als Ursache für folgende sprunghafte Änderungen der Walzkräfte in den folgenden Walzgerüsten ausgemacht werden. Das System ist an der untersuchten Anlage so eingestellt, dass der Übergang zwischen zwei Dateien immer kurz vor dem Durchlauf der Schweißnaht, also einer Änderung des gewalzten Bundes, erfolgt. Somit kann jedem Bund eine Messdatei zugeordnet werden, was beispielsweise die Verfolgung von Fehlern vereinfacht. Bei Bedarf können mittels *ibaAnalyzer* allerdings auch mehrere Messdateien gleichzeitig geladen werden. Die Dateien werden dann automatisch aneinandergereiht, sodass die Verläufe von mehreren Bundens zusammenhängend analysiert werden können.

Neben der Datenerfassung und -bereitstellung durch das *iba*-System werden die gemessenen Daten zusätzlich textbasiert gespeichert. Dabei wird pro gewalztem Bund ein Datensatz gespeichert. Dieser enthält die wesentlichen Produktmerkmale wie Bundnummer, Material- und Geometrieinformation sowie eine Auswahl von Prozessdaten. Die Prozess-



daten sind dabei meist als Mittelwerte der vom iba-System aufgenommenen Signale für das jeweilige Bund gespeichert, um die Informationen möglichst kompakt zur Verfügung zu stellen. Die erzeugten Datensätze werden in einer Datenbank gespeichert und eignen sich durch die Informationsverdichtung gut zur Gewinnung eines ersten Überblicks. Treten in den textbasierten Daten unerwartete Werte auf, können im nächsten Schritt die Ursachen für diese Auffälligkeiten mithilfe der detaillierten .dat-Messdateien untersucht werden.

Als Datengrundlage für diese Arbeit wurde die Aufzeichnung der Kaltbandproduktion an der Tandemstraße bei ArcelorMittal Eisenhüttenstadt im Zeitraum von August bis Oktober 2021 zur Verfügung gestellt. Die Datenbasis umfasst sämtliche vom iba-System in diesem Zeitraum aufgenommenen Daten, außerdem wurde eine mit der unternehmensseitigen Betreuung zusammengestellte Auswahl von textbasierten Daten in Form von .csv-Dateien bereitgestellt. Die insgesamt zur Verfügung gestellte Datenmenge beträgt ca. 562 GB, dies entspricht durchschnittlich etwa 6.1 GB pro Tag.

### 3.3 Steuerung und Regelung des Walzprozesses

In diesem Abschnitt wird die Steuerung und Regelung des Walzprozesses in der untersuchten Tandemstraße behandelt. Zunächst werden die wichtigsten Messgrößen für die Steuerung und Regelung aufgeführt, darauf folgt die Vorstellung des zur Auslegung und Planung der Walzprozesse genutzten Stichplanmodells. Abschließend wird die Steuerung und Regelung der Anlage beispielhaft beschrieben.

#### 3.3.1 Relevante Messgrößen

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, wird an der untersuchten Tandemstraße eine Vielzahl von Messgrößen aufgenommen. Die in Bezug auf Steuerung und Regelung des Prozesses wichtigsten Parameter sind in diesem Abschnitt aufgeführt. Von den Parametern werden die folgenden in allen Gerüsten der Tandemstraße gemessen:

- die Walzkraft,
- das Motormoment (Berechnungsgrundlage für das Walzmoment),
- die Motordrehzahl (Berechnungsgrundlage für Walzendrehzahl, Walzenumfangsgeschwindigkeit),
- die Position (Anstellung) der Arbeitswalzen,
- die ein- und auslaufseitigen Bandzüge.

Diese Messgrößen werden größtenteils direkt am jeweiligen Walzgerüst bzw. in den Antrieben aufgenommen. Ausnahme sind die Bandzüge, welche über Bandzugmessrollen zwischen den Gerüsten sowie vor G1 und nach G4 aufgenommen werden. Darüber hinaus existieren weitere wichtige Messgrößen, die nicht an jedem Gerüst aufgenommen werden:

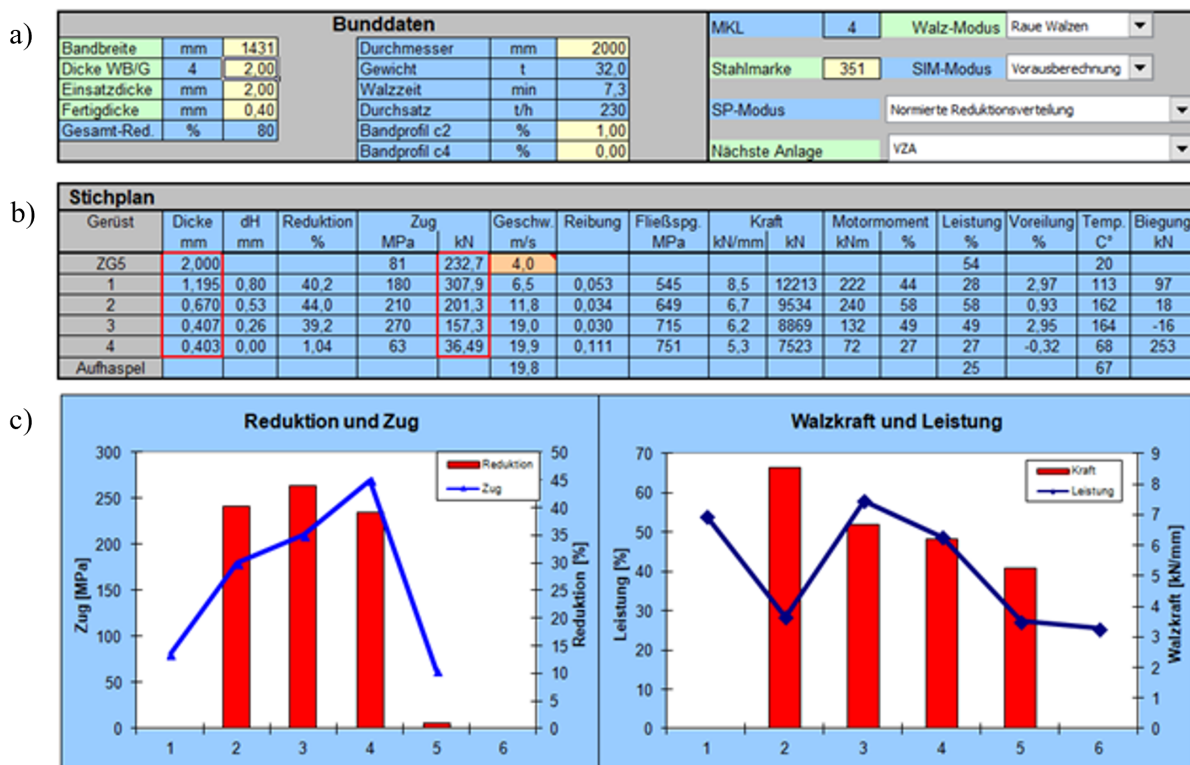
- die Bandgeschwindigkeit vor und nach G1 sowie nach G4,
- die Banddicke vor und nach G1 sowie nach G4,
- die Bandplanheit nach G4.

Die Bandgeschwindigkeit und -dicke werden über eine kombinierte Messeinrichtung aufgenommen, die Bandgeschwindigkeit wird dabei per Laser gemessen, die Banddicke durch Röntgenstrahlung. Die Bandplanheit wird mithilfe einer Planheitsmessrolle gemessen.

### 3.3.2 Stichplanberechnung

Stichpläne sind für die Durchführung von Walzprozessen essenziell. Der Stichplan enthält neben dem vorausgerechneten Kraft- und Arbeitsbedarf der einzelnen Stiche auch Sollwerte für beispielsweise die Reduktions- und Zugverteilung oder Gerüstgeschwindigkeiten, somit kann er zur Einstellung der Anlage für jedes Bund genutzt werden. In diesem Abschnitt wird die Stichplanberechnung an der untersuchten Tandemstraße anhand des an der Anlage genutzten Stichplanmodells vorgestellt, dessen Benutzeroberfläche in Abbildung 3.2 dargestellt ist. Das Modell benötigt zur Berechnung eines geeigneten Stichplans für jedes Bund die Bandgeometrie (Bandbreite, Warmbanddicke, gewünschte Fertigdicke) sowie Informationen über die Stahlmarke und deren Festigkeit. Die Stahlmarken werden jeweils durch eine dreistellige Schlüsselnummer repräsentiert. Außerdem ist die Angabe der Walzdaten (SW- und AW-Geometrie, SW- und AW-Laufleistung, AW-Rauigkeit) notwendig. Weiterhin können zusätzliche Informationen wie der Walz-Modus (glatte/raue Walzen) oder die nachfolgende Anlage angegeben werden (vgl. Abbildung 3.2 a)). Zur Berechnung werden darüber hinaus weitere Informationen benötigt, die allerdings im Modell bereits hinterlegt sind. Dazu zählen vor allem anlagenseitige Prozessgrenzen wie die maximale Walzkraft oder Leistung pro Gerüst oder die maximale Walzgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsbegrenzung ist zu 20 m/s für Gerüst 4 sowie 7 m/s für das Zugrollengerüst ZG5, welches die Verbindung des Tandems zur Beize darstellt, definiert.

Die Stichplanberechnung beginnt mit der Festlegung der Reduktionsverteilung. Dabei werden im ersten Schritt aus der vorgegebenen Gesamtreduktion die Einzelreduktionen je Gerüst mithilfe einer im Modell hinterlegten normierten Reduktionsverteilung ermittelt. Anschließend werden die für die einzelnen Dickenreduktionen notwendigen Walzkräfte berechnet. Die Berechnung der Walzkräfte geschieht auf Basis der Theorie nach Bland, Ford und Ellis (vgl. Kapitel 2.3.3) unter Verwendung von im Modell hinterlegten Reibwert- und Fließkurven. Um nicht für jede Stahlmarke eine eigene Fließkurve speichern zu müssen,



**Abbildung 3.2:** Benutzeroberfläche des an der Anlage verwendeten Stichplanmodells mit a) Eingabemöglichkeit für Bunddaten und weitere Optionen, b) berechnetem Stichplan und c) Visualisierung von Reduktionsverteilung, Zügen, Walzkraften und Leistungsaufnahme

sind Stahlmarken ähnlicher Festigkeit in Materialklassen (MKL) zusammengefasst. Mithilfe der Information der jeweiligen Reduktion (Umformgrad) und der Stahlmarke bzw. der zugehörigen Materialklasse kann so für jedes Gerüst die Materialverfestigung und damit die aktuelle Fließspannung bestimmt werden. In die Berechnung der Fließspannung gehen außerdem die Temperatur sowie die Umformgeschwindigkeit, die wiederum maßgeblich von der Bandgeschwindigkeit im jeweiligen Gerüst abhängt, ein. Zur Berechnung der Verteilung der Bandgeschwindigkeiten wird als Startwert immer die maximale Walzgeschwindigkeit von 20 m/s in G4 angenommen, um den größtmöglichen Durchsatz zu erreichen. Wenn dies aufgrund der Gesamtreduktion eine Geschwindigkeit von mehr als 7 m/s in ZG5 erfordert, werden die Geschwindigkeiten in den Gerüsten 1 - 4 entsprechend der Begrenzung in ZG5 neu berechnet. Ein weiterer Grund für eine Reduzierung der Sollgeschwindigkeiten ist eine vorausberechnete Überschreitung der maximal zulässigen Leistungsaufnahme der Gerüstantriebe. Neben der Fließkurve und der Reibwertkurve hat auch der Bandzug, der wiederum von der Fließspannung abhängig ist, einen wesentlichen Einfluss auf die berechnete Walzkraft. Es gilt die Faustregel, dass der spezifische Zug im Bandbereich zwischen zwei Gerüsten ungefähr 30-40% der jeweiligen aktuellen Fließspannung betragen soll.

Verletzt die auf Basis all dieser Beziehungen berechnete Walzkraft in einem oder mehreren

Gerüsten den Maximalwert, versucht das Modell dem durch eine Änderung der Reduktionsverteilung entgegenzuwirken. Mit der angepassten Reduktionsverteilung werden alle Berechnungen erneut durchgeführt. Dieser Vorgang wird so lange iterativ wiederholt, bis eine Lösung ohne Verletzung der gegebenen Grenzen gefunden wird. Neben der Walzkraft muss in jedem Gerüst außerdem das Walzmoment und die sich daraus (und aus der Walzgeschwindigkeit) ergebende Leistung auf das Überschreiten von Grenzwerten überprüft werden.

Sobald das Programm den unter allen zuvor genannten Gesichtspunkten optimalen Stichplan berechnet hat, wird dieser dem Anwender im mittleren Bereich der Benutzeroberfläche angezeigt (vgl. Abbildung 3.2 b)). Die Berechnung ist üblicherweise in wenigen Sekunden abgeschlossen.

Im unteren Teil des Interfaces (vgl. Abbildung 3.2 c)) werden die Reduktions- und Zugverteilung sowie die Walzkraft und Leistung in jedem Gerüst grafisch dargestellt, sodass der Anwender die Werte unkompliziert erfassen und auf Plausibilität überprüfen kann.

Zur Optimierung der Vorhersagequalität wird die Stichplanberechnung ständig adaptiert. Dies geschieht durch einen Abgleich der vorausberechneten Werte für Walzkraft und Drehmoment mit den tatsächlich an der Anlage aufgenommenen Messwerten. Auf Basis dieses Abgleichs werden vor allem die hinterlegten Fließkurven für nachfolgende Bunde desselben Materials angepasst. Die Adaption wird für jede Stahlmarke einzeln vorgenommen, sodass sich die effektiv vom Programm genutzten Fließkurven für verschiedene Stahlmarken einer Materialklasse trotz einheitlicher Basisfließkurve unterscheiden. Um eine Überkorrektur durch Messfehler oder einzelne Chargen mit abweichender Festigkeit zu verhindern, nutzt die Adaption außerdem Dämpfungsfaktoren sowie Grenzen für die maximale Änderung der Adaptionparameter pro Bund.

### 3.3.3 Steuerung und Regelung der Tandemstraße

Zur Einstellung des Walzprozesses wird dem Anlagenbediener der Stichplan mit allen Sollwerten zur Verfügung gestellt. Diese können vom Bediener im Vorfeld bei Bedarf angepasst werden, werden im Allgemeinen aber größtenteils übernommen. Weiterhin kann der Bediener auch während des Walzprozesses in die Steuerung eingreifen. Auf die Tatsache, dass sich der Koppelspeicher zwischen Beize und Tandem zu schnell leert, kann beispielsweise durch eine Absenkung der Walzgeschwindigkeit reagiert werden. Um eine hohe Produktqualität während des gesamten Walzprozesses und insbesondere im Zuge solcher Änderungen der Randbedingungen sicherzustellen, ist eine umfassende Regelungstechnik notwendig. Da diese Arbeit schwerpunktmäßig Modelle zur Stichplanberechnung behandelt, wird die Regelung des Walzprozesses im Folgenden nur beispielhaft erläutert. Eine Aufgabe der verschiedenen Regelungen ist das Erreichen der Zieldicke (Anmessmaß) mit hoher Dickenkonstanz über die Bandlänge und eine gute Bandplanheit unter Ein-

haltung der Toleranzen des Endproduktes. Weicht beispielsweise die Banddicke nach einer Änderung der Walzgeschwindigkeit vom Sollwert ab, reagiert die Regelung und beeinflusst die Banddicke mithilfe der Walzenanstellung. Ist die Banddicke zu klein, muss der Walzspalt geöffnet werden, bei zu großen Banddicken muss der Walzspalt weiter geschlossen werden. Das letzte Gerüst der Tandemstraße wird allerdings walzkraftgeregelt betrieben, um durch die Übertragung der Walzenrauheit auf das Band eine möglichst einheitliche Bandoberfläche herzustellen. Zur Regelung der Fertigungsdicke muss somit die Walzenanstellung in G3 angepasst werden. Aufgrund der Volumenkonstanz geht eine Anpassung in der Anstellung automatisch mit einer Änderung der Bandgeschwindigkeit im entsprechenden Gerüst einher, was wiederum die Bandzüge beeinflusst. Da die Bandzüge allerdings maßgeblich für die Bandführung und die Stabilität des gesamten Walzprozesses sind, hat nun die Regelung der Züge auf den Sollwert höchste Priorität. Daher werden die Bandgeschwindigkeiten und/oder Anstellungen in allen Gerüsten nun so geregelt, dass sich die Soll-Bandzugverteilung einstellt. Zusammenfassend hat die Regelungstechnik also die Aufgabe, unter Verwendung der an der Anlage aufgenommenen Messgrößen die Einhaltung der Toleranzen zu sichern sowie insbesondere durch das Reagieren auf Änderungen im Walzspalt einen stabilen Prozess zu gewährleisten.

### 3.4 Prozessmodell von Mathweis Engineering und allpcloud

Im folgenden Abschnitt wird das Prozessmodell von Mathweis Engineering und allpcloud vorgestellt. Das Modell berechnet den Stichplan für einen stationären Arbeitspunkt. Dazu werden folgende Eingangsgrößen benötigt:

- Geometrische Informationen der Walzgerüste
  - AW-Geometrie
  - SW-Geometrie
- Anlagentechnische Grenzen der Gerüste
  - Maximalwerte für Walzkraft, Walzmoment, Leistung
  - Kraftbereich der AW-Biegung
- Materialeigenschaften des Bandes
  - E-Modul und Querkontraktionszahl
  - Fließkurve
  - Dichte
  - spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Emissionsgrad

- Bandgeometrie
  - Einsatz- und Fertigdicke
  - Bandbreite
- Dickenverteilung bzw. Einzelstichabnahmen
- geschwindigkeitsabhängige Reibwertkurve für jedes Gerüst
- Bandzüge für jeden Stich
- Eingangsgeschwindigkeit, Umformgrad und Bandtemperatur vor dem ersten Stich.

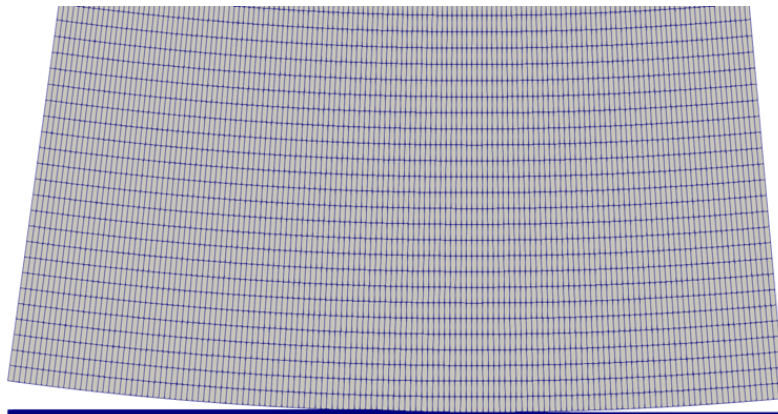
Darüber hinaus gibt es optionale Anlagenparameter beispielsweise zur Parametrierung von Band- und/oder Arbeitswalzenkühlung. Zu den einstellbaren numerischen Parametern zählen die Anzahl der berechneten Inkremente, die Größe der Residuen bei denen die Rechnung konvergiert sowie die Auflösung des Netzes für die FE-Berechnung, bestehend aus der Anzahl der Elemente in tangentialer und radialer Richtung. Zur Berechnung der Spannungs- und Druckverteilung im Walzspalt beinhaltet die Software drei Lösungsmethoden:

- Lösungsansatz nach Bland, Ford und Ellis
- CPU-basierte FE-Berechnung
- GPU-basierte FE-Berechnung

Die CPU bezeichnet den Hauptprozessor eines Computers, die GPU den Grafikprozessor. GPUs besitzen bis zu 100 mal mehr Rechenkerne als CPUs, sodass sie sich insbesondere für hochparallelisierte Berechnungen eignen (Rahmad et al., 2011). Zur Parallelisierung der FE-Berechnung und Ansteuerung der GPU wird die Programmierschnittstelle CUDA der NVIDIA Corporation genutzt. Diese ermöglicht die Programmierung der vom Unternehmen vertriebenen Grafikprozessoren zur parallelen Berechnung von Programmteilen ohne Kenntnisse der genauen Architektur der GPU (Micikevicius, 2009).

Der Ansatz nach Bland, Ford und Ellis hat, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, den Vorteil geringer Rechenzeiten. Die Theorie ist für dünne und hochfeste Bänder aufgrund verschiedener Vereinfachungen, insbesondere der kreisbogenförmigen Walzenabplattung nach Hitchcock (vgl. Kapitel 2.3.2) und der Vernachlässigung der Elastizität des Bandes, nur eingeschränkt gültig. Da eine Parallelisierung der Berechnung mit zusätzlichem Aufwand verbunden und aufgrund der ohnehin ausreichend hohen Rechengeschwindigkeit nicht notwendig ist, wird der Ansatz nach Bland, Ford und Ellis ausschließlich mithilfe der CPU berechnet.

Die FE-Ansätze hingegen simulieren das mechanische System eines kaltgewalzten Bandabschnitts im Walzspalt mit höherer Genauigkeit. Dabei wird insbesondere der nichtlineare Kontakt zwischen der elastischen Walze und dem transportierten, elastisch-plastischen Band berücksichtigt. Das mechanische System wird diskretisiert und mithilfe eines Netzes abgebildet, das aus einer endlichen (finiten) Anzahl von Elementen besteht. Aus Performance-Gründen werden bei der Modellierung verschiedene Vereinfachungen getroffen. Da nach Weber (1974) beim Kaltwalzen nahezu kein Werkstofffluss in Breitenrichtung auftritt und damit ein ebener Formänderungszustand angenommen werden kann, wird der Walzspalt durch ein zweidimensionales FE-Modell abgebildet. Weiterhin wird die Walzspaltsymmetrie ausgenutzt und lediglich der mit dem Band in Kontakt tretende Teil der Walze modelliert. Der diskretisierte Walzspalt ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

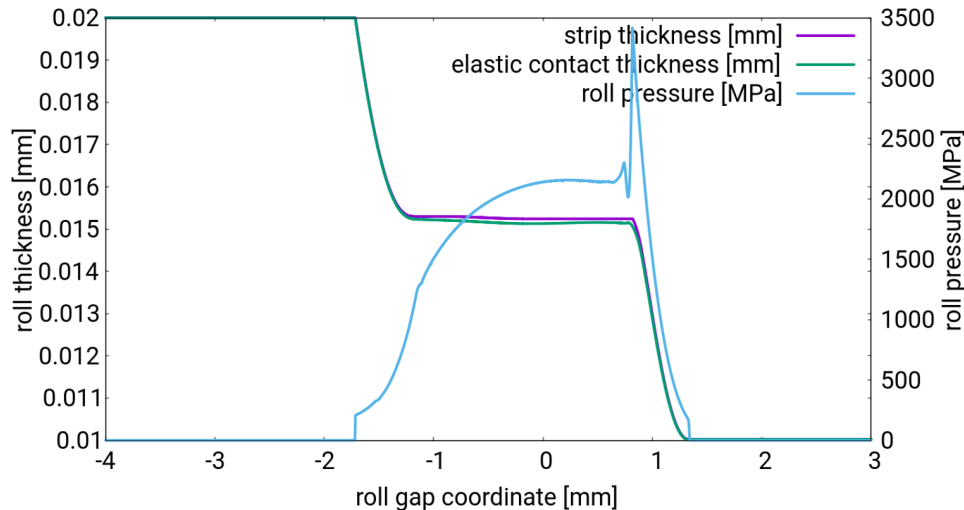


**Abbildung 3.3:** Im FE-Modell genutzte Diskretisierung des Walzspalts

In der FE-Berechnung wird für jedes Element die zum Erhalt eines Kräftegleichgewichts notwendige Verschiebung in der Walzspaltebene iterativ mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens berechnet. Durch die Berechnung der Verschiebung für jedes einzelne Element unter Berücksichtigung der Elastizität des Bandes kann die abgeplattete Walzengeometrie im Vergleich mit dem Ansatz nach Bland, Ford und Ellis genauer vorhergesagt werden. Durch die bessere Vorhersage der Walzenabplattung sind auch die erhaltenen Spannungs- und Druckverläufe über den Walzspalt realistischer als die anhand der Theorie nach Bland, Ford und Ellis berechneten Verteilungen. Die bessere Vorhersagegenauigkeit des Modells geht allerdings mit einem deutlich erhöhten Rechenaufwand einher, weshalb die Berechnung eines Sticks auch mit einer leistungsstarken CPU einige Minuten in Anspruch nehmen kann.

Die Nutzung von leistungsstarken Grafikprozessoren ermöglicht dem FE-Modell dagegen die Berechnung eines Sticks innerhalb weniger Sekunden. Dies entspricht nach Erfahrungswerten von allpccloud einem Beschleunigungsfaktor von 10 bis 20 im Vergleich zu Rechnungen mit klassischen CPUs. Durch die größere Allgemeingültigkeit der nichtlinearen FEM in Verbindung mit der hohen Rechengeschwindigkeit ist die GPU-basierte

FE-Berechnung insbesondere für die Simulation des Walzens von dünnen und hochfesten Bändern interessant, da die Genauigkeit älterer Modelle in diesen Anwendungsbereichen häufig nachlässt (vgl. Kapitel 2.3).



**Abbildung 3.4:** Nachbildung der Walzspaltberechnung von Fleck et al. (1992) mit dem FE-Modell von Mathweis Engineering und allpcloud. Die Randbedingungen entsprechen Fall (e) aus den Abbildungen 2.11 und 2.12

Abbildung 3.4 zeigt die Nachbildung des Falls (e) aus Fleck et al. (1992) (vgl. Abbildungen 2.11 und 2.12) mittels der FE-Berechnung von Mathweis Engineering und allpcloud. Neben der Druckverteilung ist die Walzgutdicke sowohl unter Berücksichtigung der Elastizität des Walzguts (elastic contact thickness) als auch ohne Berücksichtigung der Elastizität (strip thickness) dargestellt. Der Dickenverlauf über den Walzspalt sowie die Größenordnung der ermittelten Drücke stimmen mit den Abbildungen 2.11 und 2.12 überein, im Druckverlauf über den Walzspalt sind jedoch Abweichungen erkennbar. Diese lassen sich dadurch erklären, dass das FE-Modell von Mathweis Engineering und allpcloud im Gegensatz zur Theorie nach Fleck und Johnson die elastische Verformung des Bandes berücksichtigt.

Die Eingangsdaten für die Berechnung werden in Form einer .line-Datei zur Verfügung gestellt. Diese ist eine Textdatei, die im mit dem Stichplanmodell kompatiblen Format “.line” gespeichert wird und alle für die Rechnung benötigten Eingangsgrößen enthält. Die Eingangsgrößen beinhalten neben der Spezifikation der Walzstraße (Rolling Line) auch die Geometrie und Materialeigenschaften des Walzgutes, Prozessparameter sowie numerische Einstellungen. Die .line-Datei kann entweder direkt im Texteditor oder mithilfe einer Benutzeroberfläche erstellt werden. Jede Zeile enthält als ersten Eintrag ein Schlüsselwort, gefolgt von den zum jeweiligen Schlüsselwort gehörigen Parametern. Die einzelnen Einträge einer Zeile sind dabei durch Leerzeichen getrennt. Beginnt eine Zeile der .line-Datei nicht mit einem dem Modell bekannten Schlüsselwort, wird ein Fehler ausgelöst und die Berechnung abgebrochen. Der Aufbau einer beispielhaften .line-Datei ist auszugsweise in



Abbildung 3.5 dargestellt.

```

a) kf 0 0 250
   kf 0 0.162519 400
   kf 0 0.356675 450
   kf 0 2.30259 500
   kfPhiDotC1 0 1
   kfPhiDotC2 0 0
   kfname 0 beispielFließkurve
c) SetReduction 0 4 0.4
   SetReduction 1 1 0.35
   SetReduction 2 1 0.3
   SetRestReduction 3 1
d) VelocityEntrance 166.667
b) Width 1250
e) ComputePassSteadyState

```

**Abbildung 3.5:** Auszüge aus einer beispielhaften Line-Datei mit a) Definition einer einfachen Fließkurve, b) Definition der Bandbreite, c) Festlegung der Reduktionsverteilung, d) Definition der Eintrittsgeschwindigkeit in die Walzstraße, e) Start der Stichplanberechnung mit zuvor definiertem Parametersatz

Die Reihenfolge der Zeilen in der .line-Datei ist variabel. Es ist beispielsweise für die Berechnung unerheblich, ob zuerst die Bandbreite oder die Einsatzdicke des Bundes festgelegt wird, für den der Stichplan berechnet werden soll. Beim Erstellen der Datei muss lediglich gewährleistet werden, dass alle relevanten Angaben vor dem Schlüsselwort “ComputePassSteadyState” aufgeführt sind. Dieses startet die Berechnung des Stichplans für einen stationären Arbeitspunkt mit dem zuvor gewählten Parametersatz. Außerdem ist zu beachten, dass Eingangparameter bei mehrfacher Angabe im Programm überschrieben werden. Wird beispielsweise die Bandbreite zu Beginn der .line-Datei auf 1250 mm festgelegt, in einer der nachfolgenden Zeilen allerdings auf 850 mm gesetzt, rechnet das Prozessmodell mit der zuletzt gesetzten Bandbreite 850 mm. Es wird also immer ein aktueller Status (Parametersatz) im Modellkern gespeichert. Dieser kann sich durch die Überschreibung einzelner Parameter ändern, wobei allerdings nur die betreffenden Eingangsgrößen überschrieben werden. Der Status aller von der Änderung nicht betroffenen Parameter bleibt erhalten. Programme mit dieser Funktionsweise werden als “State Machine” bezeichnet (Wagner et al., 2006).

### 3.5 Adaptionenlogik von Mathweis Engineering

Eine zentrale Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die Integration der Adaptionenlogik von Mathweis Engineering in das Prozessmodell von Mathweis Engineering und allpcloud. Die Adaptionenlogik ist eine tabellarische Zusammenfassung von Erfahrungswerten von Mathweis Engineering in Bezug auf die notwendigen Anpassungen der Eingangsgrößen von Walzmodellen. Die im Kontext der Adaptionenlogik wichtigsten Eingangsgrößen sind

die Fließspannung und der Reibwert. Diese haben einen großen Einfluss auf die Druckverteilung im Walzspalt (vgl. Gleichung (2.51)) und damit auf die Walzkraft und das Walzmoment. Dabei ist der Einfluss der Fließspannung auf Walzkraft und Walzmoment gleichermaßen stark, der Reibwert beeinflusst die Kraft jedoch stärker als das Moment (Pawelski, 2017). Da die Fließspannung und der Reibwert im Prozess nicht messbar sind, werden sie meist durch in Versuchen aufgenommene Fließkurven sowie empirisch bestimmte Reibwertkurven abgebildet. Die Fließspannung ist dabei werkstoffabhängig und kann daher für verschiedene Materialien und Legierungen stark variieren (vgl. Kapitel 2.2.1), während der Reibwert nicht direkt vom Material, sondern stärker von der Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner und weiteren Prozessparametern abhängig ist (vgl. Kapitel 2.2.3). Bei Abweichungen zwischen von einem Walzmodell berechneten Werten für Walzkraft und Walzmoment und den tatsächlich gemessenen Ist-Werten bietet die Adaptionlogik Regeln zur gezielten Anpassung der Modellparameter für Fließspannung und Reibwert. Das Ziel ist es, die Eingangsgrößen der Berechnung so anzupassen, dass die Abweichung der Modellwerte für Walzkraft und Walzmoment von den gemessenen Ist-Werten minimiert wird. Dabei kann die Adaption der Fließspannungen und Reibwerte für verschiedene Geschwindigkeiten zu unterschiedlichen Zahlenwerten für  $k_f$  und  $\mu$  führen und somit die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Größen berücksichtigt werden. Die Anwendungsweise der Adaptionlogik wird in diesem Abschnitt anhand von Abbildung 3.6 vorgestellt.

Constellation of Deviations (Actual - Set)				Iterations as long as Constellation true, Adaptation Steps				
Torque		Force		1a	1b	2a	2b	
Low Speed	High Speed	Low Speed	High Speed	$k_f$	$\mu$	$k_f$	$\mu$	
1	+	+	+	-				No Speed Dependence of Deviation Tendency
2	+	+	-/=	-			+	
3	=	=	+		-	+		
4	=	=	-		+	-		
5	-	-	+/=	+			-	
6	-	-	-	+				
7	=	=	+		LS-		HS+	Speed Dependence of Force Deviation Tendency
8	+	+	+	-	LS-		HS+	
9	-	-	+	+	LS-		HS+	
10	=	=	-		LS+		HS-	
11	+	+	-	-	LS+		HS-	
12	-	-	-	+	LS+		HS-	
13	+	-	=		LS-	+	HS+	Speed Dependence of Torque Deviation Tendency
14	+	-	+		LS-	-	HS+	
15	+	-	-		LS-	+	HS+	
16	-	+	=		LS+	-	HS-	
17	-	+	+		LS+	-	HS-	
18	-	+	-		LS+	+	HS-	

Abbildung 3.6: Adaptionlogik von Mathweis Engineering

Im linken Teil der in Abbildung 3.6 gezeigten Tabelle sind die Abweichungen der von

einem Stichplanmodell berechneten Werte zu den gemessenen Ist-Werten der Walzkraft (Force) und des Walzmoments (Torque) für ein Gerüst aufgeführt. Es wird jeweils zwischen einer Phase mit niedriger Geschwindigkeit (Low Speed) und einer Phase mit hoher Geschwindigkeit (High Speed) unterschieden. Im rechten Teil sind die sich aus den Abweichungen ergebenden notwendigen Anpassungen der Fließspannung  $k_f$  und des Reibwerts  $\mu$  aufgeführt. Die erste Zeile ist beispielsweise so zu verstehen, dass sowohl die berechneten Kräfte als auch die berechneten Momente für beide Geschwindigkeitsphasen größer sind als die vorliegenden Ist-Werte (linker Teil). Daraus folgt nach der Adaptionslogik die Notwendigkeit,  $k_f$  im Modell zu reduzieren (rechter Teil, Spalte 1a), um die berechneten Größen zu senken und damit die Differenz zwischen berechneten und gemessenen Werten zu verringern. Die Abweichungen der Kräfte und Momente sind anhand der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Abweichungstendenz in drei Blöcke unterteilt. Im ersten Block (Fall 1-6) ist die Tendenz der Abweichungen von Kraft und Moment unabhängig von der Geschwindigkeit. Ist beispielsweise das berechnete Moment in der Low-Speed-Phase größer als das an der Anlage gemessene, so gilt dies auch in der High-Speed-Phase (Fall 1 und 2). Die Abweichungstendenz der Walzkraft muss in diesem Block das gleiche, geschwindigkeitsunabhängige Verhalten zeigen. Ist die Tendenz der Abweichung der Momente in beiden Geschwindigkeitsphasen gleich, die Tendenz der Abweichung der Kräfte allerdings unterschiedlich, so ist der Fall im zweiten Block (Fall 7-12) eingeordnet. Ein Beispiel dafür ist Fall 7. Die berechneten Walzmomente entsprechen für beide Geschwindigkeitsphasen im Rahmen der geforderten Toleranz den gemessenen Werten, die Walzkräfte weichen allerdings ab. Wären die berechneten Walzkräfte für beide Geschwindigkeiten zu groß oder zu klein, müsste der Fall im ersten Block verortet werden. Da sie allerdings im Low-Speed-Bereich zu groß und im High-Speed-Bereich zu klein sind, gehört dieser Fall zum zweiten Block. Der dritte Block (Fall 13-18) enthält demgegenüber alle Fälle, in denen die Tendenz der Abweichung der Momente geschwindigkeitsabhängig ist, die Tendenz der Abweichung der Kräfte allerdings nicht.

Aus den Konstellationen der Abweichungen von Kräften und Momenten ergeben sich die in der rechten Hälfte von Abbildung 3.6 gezeigten Aktionen. Wie zu Beginn dieses Abschnitts angesprochen, ist es das Ziel der Adaption, die Eingangsgrößen  $k_f$  (Fließspannung) und  $\mu$  (Reibwert) für jedes Gerüst so anzupassen, dass die berechneten Kräfte und Momente innerhalb einer vom Anwender festzulegenden Toleranz den gemessenen Werten entsprechen. Da eine einmalige Anpassung der Eingangsparameter häufig nicht zum gewünschten Erfolg führt, werden sie bis zum Erreichen der gewünschten Toleranz schrittweise verändert. Dazu wird in jedem Durchlauf ein Vergleich zwischen Rechen- und Ist-Werten vorgenommen. Aus der Konstellation der Abweichungen ergibt sich eine Aktion, die iterativ so lange ausgeführt wird, bis sich entweder ein neuer Fall einstellt oder alle berechneten Kräfte und Momente die Messwerte hinreichend genau treffen. So werden im Allgemeinen bis zum Erreichen der endgültigen Lösung mehrere Fälle durchlaufen. Die

Komplexität der Aktion ist maßgeblich von der vorliegenden Konstellation abhängig. In den einfachsten Fällen (Fall 1 und 6) sind alle berechneten Werte zu groß oder zu klein. Da, wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, die Fließspannung für verschiedene Materialien sehr unterschiedlich sein kann und außerdem Walzkraft und Walzmoment gleichermaßen beeinflusst, wird sie in einem solchen Fall zunächst angepasst. Die Fließspannung wird so lange für beide Geschwindigkeiten iterativ gesenkt (Fall 1) oder erhöht (Fall 6), bis alle Rechenwerte hinreichend genau mit den Messwerten übereinstimmen oder sich eine andere Konstellation einstellt. Es ist beispielsweise möglich, dass sich, ausgehend von Fall 1, durch das Senken von  $k_f$  eine Konstellation einstellt, bei der die berechneten Momente näherungsweise mit den gemessenen übereinstimmen, die berechneten Kräfte allerdings zu hoch sind (Fall 3). In diesem Fall muss aufgrund der erhöhten Kräfte der Reibwert  $\mu$  gesenkt werden. Da der Reibwert allerdings auch einen Einfluss auf die Berechnung der Momente hat, muss die Abnahme von  $\mu$  im nächsten Schritt durch eine Erhöhung von  $k_f$  ausgeglichen werden. Durch diese Manipulation kann sich beispielsweise die Konstellation aus Fall 10 einstellen, wodurch sich erstmals eine Geschwindigkeitsabhängigkeit ergibt. Diese führt dazu, dass die Reibwerte für die langsame und schnelle Geschwindigkeitsphase unabhängig voneinander angepasst werden müssen. Da die berechneten Kräfte im Low-Speed-Bereich zu klein und im High-Speed-Bereich zu groß sind, wird  $\mu$  für die niedrige Geschwindigkeitsphase (LS) iterativ erhöht und für die Hochgeschwindigkeitsphase (HS) entsprechend abgesenkt. Durch die schrittweise Anpassung der Reibwerte wird schließlich entweder der Zielwert erreicht, oder es müssen weitere Fälle durchlaufen werden.

Der Beschreibung der Vorgehensweise zur Nutzung der Adaptionlogik kann bereits entnommen werden, dass diese in der gezeigten Form eher als grober Leitfaden für einen Anwender mit Expertenwissen zu sehen ist. Beispielsweise ist eine genaue Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten extrem unwahrscheinlich. Daher muss der Anwender von Fall zu Fall entscheiden, ob die Abweichungen zwischen Rechnung und Messung so gering sind, dass der vom Modell berechnete und der Ist-Wert bezüglich der Fallunterscheidung als gleich angenommen werden können. Außerdem sind nicht alle Fälle explizit aufgeführt und teilweise zusammengefasst, sodass der Anwender sich gegebenenfalls an einem ähnlichen Fall orientieren muss. Weiterhin ist die Größenordnung der Anpassung der Eingangswerte manuell festzulegen. Wenn die erste Iteration die Abweichungen von Kräften und Momenten nur minimal ändert, müssen die Eingangsparameter im nächsten Schritt deutlich stärker angepasst werden. Die Erfahrung des Anwenders spielt hierbei eine wichtige Rolle. Darüber hinaus ist es essenziell, dass der Anwender bei jeder Iteration die Plausibilität der Eingaben prüfen kann. Wenn die berechneten Kräfte und Momente beispielsweise für sehr geringe Reibwerte (z.B.  $\mu < 0,02$ ) den Messwerten entsprechen, muss die Lösung trotzdem verworfen werden, da der zugrundeliegende Reibwert für das Walzen von Stahl nicht plausibel ist (Weber, 1974).

## 4 Datenaufbereitung und Plausibilisierung für die Verwendung im Prozessmodell

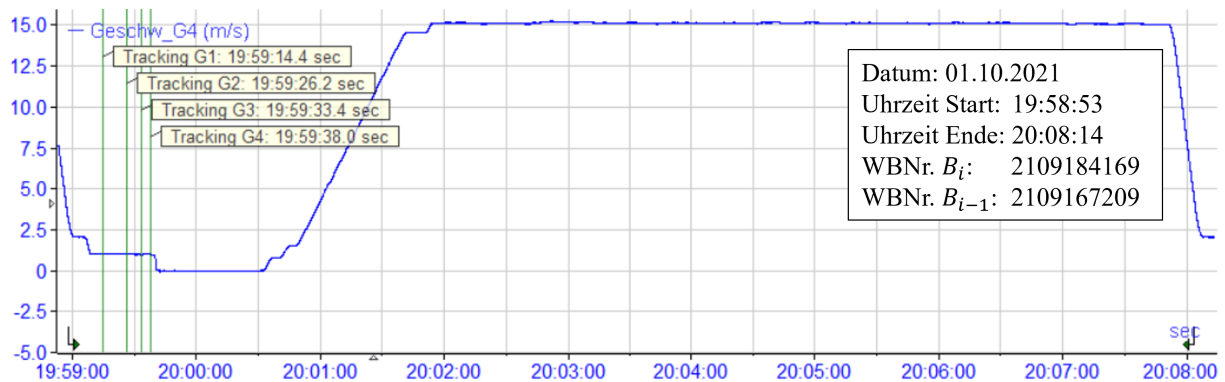
Im Zuge der Validierung des Prozessmodells mussten zunächst die Anlagendaten aufbereitet und plausibilisiert werden. Die Datenbasis lässt sich strukturell in zwei Teilmengen, die detaillierten .dat-Dateien aus dem iba-System und die übersichtlicheren .csv-Dateien mit Datenbankwerten, unterteilen. Die ausgelesenen Datenbankwerte sind pro Monat in zwei Dateien unterteilt. Die Datei "schedule.csv" enthält vor allem vom Stichplanmodell berechnete Sollwerte, beispielsweise für Walzkräfte, Momente, Dickenverteilung und Bandzüge, darüber hinaus sind auch die angenommenen Werte für Fließspannung und Reibwert hinterlegt. In der Datei "adaption.csv" sind jeweils hauptsächlich Mittelwerte der aufgenommenen Messgrößen sowie aus den Messgrößen errechnete Ist-Werte gespeichert, weiterhin enthält die Datei für jedes gewalzte Bund die Durchmesser und Laufleistungen der genutzten Arbeits- und Stützwalzen. Auch in den .csv-Dateien wird die bereits in Kapitel 3.5 eingeführte Unterscheidung zwischen niedriger und hoher Geschwindigkeit getroffen, diese werden als "Body High" (BH) und "Body Low" (BL) bezeichnet.

Zur Validierung des Prozessmodells und insbesondere für die Nutzung der Adaptionlogik werden Referenzwerte für Walzkraft und Walzmoment sowohl aus dem High-Speed- als auch aus dem Low-Speed-Bereich benötigt. Daher ist die Festlegung der Niedrig- und Hochgeschwindigkeitsphasen ein zentraler Bestandteil der Datenaufbereitung und -plausibilisierung. In den folgenden Abschnitten werden zunächst anhand eines repräsentativen Geschwindigkeitsverlaufs Phasen für die Bereiche BL und BH definiert. Anschließend wird mithilfe eines Vergleichs der so festgelegten Geschwindigkeitsphasen mit den in den .csv-Dateien angegebenen Geschwindigkeiten geprüft, ob die gespeicherten Datenbankwerte für Ist-Kräfte und -Momente als Referenzgrößen für die Validierung und Adaption geeignet sind. Darauf aufbauend wird anschließend die Aufbereitung und Verknüpfung der Datensätze aus verschiedenen Quellen beschrieben. Zuletzt werden die erhaltenen Messwerte insbesondere der Kräfte und Momente auf Plausibilität geprüft, da diese bei der Validierung und Adaption des Modells eine zentrale Rolle einnehmen.

### 4.1 Festlegung von Geschwindigkeitsphasen für die Datenaufbereitung

Der erste Schritt in der Aufbereitung der Anlagendaten ist die Plausibilisierung der in den .csv-Dateien vorliegenden komprimierten Informationen mithilfe der detaillierten Verläufe der .dat-Dateien aus dem iba-System. Im Zuge dessen mussten zunächst die Geschwindigkeiten für die Low-Speed- und High-Speed-Phasen definiert werden, wozu der Verlauf der Bandgeschwindigkeit in Gerüst 4 genutzt wurde. Der Grund für die Festlegung der Phasen anhand der Geschwindigkeit in G4 ist die Funktion des letzten Gerüsts als Leitgerüst

für die Geschwindigkeitsverteilung im Tandem. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, wird der Stichplan ausgehend von der Maximalgeschwindigkeit in G4 erstellt und die Sollgeschwindigkeiten in den übrigen Gerüsten auf Basis der Dickenverteilung aus dieser berechnet. Weiterhin ist die Geschwindigkeit beim Durchlauf der Schweißnaht auf 1 m/s festgelegt (vgl. Kapitel 3.1), während sie sich für die übrigen Gerüste wieder aus der Dickenverteilung ergibt, also für jedes Bund unterschiedlich sein kann. Somit ist G4 als einziges Gerüst für die Definition einheitlicher Geschwindigkeitsphasen geeignet. Die Festlegung der Bandgeschwindigkeiten für die jeweiligen Phasen wird im Folgenden beispielhaft anhand von Abbildung 4.1 erläutert.



**Abbildung 4.1:** Verlauf der Bandgeschwindigkeit in G4 über der Zeit für ein beispielhaftes Bund. Ausschnitt aus *ibaAnalyzer*.

Abbildung 4.1 zeigt einen Ausschnitt aus der Software *ibaAnalyzer*. Diese bietet die Möglichkeit, die vom Datenerfassungssystem *ibaPDA* erzeugten .dat-Messdateien zu analysieren. Dabei können in den .dat-Dateien enthaltene Signale im Zusammenhang betrachtet, verknüpft oder angepasst werden, weiterhin besteht die Möglichkeit zum Erstellen eigener Signale. In Abbildung 4.1 ist der Verlauf der Bandgeschwindigkeit (blau) in Gerüst 4 im Zeitintervall der geladenen Messdatei dargestellt, also ein von *ibaPDA* aufgenommenes Messsignal. Weiterhin wird der Durchlauf der Schweißnaht durch die vier Gerüste des Tandems von vier Markern (grün) angezeigt, welche manuell hinzugefügt wurden. Die zugrundeliegende Logik zum Tracking der Schweißnaht basiert auf der von Kämper (2020) durchgeführten *iba*-Analyse. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, liegt der Umschaltzeitpunkt zwischen zwei Dateien an der untersuchten Anlage zeitlich immer kurz vor dem Durchlauf der Schweißnaht. Somit kann jede .dat-Datei eindeutig einem Bund zugeordnet werden, welches sich während eines Großteils des von der Datei abgedeckten Zeitintervalls im Tandem befindet. Das der Datei zugeordnete Bund wird in diesem Abschnitt als  $B_i$  bezeichnet. Der Anteil der Verläufe, der zeitlich vor dem Schweißnahtdurchlauf liegt, behandelt jeweils das Vorgängerbund, also  $B_{i-1}$ . Der Start- und Endpunkt des einer Messdatei zugehörigen Zeitintervalls ist durch schwarze Pfeile in den unteren Ecken jedes Verlaufs markiert. Allerdings enthält jede Messdatei zusätzlich das Ende der Vorgängerdater sowie den Beginn der Nachfolgedatei, sodass zwischen zwei aufeinanderfolgenden Dateien eine Überschneidung

von mehreren Sekunden entsteht (vgl. Abbildung 4.1). Diese Überschneidung kann allerdings vom Programm problemlos beim Zusammenfügen der einzelnen Verläufe verarbeitet werden und bietet weiterhin den Vorteil, auch Randbereiche in die Analysen mit einzu beziehen, die bereits im Intervall der Vorgänger- oder Nachfolgerdatei liegen.

Der in Abbildung 4.1 dargestellte Geschwindigkeitsverlauf zeigt zunächst das Abbremsen des Bandendes von  $B_{i-1}$ . Dieses wird auf die Durchlaufgeschwindigkeit der Schweißnaht (1 m/s) abgebremst, der Abbremsvorgang wird allerdings für wenige Sekunden bei einer Bandgeschwindigkeit von 2 m/s unterbrochen. Diese Zwischenstufe hat sich an der Anlage für den Großteil der Sortimente etabliert, da ein übermäßiger Rückfluss der Kühl-Schmier-Emulsion aus dem Walzspalt auf diese Weise verhindert werden kann. Bei der Geschwindigkeit von 1 m/s in G4 durchläuft die Schweißnaht anschließend nacheinander alle vier Gerüste (s. Tracking-Marker), wobei der zeitliche Abstand zwischen zwei Gerüsten mit zunehmender Gerüstnummer aufgrund der Geschwindigkeitsverteilung am Tandem immer geringer wird. Nach dem Schweißnahtdurchlauf wird das Tandem angehalten, sodass die Bunde von der Schere hinter dem vierten Gerüst an der Schweißnaht getrennt werden können. Anschließend wird der Bandanfang von  $B_i$  am Aufhaspel angewickelt und die Anlage wird auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt. Zuletzt folgt wieder die Abbremsung vor dem Schweißnahtdurchlauf. Ein wichtiges Kriterium für die Festlegung der Geschwindigkeitsphasen ist ein nahezu stationärer Arbeitsbereich, da das Prozessmodell die Stiche ebenfalls stationär berechnet. Dies bedeutet, dass die festgelegten Bereiche für BH und BL keine Beschleunigungs- oder Verzögerungsphasen beinhalten dürfen. Um eine näherungsweise konstante Geschwindigkeit innerhalb der einzelnen Phasen sicherzustellen, wurde zunächst die Steigung und die Krümmung (erste und zweite Ableitung nach der Zeit) der Bandgeschwindigkeit begrenzt. Für die Phase BL gilt

$$|\dot{v}_{G4,BL}| < 0,1 \frac{m}{s^2}, \quad (4.1)$$

$$|\ddot{v}_{G4,BL}| < 1 \frac{m}{s^3}. \quad (4.2)$$

Bei der Untersuchung der Daten wurde eine stärkere Schwankung der Geschwindigkeit im Highspeed-Bereich festgestellt, die auch in Abbildung 4.1 erkennbar ist. Um trotzdem eine möglichst unterbrechnungsfreie Hochgeschwindigkeitsphase zu erhalten, wurden die Grenzen für die Phase BH weiter gefasst. Sie lauten

$$|\dot{v}_{G4,BH}| < 0,5 \frac{m}{s^2}, \quad (4.3)$$

$$|\ddot{v}_{G4,BH}| < 10 \frac{m}{s^3}. \quad (4.4)$$

Durch die Beschränkungen aus den Ungleichungen (4.1) bis (4.4) ist festgelegt, dass die definierten Zeiträume für BH und BL keine Beschleunigungs- oder Verzögerungsphasen enthalten. Allerdings muss zusätzlich zu diesen Einschränkungen für jede Phase ein Be-

reich für die Geschwindigkeit  $v_{G4}$  definiert werden, da ansonsten jeder Zeitraum nahezu konstanter Geschwindigkeit für jede Phase infrage käme. Für die Phase BH kann aufgrund des vielfältigen Produktmixes kein allgemeingültiger Geschwindigkeitsbereich vorgegeben werden, weshalb dieser von der maximal gemessenen Geschwindigkeit in der jeweiligen Datei abhängig ist. Er ist durch die Bedingung

$$v_{G4,BH} > \max(v_{G4}) - 0,2 \frac{m}{s} \quad (4.5)$$

festgelegt. Die Phase BH entspricht zusammenfassend also immer dem Zeitraum, in dem die Bedingungen (4.3), (4.4) und (4.5) gelten.

Für die Definition einer Low-Speed-Phase bietet sich intuitiv der Zeitraum des Schweißnahtdurchlaufs an, da währenddessen die Sollgeschwindigkeit in G4 immer als 1 m/s definiert ist. Weiterhin ist dieser Geschwindigkeitsbereich der einzige, in dem mithilfe des Schweißnahttrackings die Voreilung in allen Gerüsten bestimmt werden kann (Kämper, 2020). Diese ist ein möglicher Vergleichswert zur Überprüfung der Richtigkeit von Walzspaltberechnungen. Zur Definition der Phase wurde die Bandgeschwindigkeit zu

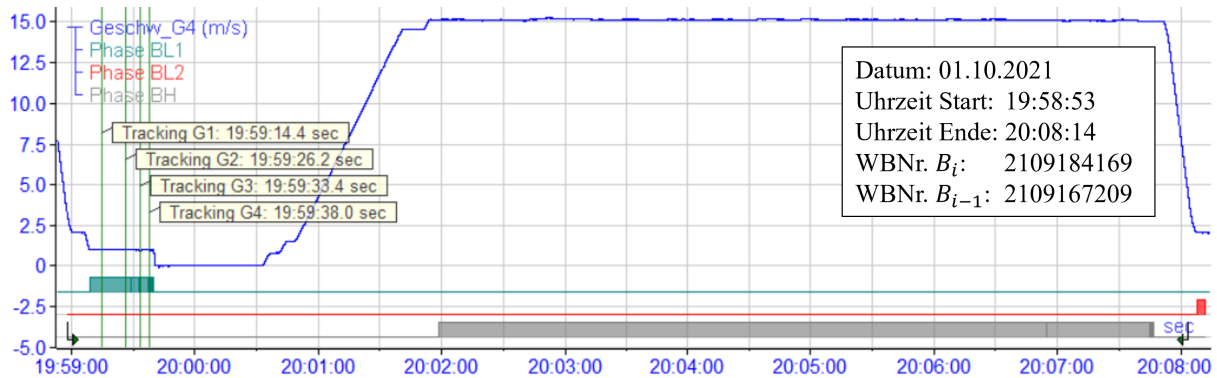
$$0,95 \frac{m}{s} < v_{G4,BL1} < 1,05 \frac{m}{s} \quad (4.6)$$

definiert, sie muss also in einem Intervall von  $\pm 0,05$  m/s um den Sollwert liegen. Des Weiteren gilt die Bedingung, dass die Phase zeitlich vor dem Anhalten der Anlage zum Trennen an der Schweißnaht liegen muss. Zur Bildung von Referenzwerten für die Validierung des Stichplanmodells eignet sich die Phase BL1 allerdings nur bedingt. Dies liegt vor allem daran, dass sich aufgrund des Schweißnahtdurchlaufs während dieser Phase, in Teilen von BL1 noch das Vorgängerbund  $B_{i-1}$  des betrachteten Bundes  $B_i$  im Tandem befindet. Die zu  $B_{i-1}$  gehörigen Teilverläufe könnten somit die Referenzwerte für  $B_i$  verfälschen. Außerdem geht mit dem Durchlauf der Schweißnaht insbesondere bei einem Produktwechsel, also einer Änderung der geometrischen und/oder mechanischen Eigenschaften des Bandes, eine Vielzahl von Umschaltvorgängen an der Anlage einher. Nach dem Umschalten müssen alle Regelgrößen so eingestellt werden, dass das erzeugte Band alle Vorgaben erfüllt. Diese Regelungsprozesse können einige Sekunden andauern, während denen nicht von einem stationären Arbeitspunkt ausgegangen werden kann. Aufgrund dieser Einschränkungen der Nutzbarkeit der Phase BL1 wurde mit BL2 eine weitere Phase für den Low-Speed-Bereich definiert. Dazu konnte die bereits zu Beginn dieses Kapitels angesprochene Zwischenstufe beim Abbremsen vor dem Schweißnahtdurchlauf genutzt werden (vgl. Abbildung 4.1). Für den Großteil der Sortimente wird während der Zwischenstufe für wenige Sekunden die Sollgeschwindigkeit von 2 m/s angefahren, sodass sich für Geschwindigkeit der Phase BL2 folgendes Intervall ergibt:

$$1,95 \frac{m}{s} < v_{G4,BL2} < 2,05 \frac{m}{s}. \quad (4.7)$$



Diese Phase ist zwar im Vergleich zur Phase BL1 im Allgemeinen deutlich kürzer und bietet daher weniger Datenpunkte zur Bildung von aussagekräftigen Mittelwerten, allerdings finden hier keine Umschaltvorgänge statt. Durch die Anordnung dieser Phase am Ende des Durchlaufs des Bundes durch das Tandem kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass die Regelung eingeschwungen ist und somit für die kurze Dauer dieser Phase ein näherungsweise stationärer Prozess gewährleistet werden kann. Es ist allerdings zu beachten, dass ausschließlich die Zwischenstufe am Ende der jeweiligen Datei berücksichtigt werden darf, da diese sich auf das Bund  $B_i$  bezieht. Zum Zeitpunkt der Abbremsung am Beginn der Datei befindet sich demgegenüber noch das Vorgängerbund  $B_{i-1}$  im Tandem, sodass innerhalb dieser Phase gebildete Referenzwerte nicht zum Vergleich mit der Berechnung von  $B_i$  genutzt werden dürfen. Die Auswahl der korrekten Phase wird durch die Bedingung gewährleistet, dass die Phase BL2 zeitlich erst nach der Phase BH beginnen kann.



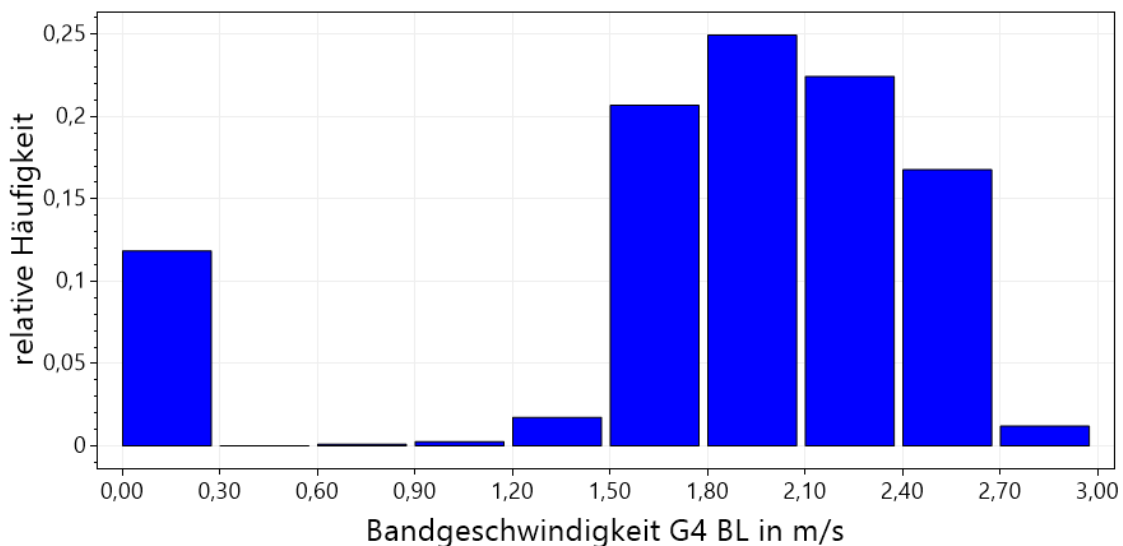
**Abbildung 4.2:** Verlauf der Bandgeschwindigkeit in G4 über der Zeit und sich daraus ergebende Definition der Geschwindigkeitsphasen für ein beispielhaftes Bund. Ausschnitt aus *ibaAnalyzer*.

Die auf Basis der in diesem Kapitel erläuterten Randbedingungen erhaltenen Phasen BH (grau), BL1 (türkis) und BL2 (rot) für den in Abbildung 4.1 gezeigten Geschwindigkeitsverlauf sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Phasen sind dabei als boolesche Signale angelegt, die bei Erfüllung der zuvor genannten Bedingungen den Wert TRUE und sonst den Wert FALSE annehmen. Mithilfe dieser Signale lassen sich in der Software *ibaAnalyzer* bedingte Auswertungen durchführen, beispielsweise kann der Mittelwert der Walzkraft für den Zeitraum, in dem Phase BH = TRUE gilt, ermittelt werden.

## 4.2 Überprüfung der Eignung der Datenbankwerte als Referenzwerte für die Validierung anhand der festgelegten Geschwindigkeitsphasen

Nach der Definition der Geschwindigkeitsphasen muss als nächstes überprüft werden, ob die in den .csv-Dateien getroffene Unterscheidung der Phasen BH und BL mit den in

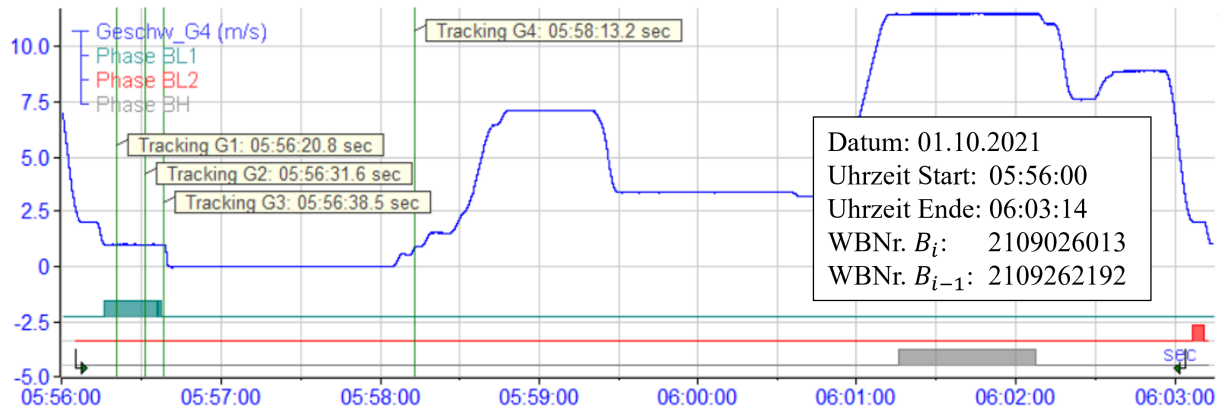
Kapitel 4.1 beschriebenen Kriterien zur Festlegung dieser Phasen übereinstimmt. Die Dateien für die Monate August bis Oktober enthalten in Summe 13.925 Datensätze, von denen jeder einem gewalzten Bund entspricht. Abbildung 4.3 zeigt die Verteilung der in den .csv-Dateien für die Phase BL angegebenen Ist-Geschwindigkeiten. Bei der Betrachtung des Histogramms fällt direkt auf, dass für ungefähr 12% der Datensätze die angegebene Geschwindigkeit zwischen 0 und 0,3 m/s liegt. Bei einer Untersuchung der zugrundeliegenden Daten stellte sich heraus, dass die Geschwindigkeit in den betreffenden 1650 Datensätzen als exakt null angegeben wird. Auch andere Spalten der Datei enthalten für diese Datensätze Nullwerte, was auf einen Fehler in der Datenerfassung oder -verarbeitung hindeutet. Diese Vermutung wurde stichprobenartig anhand der entsprechenden iba-Messdateien überprüft und bestätigt.



**Abbildung 4.3:** Verteilung der in den .csv-Dateien für die Phase BL angegebenen Werte für die Geschwindigkeit in G4

Beispielhaft ist in Abbildung 4.4 der Geschwindigkeitsverlauf in Gerüst 4 für das Bund mit der Warmbandnummer 2109026013 dargestellt. Dieses ist eines der Bunde, dessen Datensatz in der entsprechenden adaption.csv-Datei nahezu ausschließlich aus Nullwerten besteht. Der dargestellte Verlauf zeigt allerdings, dass der Geschwindigkeitsverlauf des Bundes plausibel ist und alle in Kapitel 4.1 geforderten Phasen vorhanden sind. Die zwischenzeitlichen Verzögerungs- und Beschleunigungsphasen lassen auf manuelle Eingriffe des Anlagenbedieners, beispielsweise aufgrund eines sich leerenden Koppelspeichers zwischen Beize und Tandem, schließen. Abbildung 4.4 zeigt weiterhin, dass die gewählten Kriterien für die Geschwindigkeitsphasen auch für solche Messdateien das gewünschte Ergebnis liefern, die komplexere Geschwindigkeitsverläufe beinhalten als die in Abbildung 4.2 dargestellte Datei.

Auch bei Nichtberücksichtigung der in Abbildung 4.3 dargestellten Nullwerte zeigt sich,



**Abbildung 4.4:** Verlauf der Geschwindigkeit in G4 für die WBNr. 2109026013 mit eingetragenen Phasen

dass die verbleibenden Werte für die Geschwindigkeit in G4 im Großteil nicht mit den in Kapitel 4.1 festgelegten Definitionen der Phasen übereinstimmt. Aufgrund der Verteilung der Werte im Histogramm kann zwar eine Verbindung zur in der iba-Analyse festgelegten Phase BL2 hergestellt werden, die gezeigten Geschwindigkeiten weisen allerdings eine hohe Streuung auf. Die hohe Streuung der Werte lässt darauf schließen, dass sich die in den .csv-Dateien genutzte Phase BL nicht ausschließlich auf die anhand der Verläufe bestimmte Phase BL2 stützt, sondern auch Beschleunigungs- und/oder Verzögerungsphasen beinhaltet. Bei Anwendung der Bedingung (4.7) auf die im Histogramm gezeigten Daten verbleiben noch 926 Datensätze, also etwa 6,65% der ursprünglichen Menge. Auch bei diesen ist allerdings unklar, ob sie sich auf die näherungsweise stationäre Zwischenstufe beim Abbremsen vor dem Schweißnahtdurchlauf beziehen, oder lediglich der Mittelwert eines nicht stationären Geschwindigkeitsbereichs zwischen 1,95 und 2,05 m/s liegt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zusammensetzung der Phase BL in den .csv-Dateien nicht nachvollzogen werden kann und daher die Nutzung von auf dieser Phase beruhenden Referenzwerten für die Modellvalidierung nicht empfehlenswert ist. Eine sinnvolle Alternative ist aufgrund der Möglichkeit zur transparenten und nachvollziehbaren Definition der Phasen eine Extraktion der Referenzwerte aus den Verläufen der .dat-Messdateien. Da wegen der fehlenden Übereinstimmung der Phase BL aus der .csv-Datei mit den iba-Verläufen ohnehin die Referenzwerte für Kräfte und Momente aus den .dat-Dateien extrahiert werden müssen, wird auf eine weitere Untersuchung bezüglich der Phase BH an dieser Stelle verzichtet.

### 4.3 Aufbereitung und Verknüpfung der Datensätze

In diesem Abschnitt wird die Aufbereitung der verfügbaren Anlagendaten gemäß der in Kapitel 4.1 definierten Geschwindigkeitsphasen behandelt. Dazu wird im ersten Schritt die Extraktion von textbasierten Daten aus dem iba-System vorgestellt. Anschließend wird die Zusammenführung der extrahierten Daten mit zusätzlichen Informationen, die

nicht in den Messdateien des iba-Systems enthalten sind, beschrieben.

#### 4.3.1 Extraktion von textbasierten Daten aus iba-Messdateien

Da die in den .csv-Dateien enthaltenen Datenbankwerte nicht zur Validierung des Modells genutzt werden können (vgl. Kapitel 4.2), müssen die benötigten Informationen aus den .dat-Messdateien extrahiert werden. Dies wird unter Voraussetzung der entsprechenden Lizenz durch die Extraktionsfunktion der Software *ibaAnalyzer* ermöglicht. Die Daten können in verschiedenen Formaten ausgegeben werden, in dieser Arbeit wurde allerdings ausschließlich die textbasierte Extraktion in .txt-Dateien genutzt. Im Untermenü der Extraktionsfunktion können alle Signale festgelegt werden, die extrahiert werden sollen. Dies können sowohl Sensorsignale aus den Messdateien als auch in der Analysedatei manuell hinzugefügte Signale wie Mittelwerte eines Messsignals über einen bestimmten Zeitraum sein. Die Extraktion von mehreren Dateien kann mithilfe der Software `textitibaDatCoordinator` koordiniert werden. Dazu müssen zunächst ein oder mehrere Verzeichnisse ausgewählt werden, in denen die zu extrahierenden Messdateien gespeichert sind. Weiterhin muss ein Zielpfad angegeben werden, unter dem die erstellten Extraktionsdateien abgelegt werden sollen. Außerdem muss die Analysedatei ausgewählt werden, in der die zu extrahierenden Signale definiert und ausgewählt sind. Optional kann auch eine Bedingung für die Extraktion festgelegt werden, beispielsweise ein Check-Signal, dessen Wert für jede Messdatei in den ausgewählten Verzeichnissen überprüft wird. Ist der Wert des Signals TRUE, wird die betreffende Datei extrahiert, ist er FALSE, wird sie übersprungen. Wenn keine derartige Bedingung definiert ist, werden alle .dat-Dateien in den angegebenen Ursprungsverzeichnissen bearbeitet und die entsprechenden .txt-Dateien in das Zielverzeichnis extrahiert.

Die wichtigsten zu extrahierenden Signale für die Validierung des Prozessmodells sind die Walzkräfte und Momente für die Phasen BL2 und BH, da diese als Referenzwerte benötigt werden. Darüber hinaus werden allerdings weitere Signale extrahiert, die zur Parametrierung des Modells notwendig sind oder zu einem späteren Zeitpunkt für Auswertungen genutzt werden können. Diese sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst dargestellt.

Bei allen in Tabelle 4.1 aufgeführten Signalen, die nicht explizit anders bezeichnet sind, handelt es sich um Ist-Werte. Weiterhin handelt es sich mit Ausnahme der Tracking-Voreilung bei allen Signalen um gemittelte Werte über die jeweils angegebenen Phasen. Ist keine Phase angegeben, gilt der Wert für das gesamte Bund. Darüber hinaus wird angemerkt, dass die Zwischengerüstgrößen (Züge und Banddicken) zur Vereinfachung in der Tabelle teilweise doppelt aufgeführt sind, beispielsweise entspricht der Vorzug in G1 dem Rückzug in G2. Doppelt aufgeführte Signale werden allerdings trotzdem nur einmal extrahiert. Demgegenüber sind einige Signale nur für G1 oder G4 verfügbar, da die notwendige Messtechnik an den anderen Gerüsten fehlt. Sonderfälle sind der Zeitstempel, die Warmbandnummer und das boolesche Signal für den Produktwechsel, die keinem Gerüst

Signal	Gerüst	Phase
Zeitstempel		
Warmbandnummer		
Walzkraft	G1 - G4	BL2, BH
gemittelttes Motormoment (OW/UW)	G1 - G4	BL2, BH
Voreilung Tracking	G1 - G3	BL1
Voreilung Sollwert	G1 - G3	BL1
Voreilung	G1, G4	BL1, BL2, BH
Rückzug	G1 - G4	BL2, BH
Vorzug	G1 - G4	BL2, BH
Walzenumfangsgeschwindigkeit	G1 - G4	BL2, BH
Bandgeschwindigkeit Einlauf	G1	BL1, BL2, BH
Bandgeschwindigkeit Auslauf	G1, G4	BL1, BL2, BH
Banddicke Einlauf	G1	BL1, BL2, BH
Banddicke Auslauf	G1, G4	BL1, BL2, BH
Banddicke Einlauf Sollwert	G1 - G4	
Banddicke Auslauf Sollwert	G1 - G4	
Walzwinkel	G1	BL1, BL2, BH
Walzwinkel Sollwert	G1 - G4	
Reduktion	G1	BL1, BL2, BH
Reduktion Sollwert	G1 - G4	
Produktwechsel		

**Tabelle 4.1:** Übersicht der aus den .dat-Messdateien extrahierten Signale

und keiner Phase zugeordnet werden können. Das Signal für den Produktwechsel gibt wieder, ob sich die Soll-Bandbreite und/oder die Soll-Banddicke zwischen dem ersten Datenpunkt und einem Datenpunkt in der Mitte der Messdatei ändert. Bei einer Änderung der Sollgeometrie des Bandes nimmt es den Wert 1 an, bei keiner Änderung den Wert 0. Mit den gewählten Extraktionseinstellungen wird aus jeder .dat-Datei eine .txt-Datei mit den ausgewählten Signalen erstellt. Jede .txt-Datei umfasst dabei zwei Zeilen und  $n$  Spalten, wobei  $n$  die Anzahl der extrahierten Signale ist. In der ersten Zeile befinden sich jeweils die Titel der extrahierten Signale und in der zweiten Zeile die zugehörigen Ausprägungen für das betrachtete Bund. Falls ein Signal nicht existiert, fehlen auch alle darauf aufbauenden Signale, und es werden keine Spalten für diese angelegt. Wenn also

beispielsweise die Phase BL2 für ein Bund nicht vorhanden ist, weil die Zwischenstufe beim Abbremsen vor der Schweißnaht nicht angefahren wurde, fehlen in der extrahierten .txt-Datei alle auf der Phase BL2 basierenden Signale. Dies führt zu einer abweichenden Spaltenanzahl und infolgedessen zu Problemen bei der Zusammenführung der .txt-Dateien verschiedener Bunde. Um derartige Probleme zu vermeiden, sollen ausschließlich .txt-Dateien für Messdateien erstellt werden, in denen alle zu extrahierenden Signale vorhanden sind. Zu diesem Zweck wurde ein boolesches Check-Signal eingeführt. Dieses ist eine Verkettung verschiedener Kriterien, die zur Überprüfung des Vorhandenseins aller benötigten Informationen eingeführt wurden. Nur wenn alle Kriterien erfüllt sind, nimmt das Check-Signal den Wert TRUE an. Dieses Signal wird im Zuge der Massenextraktion vom *ibaDatCoordinator* für jede .dat-Datei vor der Durchführung der Extraktionsaufgabe überprüft. Wenn der Wert des Check-Signals in einer Messdatei TRUE ist, werden die gewünschten Daten extrahiert, ansonsten wird die Datei übersprungen. Somit werden Messdateien, die nicht alle geforderten Informationen beinhalten, bereits im Vorfeld aussortiert. Die Definitionen und Funktionen der einzelnen Kriterien werden im Folgenden beschrieben.

### **Kriterium Schweißnahtdurchlauf**

Das erste Kriterium ist der Schweißnahtdurchlauf in den Gerüsten 1 und 4. Es ist erfüllt, wenn die Schweißnaht sowohl in G1 als auch in G4 anhand der Walzkraft getrackt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die Schweißnaht innerhalb des von der Messdatei abgedeckten Intervalls das Tandem komplett durchlaufen und somit ein Wechsel von Bund  $B_{i-1}$  zu  $B_i$  stattgefunden hat, wie es im Regelbetrieb der Fall ist. Verläufe ohne Durchlauf der Schweißnaht, die bei Testfahrten, Störungen usw. aufgenommen werden können, werden durch dieses Kriterium aussortiert.

### **Kriterium Warmbandnummer**

Das zweite Kriterium ist das Vorhandensein einer Warmbandnummer. Da diese im weiteren Verlauf der Auswertungen als eindeutiges Identifikationsmerkmal für die verschiedenen Bunde benötigt wird, werden ausschließlich Daten aus Dateien mit einem vorhandenen Signal für die Warmbandnummer extrahiert.

### **Kriterium Phase BH**

Grundlage für das dritte Kriterium ist die Phase BH. Diese muss eine Dauer von mindestens 10 Sekunden haben, um einen näherungsweise stationären Arbeitspunkt abbilden zu können. Durch dieses Kriterium werden Geschwindigkeitsverläufe aussortiert, in denen nur kurz die Maximalgeschwindigkeit angefahren und dann wieder abgebremst wurde.

**Kriterium Phase BL1**

Das vierte Kriterium betrifft die Phase BL1. Der Anteil dieser Phase nach dem Durchlauf der Schweißnaht in G2 muss mindestens 3 Sekunden umfassen. Der Grund dafür liegt in der Ermittlung der Ist-Banddicke nach G1 für die Phase BL1. Erst wenn die Schweißnaht G2 durchlaufen hat, ist sichergestellt, dass die am Dickenmessgerät hinter G1 gemessene Banddicke auch zum untersuchten Bund und nicht zum Vorgängerbund gehört. Deshalb beginnt das Intervall für die Mittelwertberechnung der Banddicke für die Phase BL1 erst mit dem Schweißnahtdurchlauf in G2. Durch das oben genannte Kriterium wird somit gewährleistet, dass der Berechnung des Mittelwerts für die Banddicke ein Zeitraum von mindestens 3 Sekunden zugrunde liegt. Darüber hinaus werden spätestens durch dieses Kriterium alle Dateien aussortiert, in denen die Phase BL1 überhaupt nicht vorhanden ist.

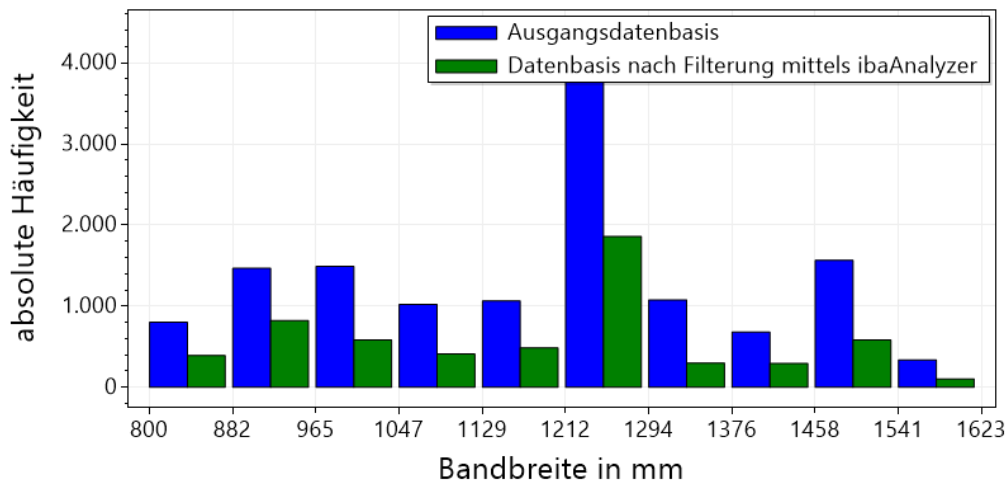
**Kriterium Phase BL2**

Das fünfte Kriterium ist die Dauer der Phase BL2. Diese muss mindestens 3 Sekunden betragen. Dadurch werden zunächst alle Dateien aussortiert, in deren Verlauf die Phase BL2 überhaupt nicht vorkommt. Außerdem befindet sich die Phase BL2, bedingt durch ihre zeitliche Position kurz vor dem Schweißnahtdurchlauf, meist an der Grenze zur Nachfolgerdatei. Dies führt teils zu abgeschnittenen BL2-Phasen, die im Extremfall nur aus einem Datenpunkt bestehen. Um derartige Verläufe ebenfalls auszusortieren, wurde die Mindestdauer von 3 Sekunden definiert.

**Kriterium Banddicke**

Das sechste und letzte Kriterium betrifft die Banddicke. Um Dateien mit Band- oder Schweißnahttrissen auszuschließen, wurden Mindestwerte für die gemessenen Banddicken vor und nach G1 gesetzt. Für die Einlaufdicke in G1 ist der Minimalwert auf 1 mm festgelegt, dies entspricht 50% der kleinsten Warmbandeinsatzdicke von 2 mm. Wenn vor G1 eine Banddicke kleiner als 1 mm gemessen wurde, liegt also entweder ein Messfehler vor oder die Soll-Banddicke wurde um mindestens 50% unterschritten, was auf einen Band- oder Schweißnahttriss schließen lässt. In beiden Fällen ist der Dickenverlauf nicht repräsentativ für den Regelbetrieb und es besteht die Möglichkeit fehlender Dickensignale, entsprechende Dateien werden daher aussortiert. Analog wurde auch für die gemessene Dicke nach dem ersten Gerüst ein Mindestwert gesetzt. Da in G1 Reduktionen von mehr als 40% möglich sind und somit auch die Solldicke nach G1 entsprechend geringer ist, wurde der Schwellwert nach G1 auf 0,5 mm, also die Hälfte des Wertes für die Einlaufdicke, festgelegt. Wird einer dieser beiden Schwellwerte im Verlauf einer Messdatei unterschritten, ist das Kriterium nicht erfüllt.

Das Ergebnis der Extraktion sind 5844 Datensätze aus dem Zeitraum August bis Oktober 2021, welche alle sechs zuvor genannten Kriterien erfüllen. Somit wurden 5844 .txt-Dateien erzeugt, die jeweils die extrahierten Daten für ein Bund enthalten und mithilfe des Tools *ME Analysis* von Mathweis Engineering zu einer .csv-Datei zusammengefügt wurden. Anhand dieser kann geprüft werden, ob die herausgefilterten Datensätze repräsentativ für die Gesamtheit der gewalzten Bunde sind. Dazu wurde die Verteilung der Bandbreiten und der Einsatzdicken in den gefilterten Daten mit der Verteilung in der Ausgangsdatenbasis verglichen. Die Verteilung der Bandbreite ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die gewalzten

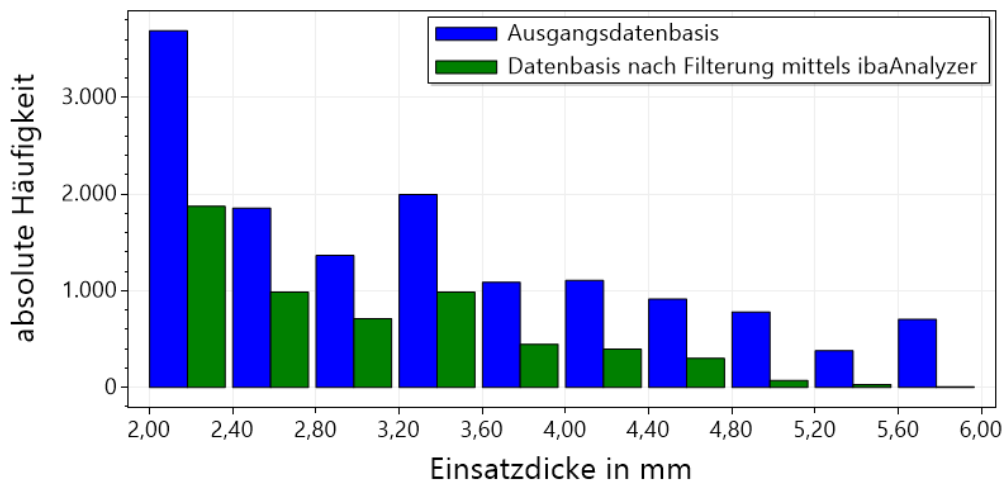


**Abbildung 4.5:** Vergleich der Bandbreitenverteilung der mittels *ibaAnalyzer* gefilterten Daten und der Ausgangsdatenbasis

Bandbreiten liegen in einem Intervall von 800 bis 1623 mm. Bandbreiten im Bereich zwischen 1212 und 1294 mm werden besonders häufig gewalzt, in der Ausgangsdatenbasis liegen etwa 30% aller gewalzten Bunde in dieser Spanne. Auch die gefilterten Daten decken die gesamte Spanne der Bandbreiten ab, weiterhin sind die Bandbreiten zwischen 1212 und 1294 mm besonders häufig. Es kann also festgehalten werden, dass die extrahierten Daten, bezogen auf die Bandbreite, repräsentativ für die Ausgangsbasis sind.

Abbildung 4.6 zeigt die Verteilung der Einsatzdicken der mittels *ibaAnalyzer* gefilterten Daten im Vergleich zur Ausgangsdatenbasis. Die Einsatzdicke ist die Dicke des Warmbands vor dem Kaltwalzen, entspricht also der Eingangsdicke im G1. Bei AMEH liegen die Einsatzdicken in einem Spektrum von 2 - 6 mm, dieses wird sowohl von den gefilterten als auch von den ungefilterten Daten komplett abgedeckt. Es fällt auf, dass die Anzahl der gewalzten Coils für beide Datensätze mit zunehmender Banddicke abnimmt. Für Einsatzdicken  $h_0 > 4,8$  mm nimmt die Anzahl der gewalzten Bunde allerdings stark ab. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei dicken Bändern die Phase BL2 häufig nicht vorkommt. Da diese jedoch trotzdem, wenn auch durch wenige Datenpunkte, vertreten sind, werden die extrahierten Daten als repräsentativ für die Ausgangsdatenbasis bewertet.





**Abbildung 4.6:** Vergleich der Einsatzdickenverteilung der mittels *ibaAnalyzer* gefilterten Daten und der Ausgangsdatenbasis

Das Ergebnis der Extraktion ist also zusammenfassend eine .csv-Datei mit 5844 Datensätzen, welche die in Tabelle 4.1 aufgeführten Merkmale enthalten und eine Teilmenge der Ausgangsdatenbasis bilden. Diese Datei wird im weiteren Verlauf der Arbeit als “iba\_extract.csv” bezeichnet.

### 4.3.2 Zusammenführung der Daten aus verschiedenen Quellen

Zusätzlich zu den mittels *ibaAnalyzer* extrahierten Daten (s. Tabelle 4.1), werden die Ausprägungen weiterer Attribute jedes Bundes benötigt, die nicht in den Informationen des iba-Systems enthalten sind. Sie müssen aus den Datenbankauszügen schedule.csv und adaption.csv gewonnen werden. Notwendige Informationen aus schedule.csv sind die Werkstoffeigenschaften (Materialklasse und Stahlmarke) des jeweiligen Bundes, die Datei adaption.csv enthält insbesondere die Durchmesser und Laufleistungen der Arbeits- und Stützwalzen für jedes gewalzte Bund. Darüber hinaus werden weitere Prozessdaten aus der Datei schedule.csv entnommen. Die aus den Datenbankauszügen entnommenen Informationen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Zur Nutzung der drei Datenquellen iba\_extract.csv, schedule.csv und adaption.csv im Kontext der Validierung des Prozessmodells müssen diese zunächst zu einer Datei zusammengefasst werden. Dazu wurde ein Algorithmus implementiert, dessen Ablauf in Abbildung 4.7 schematisch dargestellt ist. Da die Bunde, die in der Datei iba\_extract.csv durch Datensätze repräsentiert werden, eine Teilmenge der in schedule.csv und adaption.csv abgebildeten Gesamtproduktion sind, dient iba\_extract.csv als Basisdatei für die Zusammenführung der Daten. Die Datei wird zeilenweise ab der zweiten Zeile durchlaufen, da die Kopfzeile keine Daten enthält. Dabei wird jede Zeile  $i$  von iba\_extract.csv zunächst als String-Array mit der Bezeichnung “iba\_data” zwischengespeichert. Anschließend werden

Attribut	Gerüst	Ursprungsdatei
Warmbandnummer		schedule.csv, adaption.csv
Bandbreite		schedule.csv
Einsatzdicke	G1	schedule.csv
Fertigdicke	G4	schedule.csv
Materialklasse		schedule.csv
Stahlmarke		schedule.csv
mittlerer AW-Durchmesser	G1 - G4	adaption.csv
AW-Laufleistung	G1 - G4	adaption.csv
mittlerer SW-Durchmesser	G1 - G4	adaption.csv
SW-Laufleistung	G1 - G4	adaption.csv
Voreilung	G2, G3	schedule.csv

**Tabelle 4.2:** Übersicht der benötigten Informationen aus den Datenbankauszügen

die Dateien `schedule.csv` und `adaption.csv` geöffnet und nacheinander zeilenweise durchlaufen. Für jede Zeile  $j$  von `schedule.csv` und jede Zeile  $k$  von `adaption.csv` wird geprüft, ob die zugehörige Warmbandnummer  $WBNr(j)$  beziehungsweise  $WBNr(k)$  mit der in der Zeile  $i$  von `iba_extract.csv` vorliegenden Warmbandnummer  $WBNr(i)$  übereinstimmt. Solange keine Übereinstimmung gefunden ist, wird die jeweils nächste Zeile, also  $j+1$  beziehungsweise  $k+1$ , untersucht. Bei einer Übereinstimmung der Warmbandnummern wird die Zeile  $j$  als String-Array “`schedule_data`”, die Zeile  $k$  als String-Array “`adaption_data`” gespeichert. Sobald die Übereinstimmung gefunden ist und die entsprechenden Zeilen als Arrays gespeichert sind, werden alle relevanten Daten noch einmal sortiert zwischengespeichert. Alle Daten, die einem Gerüst zugeordnet werden können, werden in den Objekten “G1”, “G2”, “G3” und “G4” gespeichert. Prozessdaten, die das gesamte Bund betreffen, werden in dem dazu angelegten Objekt “PD” gespeichert. Das erneute Speichern der Daten erfüllt zum einen den Zweck einer übersichtlicheren Speicherung, zum anderen können die Daten in dieser Form leichter bearbeitet werden. Beispielhafte Bearbeitungsoperationen sind die Umrechnung des Motormoments in das vorliegende Moment im Walzspalt oder die Berechnung der spezifischen Bandzüge aus den Absolutzügen. Nachdem derartige Manipulationen der Daten abgeschlossen sind, werden alle in den Objekten gespeicherten Daten als Zeile in eine Output-Datei exportiert. Anschließend wird die Zeile  $i+1$  von `iba_extract.csv` betrachtet. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis die letzte Zeile von `iba_extract.csv` erreicht ist und somit keine Zeile  $i+1$  existiert. Die enthaltene Datei wird als “`output.csv`” bezeichnet und enthält alle Datensätze von `iba_extract.csv`, erweitert um zusätzliche Informationen aus den Dateien `schedule.csv` und

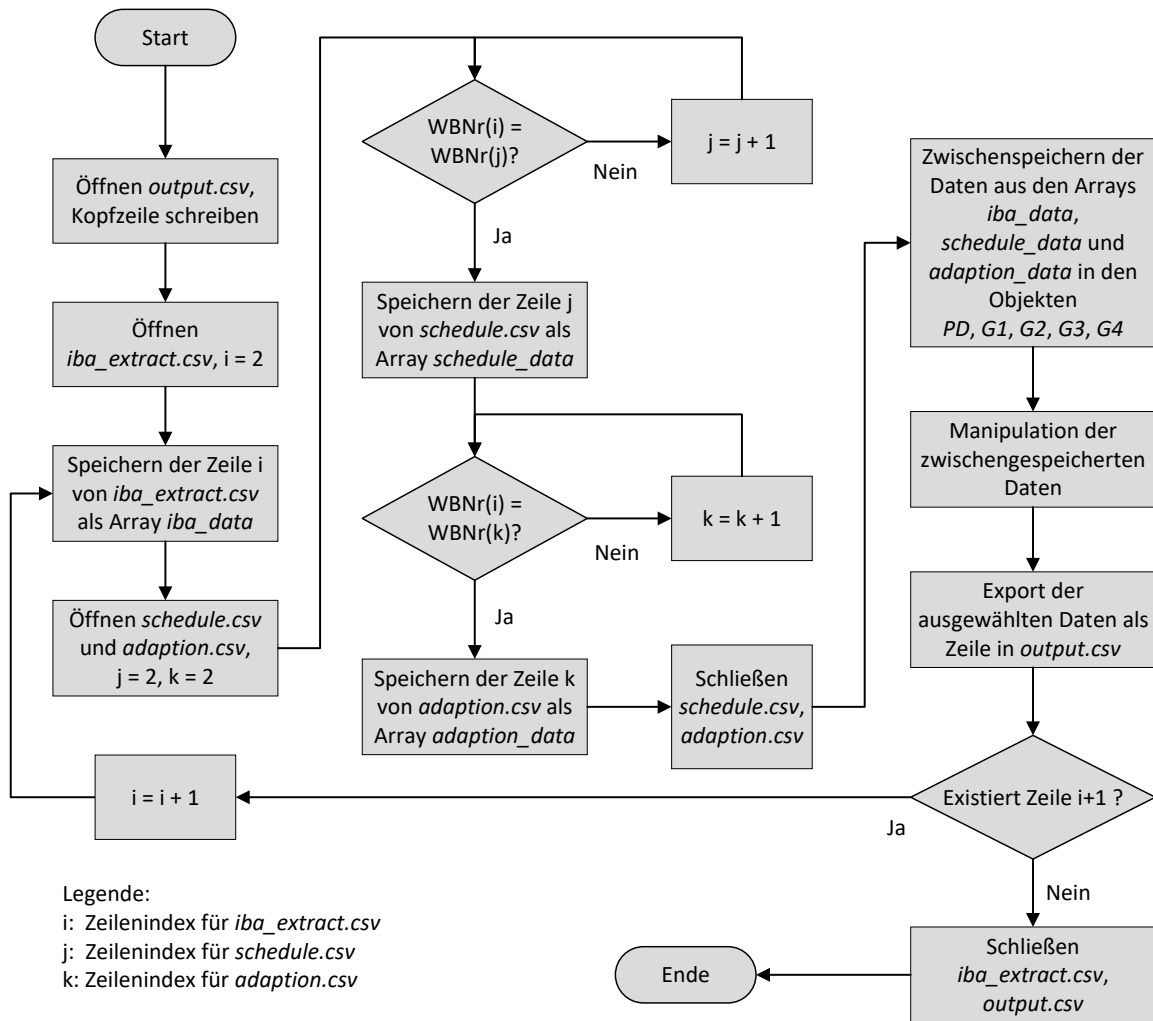


Abbildung 4.7: Schematischer Ablauf des Programms zur Zusammenführung der verschiedenen .csv-Dateien

adaption.csv. Diese Datei enthält strukturell also alle benötigten Daten zur Validierung des Prozessmodells.

Dem Autor ist bewusst, dass der beschriebene Algorithmus noch Optimierungspotenzial besitzt. Da die Zusammenführung der Datensätze allerdings nur etwa 120 Sekunden für die Produktion eines Monats benötigt, die Extraktion derselben Anzahl an Datensätzen aus dem iba-System allerdings mehrere Stunden in Anspruch nimmt, wurde eine weitere Optimierung als nicht zielführend erachtet. Darüber hinaus ist die Zusammenführung der Datensätze nicht regelmäßig, sondern nur sporadisch notwendig.

#### 4.4 Plausibilitätsprüfung der erhaltenen Referenzwerte für Walzkräfte und Walzmomente

Durch die Zusammenführung der Daten aus den verfügbaren Quellen (vgl. Kapitel 4.3.2) konnte ein Datensatz mit allen zur Validierung des Prozessmodells benötigten Informationen erstellt werden. Vor der Nutzung im Zuge der Modellvalidierung mussten die Daten

allerdings auf ihre Plausibilität überprüft werden. Dabei wurden insbesondere die Walzkraft und -momente für die in Kapitel 4.1 definierten Geschwindigkeitsphasen BH und BL2 betrachtet, da diese als Referenzwerte für die in das Modell zu integrierende Adaptionslogik (vgl. Kapitel 3.5) genutzt werden sollen. Zur Plausibilisierung werden die über den gesamten Datensatz gemittelten Durchschnittswerte der für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH in den vier Walzgerüsten gemessenen Kräfte und Momente gemeinsam betrachtet. Es wird bewertet, ob die in den jeweiligen Gerüsten und Geschwindigkeitsphasen aufgenommenen Messwerte im Verhältnis zueinander plausibel sind. Als Grundlage für diese Bewertung werden zunächst die Auswirkungen einer Erhöhung verschiedener Parameter auf die Walzkraft und das Walzmoment betrachtet. Eine Übersicht dieser Einflüsse nach Pawelski (2017) ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Erhöhung von	Änderung Walzkraft	Änderung Walzmoment
Einzelstichreduktion	++	++
Banddicke	-/+	++
AW-Durchmesser	++	+
Fließspannung	++	++
Einlaufzug	-	+
Auslaufzug	-	-
Reibwert	++	+

**Tabelle 4.3:** Einfluss der Erhöhung verschiedener Parameter auf die resultierende Walzkraft und das Walzmoment (Pawelski, 2017)

Die in der Tabelle gezeigten Gesetzmäßigkeiten werden im Folgenden kurz erläutert. Mit einer Erhöhung der Einzelstichreduktion geht ein deutlicher Anstieg der Walzkraft und -momente einher, da mehr Umformarbeit durch das Gerüst eingebracht werden muss. Eine Erhöhung der Banddicke steigert die erforderliche Umformarbeit und damit den Kraft- und Arbeitsbedarf. Für sehr kleine Banddicken führt eine weitere Verringerung allerdings je nach Walzendurchmesser und Reibung zu einem Walzkraftanstieg mit abnehmender Banddicke. Dies ist auf die überproportional zunehmende Walzenabplattung und damit eine sehr große gedrückte Länge zurückzuführen. Mit zunehmender Banddicke sinkt die Walzkraft dann zunächst, bis sie bei sehr dicken Bändern wieder zunimmt. Bei einer Erhöhung des Arbeitswalzendurchmessers vergrößert sich die gedrückte Länge und damit auch die Walzkraft. Durch den größeren Hebelarm steigt auch das Walzmoment an, allerdings weniger stark als die Kraft. Bei einer Erhöhung der Fließspannung steigt auch die erforderliche Umformarbeit, was zu einem deutlichen Anstieg von Walzkraft und Walzmoment führt. Eine Erhöhung des Ein- oder Auslaufzuges führt durch die eingebrachten Zugspannungen zu einer Absenkung der erforderlichen Walzkraft. Der Einfluss der Züge

auf das Walzmoment ist hingegen abhängig von der Wirkrichtung. Der Einlaufzug wirkt entgegen der Walzrichtung, somit wird bei einer Erhöhung der Antrieb stärker belastet und das erforderliche Walzmoment steigt. Der Auslaufzug wirkt dagegen in Walzrichtung, somit wird der Antrieb bei einer Erhöhung dieses Zuges unterstützt und das erforderliche Walzmoment sinkt. Eine Erhöhung des Reibwerts führt aufgrund der erhöhten Schubspannungen im Kontaktbereich zwischen Walze und Walzgut zu einem Anstieg von Walzkraft und Walzmoment, wobei die Kraft stärker durch die Reibung beeinflusst wird als das Moment.

Die in Tabelle 4.3 genannten Einflussfaktoren Fließspannung und Reibwert sind ihrerseits ebenfalls abhängig von verschiedenen Parametern. Die wichtigsten Abhängigkeiten wurden im Fachgespräch mit Mathweis Engineering und ArcelorMittal Eisenhüttenstadt herausgestellt und sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Erhöhung von	Änderung Fließspannung	Änderung Reibwert
Gesamtumformgrad	++/+	0
Einzelstichreduktion	+	+
Walzgeschwindigkeit	+	-
Temperatur	-	-/(+)

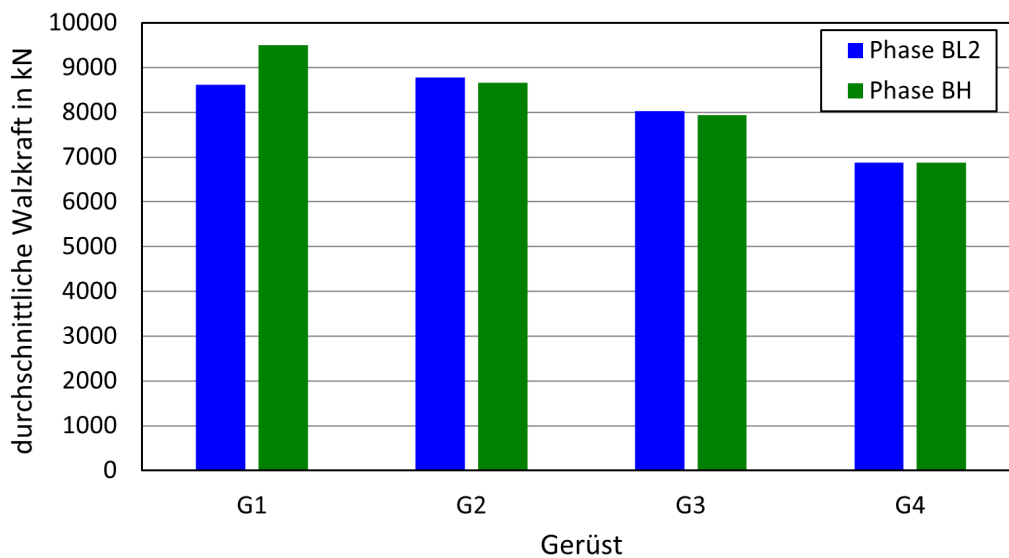
**Tabelle 4.4:** Einfluss der Erhöhung verschiedener Parameter auf die Fließspannung und den Reibwert

Die Fließspannung ist im Wesentlichen abhängig vom Gesamtumformgrad des Materials, der Umformgeschwindigkeit und der Temperatur (vgl. Kapitel 2.2.1). Bei der Erhöhung des Umformgrades steigt die Fließspannung zunächst stark an, mit fortschreitender Umformung flacht die Fließkurve allerdings ab. Weiterhin steigt die Fließspannung bei zunehmender Umformgeschwindigkeit an. Die Umformgeschwindigkeit steigt bei größeren Einzelstichreduktionen und/oder Walzgeschwindigkeiten an, sodass Erhöhungen dieser Einflussgrößen jeweils auch einen Anstieg der Fließspannung bewirken. Eine Erhöhung der Temperatur bewirkt hingegen Entfestigungsvorgänge, welche die Fließspannung absenken. Der Reibwert hängt, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, von einer Vielzahl von Faktoren ab. Da die Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner sich zwischen den Phasen BL2 und BH nicht ändert, wird die Reibung vorwiegend durch die Einzelstichreduktion, die Walzgeschwindigkeit und die Temperatur beeinflusst. Eine Erhöhung der Einzelstichreduktion führt zu einem Anstieg des Walzwinkels und damit zu einem verstärkten Abquetschen des Ölfilms. Des weiteren wird der eingezogene Ölfilm auf eine größere gedrückte Länge gestreckt, wodurch die Filmstärke verringert wird. Diese Effekte führen zu einem Anstieg des Reibwerts. Eine Erhöhung der Walzgeschwindigkeit hingegen führt aufgrund von hydrodynamischen Effekten zu einer Verringerung der Reibung. Die Temperatur im Walzspalt beeinflusst die Viskosität des Schmierstoffs und damit den Reibwert. Eine Überschreitung

der in Kapitel 2.2 beschriebenen Grenztemperatur kann zum Versagen des Ölfilms führen. Um die volle Wirksamkeit von Schmierstoffzusätzen (Additiven) zu gewährleisten, ist ein schmiermittelspezifisches optimales Temperaturfenster anzustreben. Ein Einfluss des Gesamtumformgrades auf den Reibwert ist nicht bekannt.

#### 4.4.1 Betrachtung der Walzkräfte

Die Walzkräfte wurden als Mittelwerte über die jeweiligen Phasen aus dem iba-System extrahiert. Die durchschnittlich in den vier Gerüsten gemessenen Walzkräfte sind in Abbildung 4.8 für die Phasen BL2 und BH dargestellt.



**Abbildung 4.8:** Durchschnittswerte der gemessenen und extrahierten Walzkräfte für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH

Insgesamt ist im Vergleich der Gerüste ein Abfall der Kräfte von G1 nach G4 zu erkennen. Dieser kann durch die in der Stichplanberechnung genutzte normierte Reduktionsverteilung erklärt werden, wobei die absolute Dickenabnahme in G1 am größten und in G4 am geringsten ist. Der Vergleich der Kraft für die Phasen BL2 und BH muss für jedes Gerüst einzeln getroffen werden. In G1 ist die Walzkraft in der Phase BH deutlich größer als in der Phase BL2. Dies kann durch den Einfluss der Umformgeschwindigkeit begründet werden. Aufgrund der großen Dickenabnahme in G1 stellt sich trotz der vergleichsweise niedrigen Walzgeschwindigkeit eine hohe Umformgeschwindigkeit und damit ein Anstieg der Fließspannung ein, der letztendlich zu einem Anstieg der Walzkraft führt. Dieser kann aufgrund der niedrigen Walzgeschwindigkeit und der großen Einzelstichreduktion (vgl. Tabelle 4.4) nicht durch einen gleichwertigen Abfall des Reibwerts ausgeglichen werden, sodass sich für G1 das in Abbildung 4.8 gezeigte Verhalten einstellt. In den Gerüsten G2 und G3 steigt die Fließspannung aufgrund des wachsenden Umformgrades weiter an. Demgegenüber steht ein Abfall der Reibung durch die steigende Walzgeschwindigkeit in

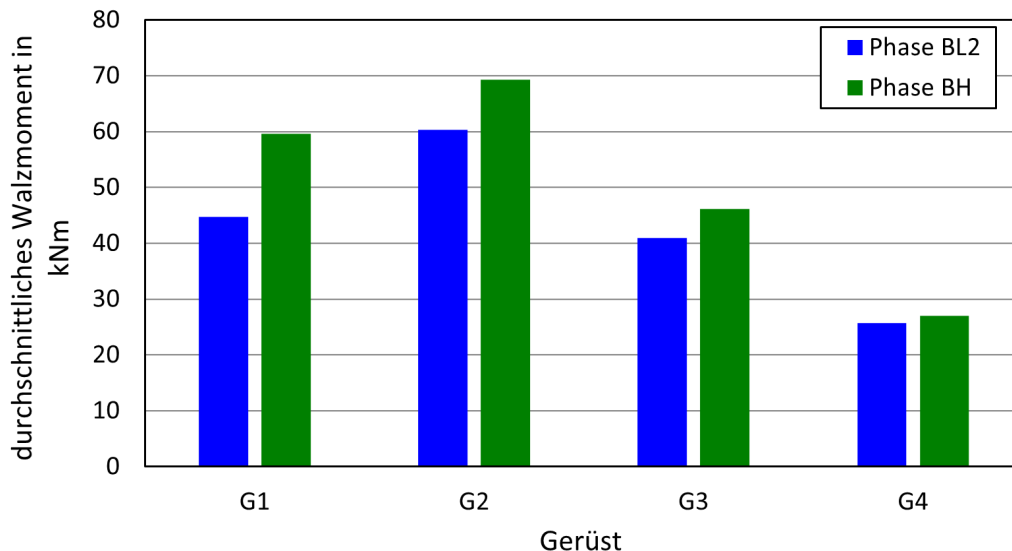
Verbindung mit kleineren Einzelstichreduktionen. Im Vergleich der Phasen BH und BL2 wird der Einfluss der Materialverfestigung aufgrund der höheren Walzgeschwindigkeit in der Phase BH durch einen Abfall der Reibung aus demselben Grund kompensiert, sodass die mittleren Kräfte für die Phase BH jeweils etwas kleiner sind als für die Phase BL2. Die Walzkraft in G4 wird während des gesamten Walzvorgangs zur einheitlichen Übertragung der Walzenrauigkeit auf die gesamte Bandlänge konstant gehalten, etwaige Abweichungen der Dicke nach G4 vom Sollwert müssen durch die Vorgängergerüste, vor allem G3, ausgeglichen werden (vgl. Kapitel 3.3.3). Somit lassen sich die nahezu identischen Mittelwerte der Walzkräfte in G4 für die Phasen BL2 und BH erklären. Zusammenfassend können die in Abbildung 4.8 gezeigten mittleren Walzkräfte durch bekannte Phänomene erklärt und somit als plausibel bewertet werden.

#### 4.4.2 Betrachtung der Walzmomente

Das Walzmoment  $M_W$  liegt nicht als Messsignal vor und muss daher aus dem aufgenommenen Motormoment  $M_M$  und der Getriebeübersetzung  $i_G$  berechnet werden. Es gilt

$$M_W = \frac{M_M}{i_G}. \quad (4.8)$$

Die Mittelwerte der so berechneten Walzmomente für die Phasen BL2 und BH wurden ebenfalls extrahiert und sind in Abbildung 4.9 dargestellt.



**Abbildung 4.9:** Durchschnittswerte der berechneten Walzmomente für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH. Die Walzmomente wurden ohne Berücksichtigung von Verlusten gemäß Gleichung 4.8 aus den gemessenen Motormomenten berechnet

Sie wurden im Fachgespräch mit Mathweis Engineering und ArcelorMittal Eisenhüttenstadt diskutiert und auf Plausibilität geprüft. Die Verteilung der Momente bezogen auf die ein-

zelen Gerüste ist plausibel. Ähnlich wie bei den Walzkraften nimmt das Moment von G1 nach G4 tendenziell ab, was auf die geringere Dickenabnahme in den hinteren Gerüsten zurückzuführen ist. Die Momente in G1 sind dabei aufgrund der Zugdifferenz zwischen dem durch das Zugrollengerüst eingebrachten Einlaufzug  $T_E$  und dem Zwischengerüstzug  $T_{1,2}$  kleiner als in G2. Da der deutlich stärkere Zwischengerüstzug  $T_{1,2}$  in Walzrichtung wirkt, wird der Antrieb unterstützt und das in G1 benötigte Walzmoment sinkt (vgl. Tabelle 4.3). In den Gerüsten G2 bis G4 ist der Rückzug jeweils höher als der Vorzug, sodass das erforderliche Walzmoment durch den Zug angehoben wird. Bezogen auf die Geschwindigkeitsphasen sind die Momente in der Phase BH in allen Gerüsten teils deutlich höher als die Momente der Phase BL2. Dies lässt sich mithilfe von Tabelle 4.3 allerdings nicht zufriedenstellend erklären.

Bei der Berechnung der Referenzwerte für das Walzmoment nach Gleichung (4.8) fällt auf, dass keine Verluste zwischen Motor und Walzspalt berücksichtigt werden. Bei einer früheren Untersuchung der Anlage von ArcelorMittal Eisenhüttenstadt wurden allerdings Momentenverluste in Abhängigkeit von Gerüst, Walzgeschwindigkeit und Walzkraft festgestellt. Die Verluste wurden in die Berechnung des Walzmoments aufgenommen, sodass sich die Gleichung

$$M_W = \frac{M_M}{i_G} - M_V(\text{Gerüst}, v, F_W) \quad (4.9)$$

ergibt. Abbildung 4.10 zeigt die ermittelten Verlustmomente in Abhängigkeit von Gerüst und Geschwindigkeit. Diese sind auch im aktuell an der Anlage genutzten Prozessmodell hinterlegt und werden dort zur Berechnung der Walzmomente genutzt. Die Verlustmomente wurden jeweils für die Walzkraftwerte 5 und 15 MN ermittelt, für andere Walzkraften können sie auf Basis dieser Stützpunkte inter- oder extrapoliert werden.

Die Momentenverluste liegen im Bereich zwischen 0 und 25 kNm, wobei für alle Gerüste und Walzkraften eine starke Geschwindigkeitsabhängigkeit festgestellt werden kann. Weiterhin ist mit Ausnahme von G3 der Momentenverlust in allen Gerüsten bei hoher Walzkraft größer als bei niedriger Walzkraft. Die Berücksichtigung der Verlustmomente wurde in den Algorithmus zur Datenaufbereitung (vgl. Kapitel 4.3.2, Abbildung 4.7) eingefügt, die so bereinigten Mittelwerte der Walzmomente sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

Durch die Berücksichtigung der Verlustmomente sind die durchschnittlichen Werte für das berechnete Walzmoment insgesamt gesunken. Die Verteilung der in Abbildung 4.11 gezeigten Momente auf die einzelnen Gerüste hat sich qualitativ nicht signifikant geändert und kann, wie bereits anhand von Abbildung 4.9 erläutert, durch den Einfluss der Bandzüge erklärt werden. Im Verhältnis der für die Phasen BL2 und BH berechneten Momente zueinander sind jedoch beträchtliche Veränderungen erkennbar. In G1 und G2 ist das durchschnittlich berechnete Walzmoment für die Phase BH zwar weiterhin höher als für die Phase BL2, allerdings ist die Differenz zwischen den Phasen deutlich geringer. In G3



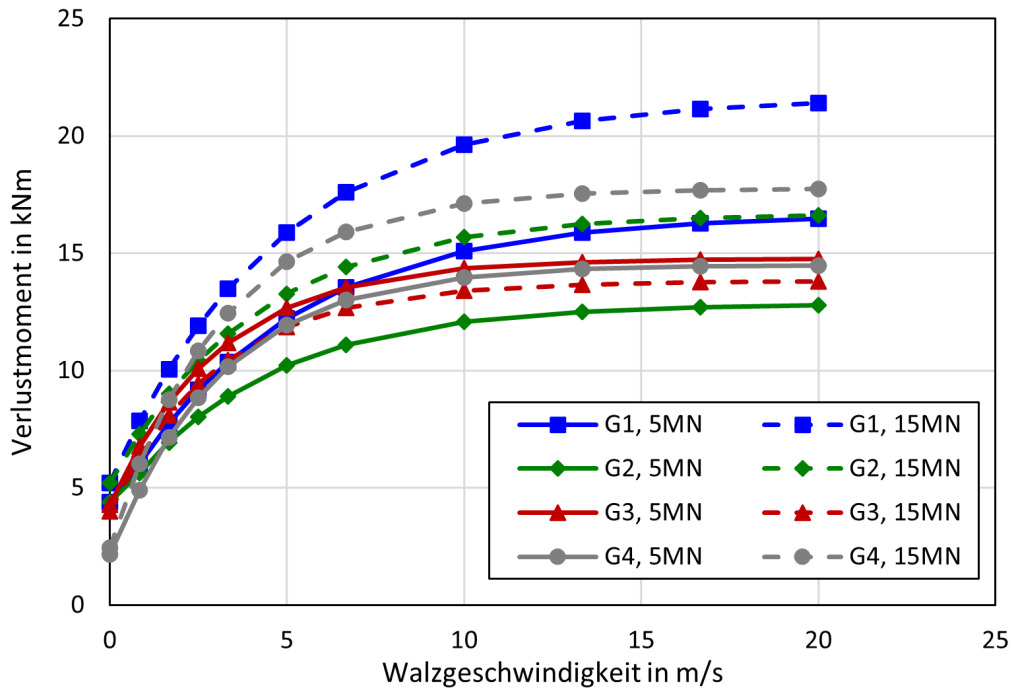


Abbildung 4.10: An der Anlage in zurückliegenden Versuchen bestimmte Verlustmomente zwischen Antrieb und Walzspalt in Abhängigkeit von Gerüst, Walzgeschwindigkeit und Walzkraft

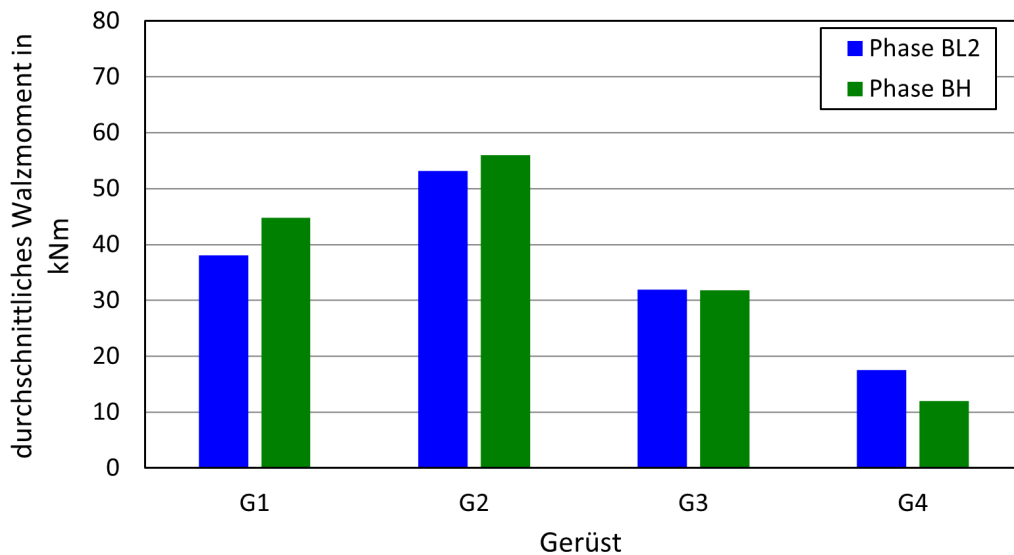


Abbildung 4.11: Durchschnittswerte der berechneten Walzmomente für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH. Die Walzmomente wurden unter Berücksichtigung der in Abbildung 4.10 aufgeführten Verlustmomente gemäß Gleichung 4.9 aus den Motormomenten berechnet.

sind die Mittelwerte der Walzmomente nun für beide Phasen nahezu gleich groß, während sie in G4 durch den Einfluss der Verluste sogar für die Phase BH kleiner sind als für die Phase BL2. In G1 lässt sich die Abweichung zwischen den Walzmomenten ähnlich

begründen wie die Abweichung der Walzkkräfte. Aufgrund der höheren Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$  ist die Fließspannung in der Phase BH höher als in der Phase BL. Der Reibwert sinkt zwar durch die steigende Walzgeschwindigkeit in der Phase BH, aufgrund der hohen Dickenabnahme in Verbindung mit den vergleichsweise geringen Walzgeschwindigkeiten in G1 dominiert allerdings der  $\dot{\varphi}$ -Einfluss auf die Fließspannung und das Walzmoment steigt im BH-Bereich an. In G2 und G3 wird der Einfluss der sinkenden Reibwerts in der BH-Phase größer, sodass dem  $\dot{\varphi}$ -Effekt der Fließspannung stärker entgegengewirkt wird und sich die Momente der BH und BL-Phase angleichen. In G4 ist das Walzmoment in der Phase BH deutlich geringer als in der Phase BL2, was anhand der Walzkraftregelung erklärt werden kann. Da das Gerüst 4 an der untersuchten Anlage mit geringer Ölkonzentration und hohen Arbeitswalzenrauigkeiten betrieben wird, ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes erfahrungsgemäß eher gering. Somit dominiert die Erhöhung der Fließgrenze aufgrund der Umformgeschwindigkeit in der Phase BH. Dies führt aufgrund der Walzkraftregelung zu einer geringeren Dickenabnahme in G4 und die geleistete Umformarbeit sinkt bei konstanter Walzkraft. Um die Fertigdicke auf den Sollwert zu regeln, wird die Reduktion in G3 angepasst, sodass hinter G4 bei konstanter Walzkraft die Solldicke erreicht wird. Die Gerüste 1 und 2 können dabei kaskadiert zur Entlastung von Gerüst 3 hinzugenommen werden. Durch die Verringerung der Umformarbeit sinkt das Walzmoment in G4, dieser Effekt wird durch das geschwindigkeitsabhängige Absenken des Zwischengerüstzuges  $T_{3,4}$  noch verstärkt. Somit ergibt sich die in Abbildung 4.11 dargestellte Differenz zwischen den Phasen BL2 und BH (vgl. Kapitel 6.3).

Die in den Abbildungen 4.8 und 4.11 gezeigten Verhältnisse der gemessenen Walzkkräfte und der auf Basis von Messwerten berechneten Walzmomente zueinander lassen sich durch die in den Tabellen 4.3 und 4.4 gezeigten Einflüsse verschiedener Parameter auf Fließspannung, Reibwert, Walzkraft und Walzmoment erklären. Daher werden die Zahlenwerte als plausibel eingestuft und zur in Kapitel 6 beschriebenen Validierung und Bewertung des Prozessmodells genutzt.

## 5 Erweiterung des Prozessmodells von Mathweis Engineering und allpccloud

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit am Prozessmodell von Mathweis Engineering und allpccloud vorgenommenen Erweiterungen vorgestellt. Diese lassen sich in zwei Schwerpunkte gliedern. Zunächst wird das Anlegen einer Schnittstelle zum Einlesen einer Datei mit mehreren Datensätzen beschrieben, wobei die Stichplanberechnung anschließend automatisch für einen ausgewählten Bereich der eingelesenen Datei durchgeführt wird. Im zweiten Teil des Kapitels wird die Integration der Adaptionlogik von Mathweis Engineering in das Prozessmodell behandelt. Dabei werden zunächst notwendige Änderungen an der ursprünglichen Adaptionlogik (vgl. Kapitel 3.5) und anschließend die Einbindung der modifizierten Logik in das Stichplanmodell beschrieben.

### 5.1 Umsetzung einer Schnittstelle zum automatisierten Einlesen von Datensätzen

Der erste Schritt zur automatisierten Adaption des Prozessmodells ist die Automatisierung der Stichplanberechnung für mehrere Datensätze. Dazu wurde das Schlüsselwort “ReadPassDataFromCsv” eingeführt, mit dessen Hilfe eine Zeile aus einer .csv-Datei eingelesen werden kann. Die Idee besteht darin, die im Verlauf der Line-Datei fest vorgegebenen Eingangswerte mithilfe des neu angelegten Befehls für jede Zeile der eingelesenen .csv-Datei zu überschreiben. Dazu werden in der Line-Datei statt definierter Zahlenwerte für die Eingangsgrößen die Nummern der Spalten übergeben, in denen die jeweiligen Parameter für jedes Bund gespeichert sind. Alle Parameter, die in der Grundform des Befehls “ReadPassDataFromCsv” mit diesem zusammen übergeben werden müssen, sind im Folgenden aufgeführt.

- Dateiname der .csv-Datei mit den bundweise gespeicherten Input-Daten (nach Schema in Kapitel 4.3.2 erzeugt)
- Nummer der einzulesenden Zeile
- Gerüstanzahl der Walzanlage
- Spaltennummer des Primärschlüssels der Datensätze, mit dem jedes Bund eindeutig identifiziert werden kann (hier: Warmbandnummer)
- Spaltennummer der Bandbreite
- Spaltennummern der Ein- und Ausgangsdicke für jedes Gerüst
- Spaltennummern des Vor- und Rückzugs für jedes Gerüst

- Spaltennummer der Bandgeschwindigkeit vor dem ersten Stich
- Spaltennummern der Materialklasse und Stahlmarke
- Spaltennummern der Arbeitswalzendurchmesser.

Beim Einlesen der Daten wird die Ausführung des Prozessmodells als State Machine genutzt, sodass festgelegte Parameter in der Line-Datei durch spätere Änderungen überschrieben werden können. Wenn der neu definierte Befehl also direkt vor dem die Stichplanberechnung startenden Befehl “ComputePassSteadyState” eingefügt wird, kann das Modell durch die Angabe der aktuellen Zeile und der Spaltennummern der einzelnen Parameter alle Eingangsgrößen aus der angegebenen .csv-Datei extrahieren und zur Stichplanberechnung nutzen. Die bis zu diesem Punkt erfolgten Änderungen ermöglichen allerdings lediglich das Überschreiben der Daten und die Stichplanberechnung für eine Zeile der zugrundeliegenden .csv-Datei. Zur Berechnung einer Folge von Stichplänen muss zusätzlich eine Schleife um die Befehle “ReadPassDataFromCsv” und “ComputePassSteadyState” in die Struktur der Line-Datei eingefügt werden. Als Basis für diese Schleife konnte ein von allpccloud bereits entwickeltes Grundgerüst genutzt werden. Dieses besteht aus den Befehlen “StartLoop” und “EndLoop”, zwischen denen alle mehrmals auszuführenden Befehle angeordnet werden müssen. Zusätzlich zum Schlüsselwort “EndLoop” muss außerdem die gewünschte Anzahl der Schleifendurchläufe übergeben werden. Zur Verknüpfung der Schleife mit der Extraktion der Datensätze aus der .csv-Datei wird der Zähler  $j$  der Schleifendurchläufe an das Objekt zum Einlesen der Datensätze übergeben und auf die in der Line-Datei angegebene Zeilennummer  $i$  addiert. Werden also ausgehend von der Zeile  $i = 3$  die Stichpläne für zehn aufeinanderfolgende Bunde gerechnet ( $0 \leq j < 10, j \in \mathbb{Z}$ ), ergibt sich durch die Addition  $i + j$  die jeweils aktuelle Zeile. Es werden also die Stichpläne für die Zeilen 3 bis 12 berechnet. Weiterhin können die Ergebnisse der Berechnung mithilfe des Befehls “WriteResultsToCsv” in eine .csv-Datei exportiert werden. Dort wird, basierend auf der jeweils letzten Rechnung, für jedes Gerüst eine Zeile mit Ergebnisdaten erzeugt, sodass auch dieser Befehl innerhalb der Schleife angelegt werden muss.

#### StartLoop

```
ReadPassDataFromCsv input_data.csv 3 4 1 8 30 34 36 37 38 (...)
```

```
ComputePassSteadyState
```

```
WriteResultsToCsv results_data.csv
```

```
EndLoop 10
```

**Abbildung 5.1:** Benötigte Zeilen der Line-Datei zur Berechnung des Walzvorgangs für die Datensätze aus den Zeilen 3 bis 12 der Datei “input\_data.csv”. Die Berechnungsergebnisse werden in der Datei “results\_data.csv” gespeichert.

Zusammenfassend wird der Befehl “ComputePassSteadyState” aus dem ursprünglichen

Aufbau der Line-Datei (vgl. Abbildung 3.5 e)) durch die in Abbildung 5.1 dargestellte Zeilenfolge ersetzt.

## 5.2 Integration der Adaption in das Prozessmodell

Der zweite Schritt zur automatisierten Adaption des Prozessmodells ist die Integration der Adaptionslogik. Die dazu notwendigen Änderungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 5.2.1 Anpassungen an der Adaptionslogik im Zuge der Automatisierung

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, ist die ursprüngliche Form der Adaptionslogik eher als Leitfaden für Anwender mit Expertenwissen und Erfahrung im Bereich des Kaltwalzens geeignet. Dies drückt sich unter anderem darin aus, dass teils mehrere Konstellationen der Abweichungen von Kräften und Momenten zu einem Fall zusammengefasst werden. Daher werden im ersten Schritt alle möglichen Fälle, die einem der drei in Abbildung 3.6 gezeigten Blöcke entsprechen, explizit einzeln aufgeführt. Die erweiterte Adaptionslogik ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Neben der expliziten Darstellung aller Fälle der drei Blöcke wurde die Adaption außerdem zweistufig ausgeführt. Wie bereits in Kapitel 3.5 anhand von Fall 3 aus Abbildung 3.6 (Fall 4 in Abbildung 5.2) erklärt wurde, hat eine Manipulation von  $k_f$  oder  $\mu$  mit dem Ziel der Änderung des Walzmoments oder der Walzkraft immer auch eine Änderung der jeweils anderen Größe zur Folge. Bezogen auf den oben genannten Fall liegen die Walzmomente im Bereich der gemessenen Werte, die berechneten Walzkräfte sind allerdings zu groß. Zur Absenkung der Walzkraft wird also in der ersten Stufe (Spalte 1a, 1b)  $\mu$  abgesenkt. Die Absenkung von  $\mu$  sorgt allerdings ebenfalls für eine, wenn auch weniger starke, Verringerung des Walzmoments (vgl. Tabelle 4.3). Da die berechneten Walzmomente jedoch bereits im Bereich der Messwerte liegen, wird der Verringerung der Momente in der zweiten Stufe (Spalte 2a, 2b) durch eine Erhöhung von  $k_f$  entgegengewirkt. Diese zweistufige Adaption wurde für alle Fälle der erweiterten Adaptionslogik eingeführt, wobei die in Stufe 1 getätigten Anpassungen auf die Konstellation der Abweichungen von Walzkraft und Walzmoment reagieren. Die Anpassungen aus Stufe 2 dienen dagegen der Verhinderung von neuen Abweichungen, die aufgrund der Anpassungen aus Stufe 1 zu erwarten sind.

Ein Beispiel für die zweistufige Anpassung bei geschwindigkeitsabhängiger Abweichungstendenz der Walzkraft ist Fall 12 aus Abbildung 5.2. Die berechneten Momente sind für beide Geschwindigkeitsphasen größer als die Ist-Werte, die Abweichungstendenz der Walzkräfte ist allerdings für den High-Speed- und Low-Speed-Bereich unterschiedlich. Im Low-Speed-Bereich ist die berechnete Walzkraft in Vergleich zum Ist-Wert zu groß, im High-Speed-Bereich ist sie zu klein. Da die Modell-Walzmomente in beiden Geschwindigkeitsphasen zu groß sind, wird in der ersten Stufe die Eingangsgröße  $k_f$  für beide Phasen

	Constellation of Deviations (Actual - Set)				Iterations as long as Constellation true, Adaptation Steps				
	Torque		Force		1a	1b	2a	2b	
	Low Speed	High Speed	Low Speed	High Speed	kf	$\mu$	kf	$\mu$	
1	+	+	+	+	-				No Speed Dependence of Deviation Tendency
2	+	+	=	=	-			+	
3	+	+	-	-	-	+		+	
4	=	=	+	+		-	+		
5	=	=	-	-		+	-		
6	-	-	+	+	+	-		-	
7	-	-	=	=	+			-	
8	-	-	-	-	+				
9	=	=	+	-		LS- HS+			Speed Dependence of Force Deviation Tendency
10	=	=	+	=		LS-			
11	=	=	=	+		HS-			
12	+	+	+	-	-	HS+		HS+	
13	+	+	+	=	-			HS+	
14	+	+	=	+	-			LS+	
15	-	-	+	-	+	LS-		LS-	
16	-	-	+	=	+	LS-		LS- HS-	
17	-	-	=	+	+	HS-		LS- HS-	
18	=	=	-	+		LS+ HS-			
19	=	=	-	=		LS+			
20	=	=	=	-		HS+			
21	+	+	-	+	-	LS+		LS+	
22	+	+	-	=	-	LS+		LS+ HS+	
23	+	+	=	-	-	HS+		LS+ HS+	
24	-	-	-	+	+	HS-		HS-	
25	-	-	-	=	+			HS-	
26	-	-	=	-	+			LS-	
27	+	-	=	=	LS- HS+			LS+ HS-	Speed Dependence of Torque Deviation Tendency
28	+	=	=	=	LS-			LS+	
29	=	+	=	=	HS-			HS+	
30	+	-	+	+	HS+	-	HS+		
31	+	=	+	+		-	HS+		
32	=	+	+	+		-	LS+		
33	+	-	-	-	LS-	+	LS-		
34	+	=	-	-	LS-	+	LS- HS-		
35	=	+	-	-	HS-	+	LS- HS-		
36	-	+	=	=	LS+ HS-			LS- HS+	
37	-	=	=	=	LS+			LS-	
38	=	-	=	=	HS+			HS-	
39	-	+	+	+	LS+	-	LS+		
40	-	=	+	+	LS+	-	LS+ HS+		
41	=	-	+	+	HS+	-	LS+ HS+		
42	-	+	-	-	LS+	+	HS-		
43	-	=	-	-		+	HS-		
44	=	-	-	-		+	LS-		

Abbildung 5.2: Zur Integration in das Prozessmodell erweiterte Adaptionlogik

abgesenkt (Spalte 1a). Die berechnete Walzkraft muss im Low-Speed-Bereich verringert werden, was ebenfalls durch die Absenkung von  $k_f$  (Spalte 1a) erledigt wird. Im High-

Speed-Bereich muss die Walzkraft jedoch erhöht werden. Dazu wird der Reibwert  $\mu$  für hohe Geschwindigkeiten erhöht (Spalte 1b). Die für beide Geschwindigkeitsphasen durchgeführte Absenkung von  $k_f$  (Spalte 1a) verringert allerdings auch die Walzkraft für den High-Speed-Bereich und wirkt damit der Absenkung von  $\mu$  (Spalte 1b) entgegen, sodass in der zweiten Adaptionstufe als Reaktion auf die Absenkung der Fließspannung der Reibwert für die High-Speed-Phase erneut erhöht wird (Spalte 2b). Die in Abbildung 5.2 zusammengefassten Aktionen für alle 44 aufgeführten Fälle wurden analog nach dieser Vorhergehensweise erarbeitet.

Die zweistufige Adaption erhöht zwar die Komplexität der Logik, durch das präventive Ausgleichen von zu erwartenden Fehlern konnte allerdings in stichprobenartig durchgeführten Adaptionrechnungen die Anzahl der benötigten Iterationen verringert werden. Da in jeder Iteration der gesamte Stichplan für die High-Speed- und die Low-Speed-Phase berechnet werden muss, geht eine Verringerung der benötigten Iterationen mit einer Verringerung der Rechendauer des Adaptionalgorithmus einher.

### 5.2.2 Einbindung der Adaption im Prozessmodell

Im Zuge der Implementierung der Adaption musste zunächst die Berechnung der Vorgänge im Walzspalt für die High-Speed- und Low-Speed-Phase umgesetzt werden. Dazu wurde der Befehl “ComputeAndAdapt” eingeführt, der die Berechnung der Stichpläne für zwei verschiedene Parametersätze startet. Im Kontext dieser Arbeit werden als Eingangsgrößen die für die Phasen BL2 und BH extrahierten Walzparameter genutzt. Zum Einlesen der Parameter für beide Geschwindigkeitsphasen musste außerdem die Funktionalität des Befehls “ReadPassDataFromCsv” (vgl. Kapitel 5.1) erweitert werden, da sich ein Teil der benötigten Eingangsgrößen in den Phasen BH und BL2 unterscheidet. Diese sind die Banddicken- und Bandzugverteilung sowie die Einlaufgeschwindigkeit des Bandes. Die unterschiedlichen Zahlenwerte für die Phasen BH und BL2 sind in verschiedenen Spalten der zugrundeliegenden .csv-Datei gespeichert, sodass die Spaltennummern jeweils zweimal übergeben werden. Andere Parameter, wie die Warmbandnummer eines Bundes oder die Arbeitswalzendurchmesser, sind in beiden Phasen gleich und die entsprechenden Spaltennummern werden daher nur einmal eingelesen. Für die Adaption werden außerdem die in Kapitel 4 extrahierten Ist-Werte für Walzkraft und Walzmoment in allen Gerüsten als Referenzwerte benötigt. Somit müssen außerdem die Nummern der Spalten, in denen die Referenzwerte für die Phasen BL2 und BH gespeichert sind, übergeben werden. Die in Kapitel 5.1 gezeigte Aufzählung der Übergabeparameter des Befehls “ReadPassDataFromCsv” wird zu folgender Liste erweitert:

- Dateiname der .csv-Datei mit den bundweise gespeicherten Input-Daten
- Nummer der einzulesenden Zeile

- Gerüstanzahl der Walzanlage
- Spaltennummer der Warmbandnummer
- Spaltennummer der Bandbreite
- Spaltennummern der Ein- und Ausgangsdicke für jedes Gerüst, Phase BL2
- Spaltennummern der Ein- und Ausgangsdicke für jedes Gerüst, Phase BH
- Spaltennummern des Vor- und Rückzugs für jedes Gerüst, Phase BL2
- Spaltennummern des Vor- und Rückzugs für jedes Gerüst, Phase BH
- Spaltennummer der Bandgeschwindigkeit vor dem ersten Stich, Phase BL2
- Spaltennummer der Bandgeschwindigkeit vor dem ersten Stich, Phase BH
- Spaltennummern der Materialklasse und Stahlmarke
- Spaltennummern der Arbeitswalzendurchmesser
- Spaltennummern der Walzkraft-Referenzwerte in jedem Gerüst, Phase BL2
- Spaltennummern der Walzkraft-Referenzwerte in jedem Gerüst, Phase BH
- Spaltennummern der Walzmoment-Referenzwerte in jedem Gerüst, Phase BL2
- Spaltennummern der Walzmoment-Referenzwerte in jedem Gerüst, Phase BH

Das Schlüsselwort “ComputeAndAdapt” benötigt als Übergabeparameter lediglich die maximale Anzahl  $n \in \mathbb{N}$  der Adaptionsschritte. Für  $n = 1$  werden die Stichpläne für zwei Parametersätze genau einmal ohne Durchlauf der Adaptionslogik berechnet. Für  $n > 1$  wird die Adaption so lange durchgeführt, bis entweder alle Walzkraft- und Momentenwerte hinreichend genau mit den Referenzwerten übereinstimmen oder die Anzahl der Adaptionsschritte den Grenzwert  $n$  erreicht. In beiden Fällen wird die Adaption abgebrochen und die zuletzt berechneten Zahlenwerte für Walzkraft und Walzmoment sowie die adaptierten Werte für Fließspannung und Reibwert gespeichert.

Die Konstellation “=” aus der Adaptionslogik, also eine Übereinstimmung von berechnetem und Ist-Wert, ist im Modell erfüllt, wenn die Abweichung des berechneten Wertes vom Referenzwert weniger als 10% beträgt. Dieser Wert wurde in Absprache mit Mathweis Engineering festgelegt, da eine Abweichung der berechneten Walzkraft- und -momente von 10% in der industriellen Praxis als akzeptabel gilt.

Die Adaption des Reibwerts  $\mu$  wird nach unten durch ein Rutschkriterium begrenzt. Für sehr kleine Reibwerte ist die Reibung nicht stark genug für den Walzprozess und die Walzen beginnen zu rutschen. Da die Grenze, bei der die Walzen beginnen zu rutschen,



allerdings von einer Vielzahl von Parametern abhängt, kann kein allgemeingültiger Mindestwert für den Reibwert definiert werden. Modellseitig führt das Rutschen dazu, dass kein Schnittpunkt der einlauf- und auslaufseitigen Druckverteilungen (vgl. Kapitel 2.8) und damit keine Fließscheidenposition innerhalb des Walzspalts berechnet werden kann. Bei Auftritt dieses Effekts in einer Geschwindigkeitsphase wird daher der Reibwert auf den vorangegangenen Iterationsschritt zurückgesetzt und in allen folgenden Schritten konstant gehalten. Als Variable verbleibt die Fließspannung. Diese wird für die betreffende Geschwindigkeitsphase so angepasst, dass die berechnete Walzkraft an den Referenzwert angeglichen wird. Das Walzmoment wird in diesem Fall nicht berücksichtigt, da eine genaue Vorhersage der Walzkraft in der Praxis höhere Wichtigkeit hat.

Beim Auftreten von Abweichungskonstellationen der Walzkraft und Walzmomente, die von der Fallunterscheidung aus Abbildung 5.2 nicht abgedeckt werden und für die somit keine Adaptionen festgelegt sind, werden die Walzkraft ebenfalls mithilfe der Adaption von  $k_f$  an den Referenzwert angepasst. Die Manipulation wird so lange durchgeführt, bis sich entweder ein definierter Fall einstellt und die entsprechende Adaptionenregel gültig wird oder die maximale Anzahl  $n$  der Iterationsschritte erreicht ist.

### 5.2.3 Funktionsweise der automatisierten Adaption von Fließspannung und Reibwert

Während der Adaption werden die in der .line-Datei hinterlegten Fließ- und Reibwertkurven mithilfe von Offsetwerten manipuliert. Da die Adaption von  $k_f$  und  $\mu$  für jeden Walzspalt unabhängig abläuft, sind die in jedem Adaptionsschritt  $i$  ermittelten Offsetwerte  $\Delta k_f(i)$  und  $\Delta \mu(i)$  im Allgemeinen von Gerüst zu Gerüst unterschiedlich. Fließspannung und Reibwert werden, je nach Konstellation der Abweichungen von Kräften und Momenten, darüber hinaus für die verschiedenen Geschwindigkeitsphasen einzeln angepasst (vgl. Abbildung 5.2), sodass die Offsets jeweils für die Phasen BH und BL2 berechnet werden müssen. Bei der folgenden Erläuterung der Adaption im Prozessmodell wird jedoch aus Gründen der Verständlichkeit und Übersichtlichkeit auf eine Unterscheidung zwischen den Geschwindigkeitsphasen verzichtet, da die Berechnung für beide Phasen analog abläuft. Der Fließspannungsoffset  $\Delta k_f(i)$  wird zur Ermittlung der adaptierten Fließspannung  $k_f^*(i)$  auf den anhand von Umformgrad und Umformgeschwindigkeit aus der für die jeweilige Materialklasse (MK) hinterlegten Fließkurve ermittelten Fließspannungswert  $k_f(\text{MK}, \varphi, \dot{\varphi})$  addiert. Analog wird der adaptierte Reibwert  $\mu^*(i)$  aus dem Reibungsoffset  $\Delta \mu(i)$  sowie der gerüst-, geschwindigkeits- und walzwinkelabhängigen Reibwertkurve  $\mu(\text{Gerüst}, v, \alpha_0)$  berechnet. Zusammenfassend werden die adaptierte Fließspannung und der adaptierte Reibwert im Adaptionsschritt  $i$  gerüstweise für die Phasen BL2 und BH anhand der Beziehungen

$$k_f^*(i) = k_f(\text{MK}, \varphi, \dot{\varphi}) + \Delta k_f(i) \quad (5.1)$$

und

$$\mu^*(i) = \mu(\text{Gerüst}, v, \alpha_0) + \Delta\mu(i) \quad (5.2)$$

ermittelt. Die Offsets werden dazu an den Modellkern übergeben und sind im ersten Adaptionsschritt mit  $\Delta k_f(i=1) = \Delta\mu(i=1) = 0$  initialisiert. Die Berechnung der Größenordnung der benötigten Offsets für die nachfolgenden Adaptionsschritte wird anhand der Abweichung der berechneten Kräfte und Momente von den Referenzwerten ermittelt. Dazu werden im ersten Schritt für jedes Bund zusätzlich zu den Walzkräften und Walzmomenten die Sensitivitäten dieser Größen bezüglich  $k_f$  und  $\mu$  in Form von Differenzenquotienten berechnet. Aus diesen Quotienten werden in Verbindung mit den in der Iteration  $i$  anfallenden Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Walzkräften und Walzmomenten die für den nachfolgenden Adaptionsschritt  $i+1$  theoretisch zum Erreichen einer genauen Übereinstimmung von Modell- und Ist-Werten benötigten Offsets für  $k_f$  und  $\mu$  ermittelt. Dieses Vorgehen wird wieder für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH angewendet, sodass die nachstehenden theoretischen Offsetänderungen gerüstweise für beide Phasen berechnet werden:

$$\Delta\Delta k_f^F(i+1) = -\frac{dk_f}{dF_W} \Delta F_W(i) \quad (5.3)$$

$$\Delta\Delta k_f^M(i+1) = -\frac{dk_f}{dM_W} \Delta M_W(i) \quad (5.4)$$

$$\Delta\Delta\mu^F(i+1) = -\frac{d\mu}{dF_W} \Delta F_W(i) \quad (5.5)$$

$$\Delta\Delta\mu^M(i+1) = -\frac{d\mu}{dM_W} \Delta M_W(i). \quad (5.6)$$

Die Abweichungen  $\Delta F_W(i)$  und  $\Delta M_W(i)$  der Walzkraft und des Walzmoments sind dabei als

$$\Delta F_W(i) = F_W^{\text{Modell}}(i) - F_W^{\text{Ist}} \quad (5.7)$$

und

$$\Delta M_W(i) = M_W^{\text{Modell}}(i) - M_W^{\text{Ist}} \quad (5.8)$$

definiert. Das negative Vorzeichen in den Gleichungen 5.3 bis 5.6 hat den Grund, dass die Änderungen der Offsets den Abweichungen von Kraft und Moment entgegenwirken sollen. Positive Abweichungen der Stellgrößen, also zu hohe Ergebnisse für Walzkraft und Walzmoment, müssen durch negative Anpassungen, also Verringerungen, von Fließspannung und Reibwert in Form der entsprechenden Offsets ausgeglichen werden.

Die Implementierung der Adaptionlogik selbst deckt vor allem die Ermittlung des Offsets für den nachfolgenden Adaptionsschritt  $i+1$  anhand der Fallunterscheidung aus Abbildung 5.2 ab. Die in den Gleichungen (5.3) bis (5.6) berechneten Offsetänderungen werden je nach Adaptionfall auf die aktuell genutzten Offsets addiert. Am Beispiel von Fall 1 sollen die berechneten Werte für Walzkraft und Walzmoment mithilfe einer Absenkung von  $k_f$  geändert werden. Die Abweichungen  $\Delta F_W(i)$  und  $\Delta M_W(i)$ , auf denen die Berechnung der Offsetänderungen aus den Gleichungen (5.3) bis (5.6) beruht, wurde mithilfe des Fließspannungsoffsets  $\Delta k_f(i)$  des vorangegangenen Schritts berechnet. Da sowohl die Walzkraft als auch das Walzmoment durch die Änderung der Fließspannung manipuliert werden soll, wird  $\Delta k_f(i)$  mithilfe der theoretischen Offsetänderungen aus den Gleichungen (5.3) und (5.4) korrigiert. Dazu wird der Mittelwert aus  $\Delta \Delta k_f^F(i+1)$  und  $\Delta \Delta k_f^M(i+1)$  mit dem Dämpfungsfaktor  $\Omega_1$  multipliziert und das Produkt auf  $\Delta k_f(i)$  addiert. Der Dämpfungsfaktor dient der Vermeidung einer Überkorrektur der Zielgrößen Walzkraft und Walzmoment sowie damit einhergehenden zusätzlichen Iterationsschritten. Nach Erfahrung von allpcloud gelten in vergleichbaren Anwendungsfällen Dämpfungsfaktoren im Bereich von 0,3 bis 0,5 als Best Practice, bei der Adaption hat sich der Dämpfungsfaktor  $\Omega_1 = 0,5$  bewährt. Der Fließspannungsoffset  $\Delta k_f(i+1)$  wird zusammenfassend nach der Vorschrift

$$\Delta k_f(i+1) = \Delta k_f(i) + \Omega_1 \frac{1}{2} [\Delta \Delta k_f^F(i+1) + \Delta \Delta k_f^M(i+1)] \quad (5.9)$$

berechnet. Der Reibwert und damit auch der Reibwertoffset wird nach der Adaptionlogik in Fall 1 nicht verändert, sodass

$$\Delta \mu(i+1) = \Delta \mu(i) \quad (5.10)$$

gilt. Für die folgende Berechnung von  $F_W^{\text{Modell}}(i+1)$  und  $M_W^{\text{Modell}}(i+1)$  gilt analog zu den Gleichungen (5.1) und (5.2) für die adaptierte Fließspannung

$$k_f^*(i+1) = k_f(\text{MK}, \varphi, \dot{\varphi}) + \Delta k_f(i+1) \quad (5.11)$$

und für den adaptierten Reibwert

$$\mu^*(i+1) = \mu(\text{Gerüst}, v, \alpha_0) + \Delta \mu(i+1). \quad (5.12)$$

Aus den im Schritt  $i+1$  berechneten Walzkraften und -momenten werden wiederum nach Gleichung (5.7) und (5.8) die Differenzen  $\Delta F_W(i+1)$  und  $M_W(i+1)$  berechnet. Liegen diese außerhalb der geforderten Toleranz, wird der nächste Adaptionsschritt durchgeführt.

Im vorherigen Abschnitt wurde die Bildung der neuen Offsets  $k_f^*(i+1)$  und  $\mu^*(i+1)$  für den Fall 1 der Adaptionlogik gezeigt, der zusammen mit Fall 8 adaptionstechnisch die

geringste Komplexität aufweist. Es wird lediglich  $k_f$  variiert und die Adaption erfolgt einstufig. Die Berechnung der Offsets bei zweistufiger Adaption wird im Folgenden anhand von Fall 3 vorgestellt. In der Ausgangssituation sind die berechneten Walzmomente zu hoch und die Walzkraften zu niedrig. Dies führt nach der Adaptionslogik im ersten Schritt zu einer Verringerung von  $k_f$  mit dem Ziel der Absenkung des Walzmoments und einer Erhöhung von  $\mu$  mit dem Ziel eines Anstiegs der Walzkraft. Für die Korrektur des Fließspannungsoffsets  $\Delta k_f(i)$  wird also die aus der Abweichung des Walzmoments  $\Delta M_W^{(i)}$  berechnete theoretisch notwendige Offsetänderung  $\Delta \Delta k_f^M(i+1)$  genutzt, für die Korrektur des Reibwertoffsets  $\Delta \mu(i)$  analog die mithilfe der Kraftabweichung  $\Delta M_F^{(i)}$  ermittelte Offsetänderung  $\Delta \Delta \mu^F(i+1)$ . Es gilt in der ersten Stufe für den Fließspannungsoffset

$$\Delta k_f(i+1) = \Delta k_f(i) + \Omega_1 \Delta \Delta k_f^M(i+1) \quad (5.13)$$

und für den Reibwertoffset

$$\Delta \mu(i+1) = \Delta \mu(i) + \Omega_1 \Delta \Delta \mu^F(i+1). \quad (5.14)$$

In Fall 3 ist nach der Adaptionslogik allerdings eine zweistufige Adaption vonnöten. Durch die geplante Absenkung von  $k_f$  ist eine weitere Absenkung der Walzkraft zu erwarten, sodass die zur Anhebung der Kraft berechnete Änderung von  $\mu$  nicht ausreicht. Somit muss in der zweiten Stufe auf die Absenkung der Kraft infolge von  $k_f$  durch eine zusätzliche Erhöhung der Kraft mithilfe einer Änderung von  $\mu$  entgegengewirkt werden. Durch eine Verknüpfung der Gleichungen (5.3) und (5.5) kann die Änderung des Reibwertoffsets  $\Delta \Delta \mu^F(i+1)$  berechnet werden, die den selben Einfluss auf die Walzkraft hat wie die Änderung des Fließspannungsoffsets  $\Delta \Delta k_f^F(i+1)$ . Mit der umgestellten Gleichung

$$\Delta \Delta \mu^F(i+1) = \frac{\frac{d\mu}{dF_W}}{\frac{dF_W}{dk_f}} \Delta \Delta k_f^F(i+1) \quad (5.15)$$

lässt sich somit die Änderung  $\Delta \Delta \mu^F(i+1)$  berechnen, die denselben Einfluss auf das Verhalten der berechneten Walzkraft hat wie  $\Delta \Delta k_f^F(i+1)$ . Dieser Term wird unter Berücksichtigung des Dämpfungsfaktors  $\Omega_2$  für die zweite Stufe der Adaption in die Berechnung des Reibwertoffsets aufgenommen. Da die zweite Stufe der Adaption den Auswirkungen der ersten Stufe entgegenwirken soll, geht der Term mit negativem Vorzeichen in die Berechnung ein. Die Berechnungsvorschrift für den Reibwertoffset in Fall 3 ergibt sich abschließend zu

$$\Delta\mu(i+1) = \Delta\mu(i) + \Omega_1\Delta\Delta\mu^F(i+1) - \Omega_2\frac{\frac{d\mu}{dF_W}}{\frac{dk_f}{dF_W}}\Delta\Delta k_f^F(i+1). \quad (5.16)$$

Für  $\Omega_2$  hat sich der Zahlenwert 0,25 bewährt, sodass der Einfluss der zweiten Stufe auf die Zielgrößen halb so groß ist wie der Einfluss der ersten Stufe. Die berechneten Werte  $\Delta\mu(i+1)$  und  $\Delta\mu(i+1)$  werden in die Gleichungen (5.11) und (5.12) eingesetzt und das weitere Vorgehen läuft analog zum zuvor besprochenen Fall 1 ab.

Die für Fall 3 gezeigte zweistufige Adaption von  $k_f$  und  $\mu$  ist analog auf alle anderen Fälle der Adaptionlogik anwendbar. Für die Fälle des zweiten und dritten Blocks aus Abbildung 5.2 unterscheiden sich die Berechnungsformeln zwar zwischen den Geschwindigkeitsphasen, die grundsätzliche Vorgehensweise ändert sich allerdings nicht.

## 6 Validierung des erweiterten Prozessmodells

Das folgende Kapitel behandelt die Validierung des FE-Ansatzes von Mathweis Engineering und allpccloud. Die Validierung erfolgt anhand der in Kapitel 4 erstellten Datenbasis, in der sowohl die Eingangsgrößen des Modells als auch aufbereitete Referenzwerte für Walzkraft und Walzmoment bundweise gespeichert sind. Durch die in Kapitel 5 integrierten Erweiterungen des Prozessmodells wurde das Einlesen der Daten sowie die automatisierte Stichplanberechnung für alle enthaltenen Bunde ermöglicht. Dabei können für jedes Bund zwei Parametersätze übergeben werden, sodass der Stichplan für jeweils zwei stationäre Arbeitspunkte berechnet werden kann. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Rechenergebnisse des FE-Ansatzes für die Stichpläne bewertet. Dazu werden die berechnete Walzkraft und das berechnete Walzmoment für beide Geschwindigkeitsphasen anhand der Übereinstimmung mit den in Kapitel 4 ermittelten Referenzwerten bewertet. Darüber hinaus werden die Abweichungen der mittels FEM berechneten Werte mit den Abweichungen verglichen, die mithilfe des ebenfalls im Modell enthaltenen Berechnungsansatzes nach Bland, Ford und Ellis erreicht wurden.

### 6.1 Validierung des FE-Modells anhand der Anlagendaten im Vergleich mit der Theorie nach Bland, Ford und Ellis

In diesem Abschnitt wird die Validierung des FE-Ansatzes von Mathweis Engineering und allpccloud behandelt. Dazu wurden die Berechnungsergebnisse des FE-Ansatzes für die Zielgrößen Walzkraft und Walzmoment mit den aus den Anlagendaten ermittelten Referenzwerten sowie mit den Rechenergebnissen des Modells nach Bland, Ford und Ellis verglichen. Die Rechnungen werden zunächst für den gesamten Produktmix ohne Adaption für die Phasen BL2 und BH durchgeführt, um einen Überblick zu erhalten. Es gelten für beide Modelle die gleichen Randbedingungen. Die zugrundeliegenden Fließkurven entsprechen den bei ArcelorMittal Eisenhüttenstadt genutzten Fließkurven für die verschiedenen Materialklassen (MK). Zur Erhöhung der Rechengenauigkeit werden diese für jede Stahlmarke (SM) um die Differenz zwischen der Anfangsfließspannung  $k_{f0}$  der hinterlegten Fließkurve und der experimentell für die einzelnen Stahlmarken ermittelten 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  offsetiert. Somit kann für nahezu jede Stahlmarke näherungsweise mit einer individuellen Fließkurve gerechnet werden, obwohl nur 15 Fließkurven für die jeweiligen Materialklassen hinterlegt sind. Ist für eine Stahlmarke  $R_{p0,2}$  nicht angegeben, wird die Originalfließkurve der jeweiligen Materialklasse genutzt. Für alle Stahlmarken, für die  $R_{p0,2}$  ermittelt wurde, berechnet sich die Fließspannung in Abhängigkeit von Umformgrad und Umformgeschwindigkeit zu

$$k_f(\text{SM}, \varphi, \dot{\varphi}) = k_f(\text{MK}, \varphi, \dot{\varphi}) + R_{p0,2}(\text{SM}) - k_{f0}(\text{MK}). \quad (6.1)$$

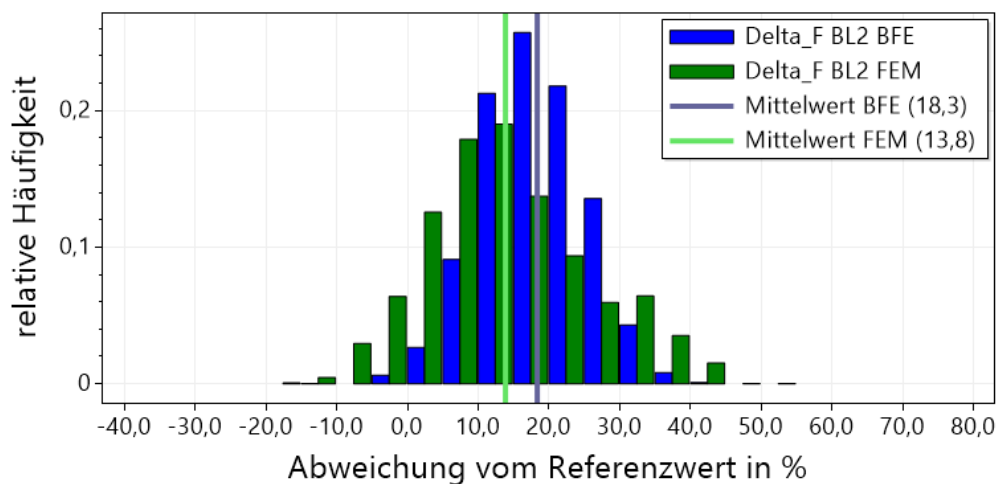
Die genutzten Reibwertkurven wurden im Fachgespräch mit Mathweis Engineering, basierend auf Erfahrungswerten, festgelegt. Alle weiteren Eingangsparameter wurden zeilenweise der in Kapitel 4 erstellten .csv-Datei mit den benötigten Eingangsparametern entnommen. Die genutzten Werte für  $k_f$ ,  $\mu$  und  $R_{p0,2}$  sind den Tabellen in Anhang B zu entnehmen.

### 6.1.1 Auswertung der Simulationsergebnisse bezüglich Kräften und Momenten

Die Abweichungen der nach dem FE-Ansatz von Mathweis Engineering und allpcloud sowie der Theorie nach Bland, Ford und Ellis berechneten Walzkräfte und -momente von den jeweils gemessenen Ist-Werten werden im Folgenden gerüstweise besprochen.

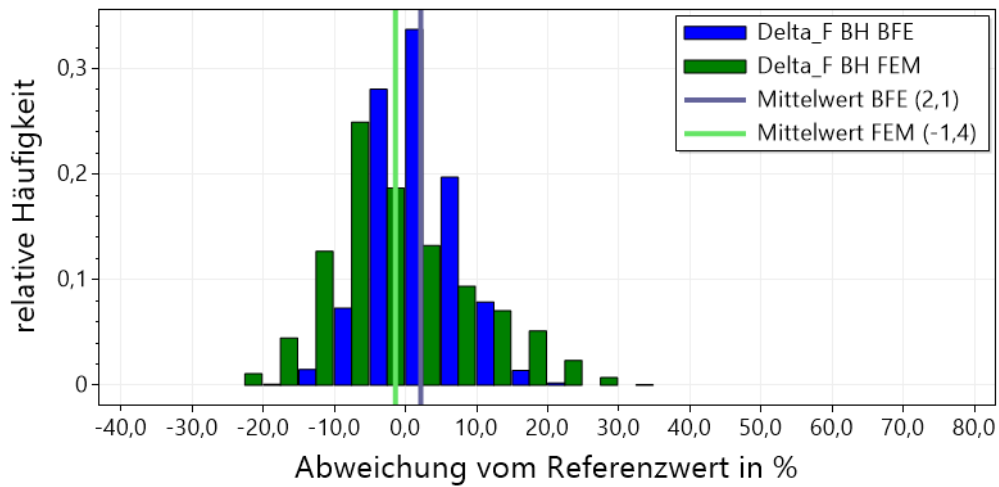
#### Gerüst 1

Die Abweichungen der berechneten Kräfte für G1 in der Phase BL2 sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Verteilung der Abweichungen für den Ansatz nach Bland, Ford und Ellis (BFE) sowie den FE-Ansatz von Mathweis Engineering und allpcloud (FEM). Außerdem ist für beide Ansätze jeweils die mittlere Abweichung vom Referenzwert dargestellt.



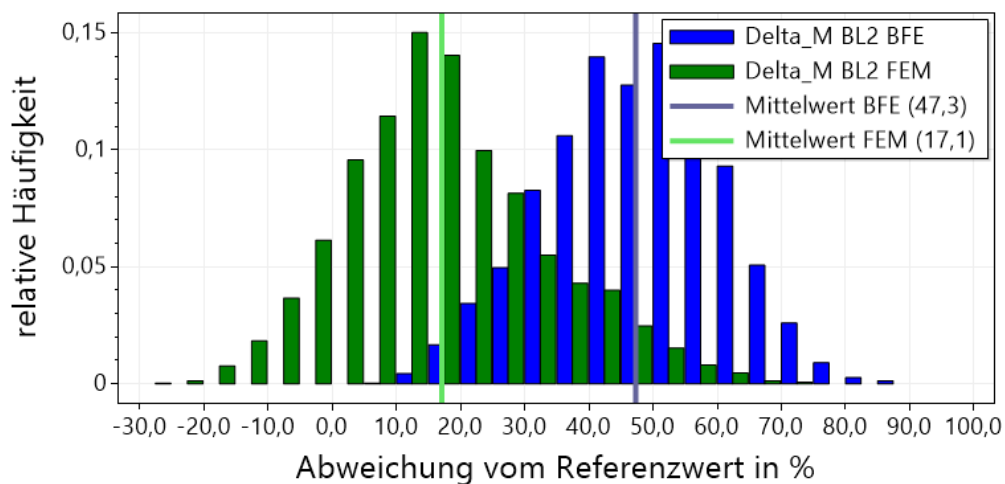
**Abbildung 6.1:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G1 für die Phase BL2

Die Verteilung der Abweichung der nach beiden Ansätzen berechneten Walzkräfte für die Phase BL2 unterscheidet sich in G1 nur geringfügig. Die mittlere Abweichung vom Referenzwert ist nach dem FE-Ansatz (13,8%) geringer als nach dem Ansatz nach Bland, Ford und Ellis (18,3%), die Streuung der Abweichungen ist bei den mittels FEM berechneten Werten allerdings höher.



**Abbildung 6.2:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G1 für die Phase BH

Abbildung 6.2 zeigt die Verteilung der Abweichung der berechneten Walzkräfte für die Phase BH. Auch hier liegen die Werte für die mittlere Abweichung der Walzkräfte eng beieinander, wobei die Abweichung nach dem FE-Ansatz mit -1,4% minimal geringer ist als die Abweichung der nach Bland, Ford und Ellis berechneten Werte (2,1%). Insgesamt sind die Abweichungen der nach beiden Theorien berechneten Ergebnisse für die Walzkraft von den Referenzwerten in der Phase BH geringer als in der Phase BL.

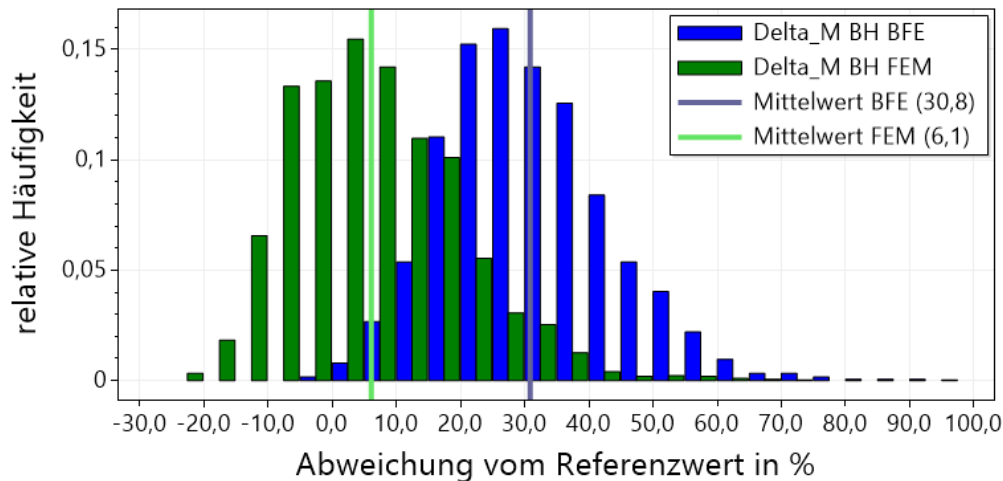


**Abbildung 6.3:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G1 für die Phase BL2

In Abbildung 6.3 ist die Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente für die Phase BL2 dargestellt. Hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Rechenansätzen erkennbar. Die Streuung der Abweichungen der Rechenwerte aus beiden Modellen ist für die Momente der Phase BL2 ähnlich, die Genauigkeit der mittels FEM



berechneten Walzmomente ist allerdings deutlich höher. So beträgt die mittlere Abweichung der Momente nach dem FE-Ansatz vom Referenzwert 17,1%, die nach der Theorie von Bland, Ford und Ellis berechneten Momente weichen hingegen im Durchschnitt um 47,3% vom jeweiligen Referenzwert ab.

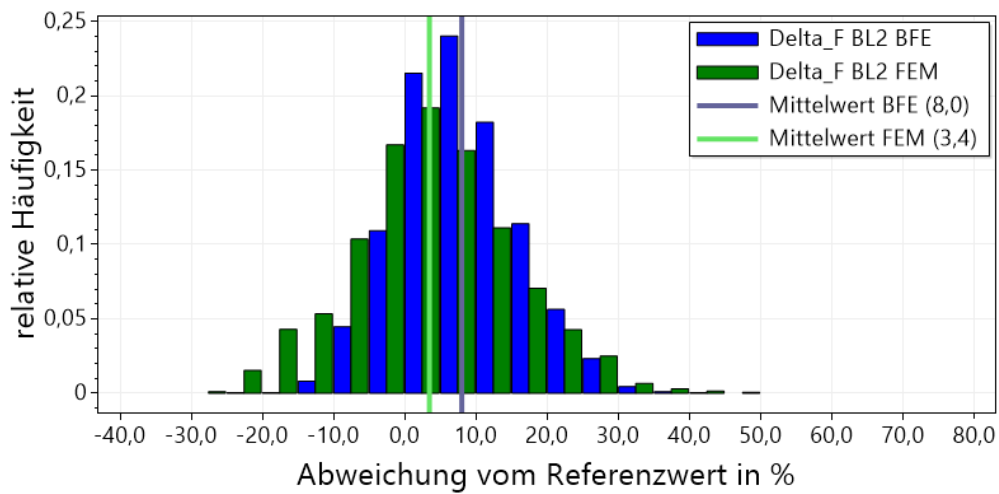


**Abbildung 6.4:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G1 für die Phase BH

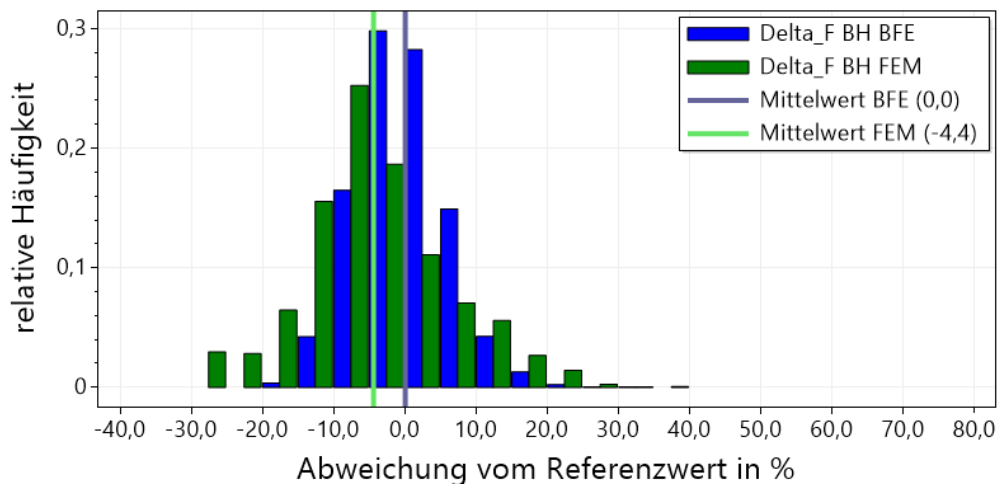
Abbildung 6.4 zeigt die Abweichung der berechneten Walzmomente für die Phase BH. Wie auch bei den Walzkräften ist die Abweichung der Momente vom Referenzwert in der Phase BH insgesamt geringer als in der Phase BL2. Die mittlere Abweichung der mittels FEM berechneten Momente beträgt 6,1%, damit ist der FE-Ansatz auch für die Phase BH in der Momentenberechnung deutlich genauer als der Ansatz nach Bland, Ford und Ellis (30,8%). Bei zusammenhängender Betrachtung der Modellwerte für Walzkraft und Walzmoment kann insgesamt festgehalten werden, dass die mittels FEM berechneten Werte im Durchschnitt genauer sind. Der Ansatz nach Bland, Ford und Ellis berechnet für G1 zwar die Walzkräfte im Schnitt ähnlich genau wie der FE-Ansatz und weist dabei sogar eine geringere Streuung auf, die Vorhersagegenauigkeit der zugehörigen Momente fällt allerdings im Vergleich zur FEM deutlich ab.

## Gerüst 2

Für G2 ergeben sich qualitativ dieselben Beziehungen wie für G1, daher werden sie hier in der Kurzfassung ausgeführt. Die Abweichung der berechneten Walzkräfte der beiden untersuchten Ansätze von den Referenzwerten liegt sowohl für die Phase BL2 (Mittelwert BFE: 8,0%, FEM: 3,4%) als auch für die Phase BH (Mittelwert BFE: 0,0%, FEM: -4,4%) in einem ähnlichen Bereich. Dabei ist die Streuung der Abweichungen der mittels FEM berechneten Kräfte analog zu G1 etwas höher als die der Abweichungen der mithilfe des Ansatzes nach Bland, Ford und Ellis berechneten Werte.

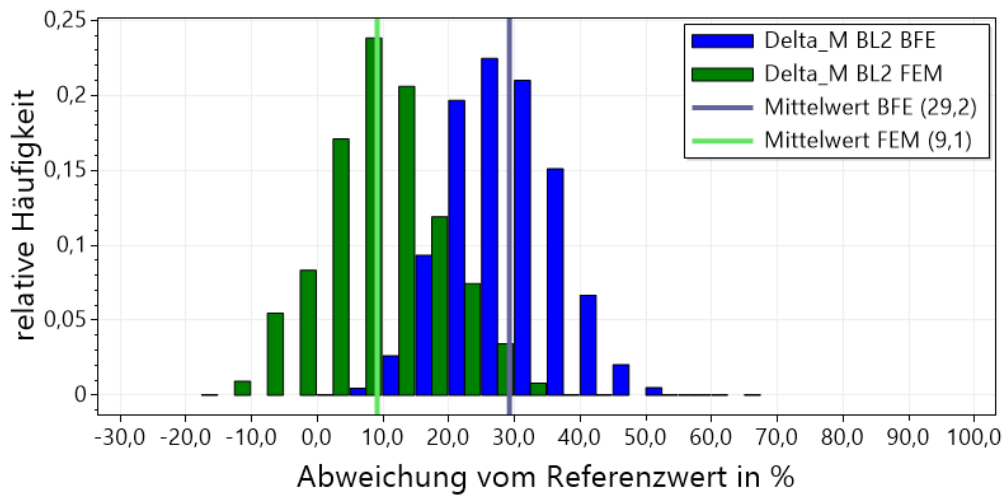


**Abbildung 6.5:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G2 für die Phase BL2



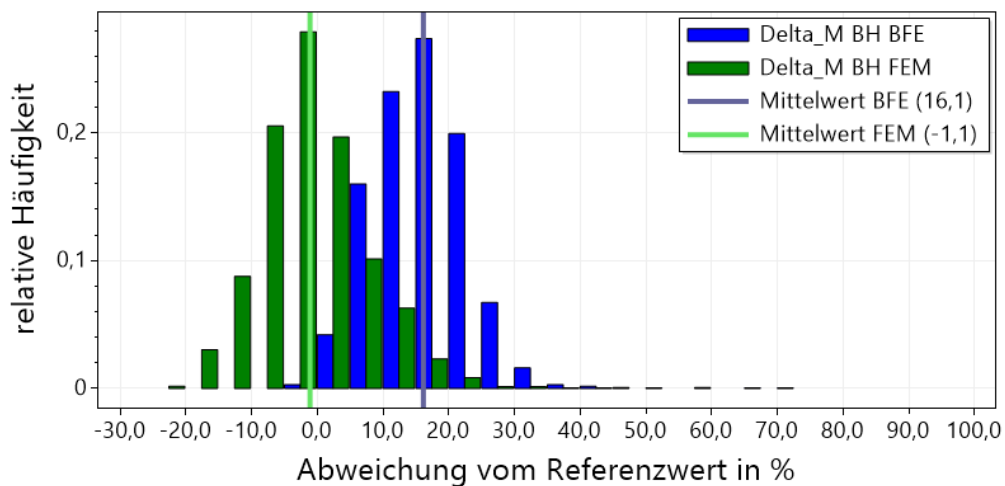
**Abbildung 6.6:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G2 für die Phase BH

Die Walzmomente konnten ebenfalls analog zu G1 für beide Geschwindigkeitsphasen mittels FEM (Mittelwert Abweichung Phase BL2: 9,1%, BH: -1,1%) genauer berechnet werden als mithilfe der Theorie nach Bland, Ford und Ellis (Mittelwert Abweichung Phase BL2: 29,2%, BH: 16,1%), sodass bei Betrachtung beider Prozessgrößen der FE-Ansatz als genauer bewertet wird. Insgesamt fällt auf, dass die Abweichungen der mit beiden Ansätzen berechneten Kräfte und Momente in G2 etwas geringer ausfallen als in G1. Die Abweichungen der Kräfte für die verschiedenen Geschwindigkeitsphasen sind in den Abbildungen 6.5 (Phase BL2) und 6.6 (Phase BH) dargestellt, die Abweichungen der Momente in den Abbildungen 6.7 (Phase BL2) und 6.8 (Phase BH).



**Abbildung 6.7:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G2 für die Phase BL2

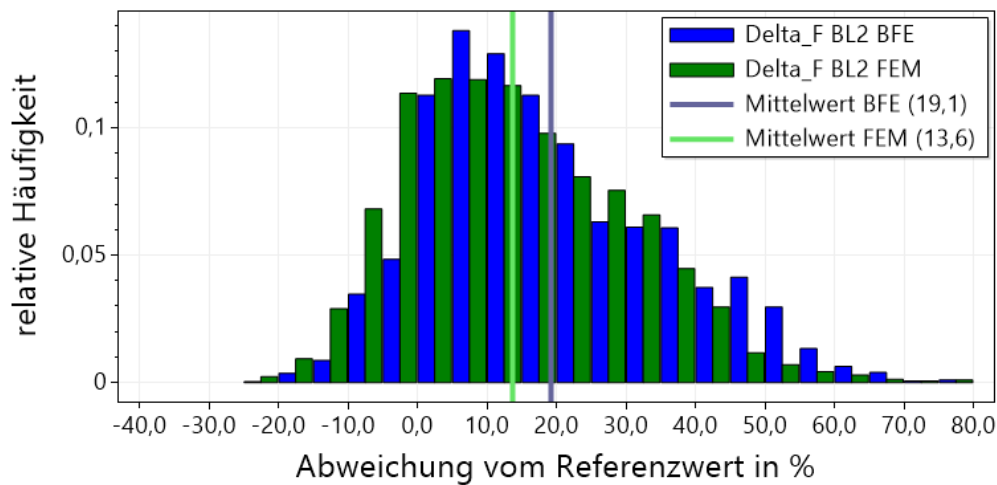
Bei zusammenhängender Betrachtung der Ergebnisse für Walzkräfte und Walzmomente kann auch in G2 der FE-Ansatz im Vergleich zur Theorie nach Bland, Ford und Ellis als insgesamt besser zur Vorhersage der Kräfte und Momente geeignet eingestuft werden.



**Abbildung 6.8:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G2 für die Phase BH

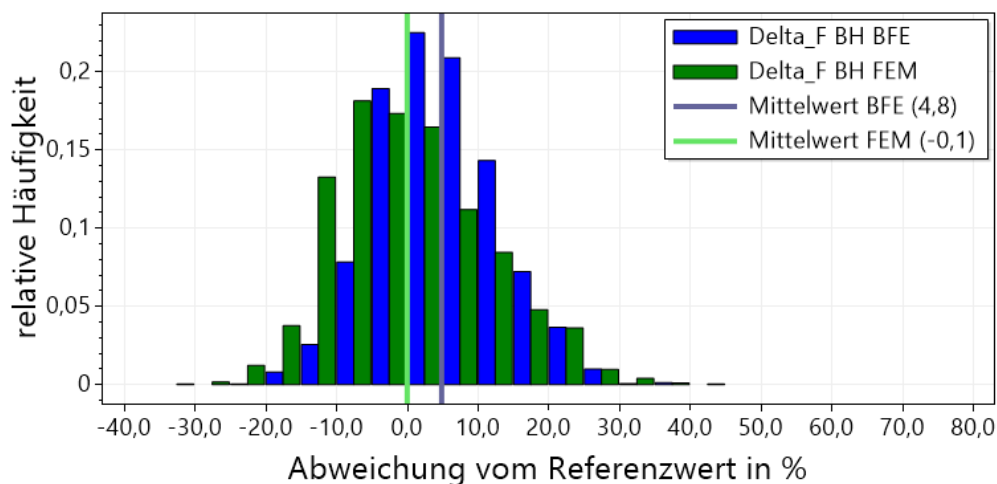
### Gerüst 3

Die Verteilung der Abweichungen in G3 zeigt dieselben Tendenzen wie in G1 und G2, allerdings nehmen sowohl die Mittelwerte als auch die Streuungen der Abweichungen im Vergleich zu G1 und G2 zu.



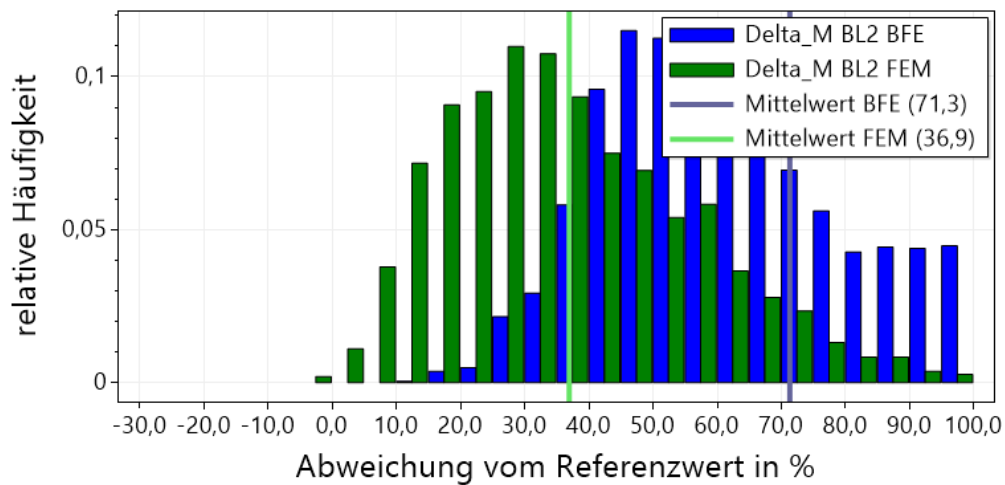
**Abbildung 6.9:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G3 für die Phase BL2

Abbildung 6.9 zeigt die Abweichungen der Walzkräfte in der Phase BL2 für G3. Die Mittelwerte der Abweichungen liegen in einem ähnlichen Bereich wie in G1, wobei der FE-Ansatz mit einer durchschnittlichen Abweichung von 13,6% im Mittel genauer ist als die Theorie nach Bland, Ford und Ellis (19,1%). Die Streuung der Abweichungen ist allerdings für beide Ansätze deutlich größer als in G1 und G2.



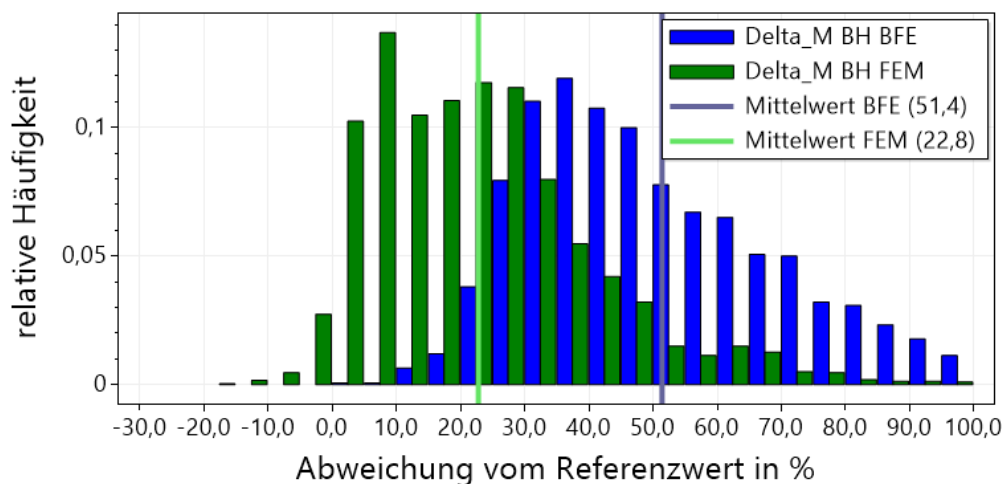
**Abbildung 6.10:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G3 für die Phase BH

In Abbildung 6.10 sind die Abweichungen der Walzkraft in G3 für die Phase BH dargestellt. Auch in dieser Phase sind die Streuungen der Kraftabweichungen für beide Berechnungsansätze höher als in G1 und G2, allerdings nicht im selben Maße wie in der Phase BL2. Die mittleren Abweichungen sind mit -0,1% für den FE-Ansatz und 4,8% für den Ansatz nach Bland, Ford und Ellis wie in G1 und G2 sehr gering.



**Abbildung 6.11:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G3 für die Phase BL2

Abbildung 6.11 zeigt die Abweichungen der Walzmomente in G3 für die Phase BL2. Auch für die berechneten Momente sind sowohl die Mittelwerte als auch die Streuungen der Abweichungen deutlich größer als in G1 und G2. Die Streuung ist dabei für beide Ansätze ungefähr gleich groß, die Abweichung der mithilfe der Theorie von Bland, Ford und Ellis berechneten Walzmomente ist allerdings im Schnitt mit 71,3% fast doppelt so groß wie die Abweichung der mit dem FE-Ansatz berechneten Momente (36,9%).



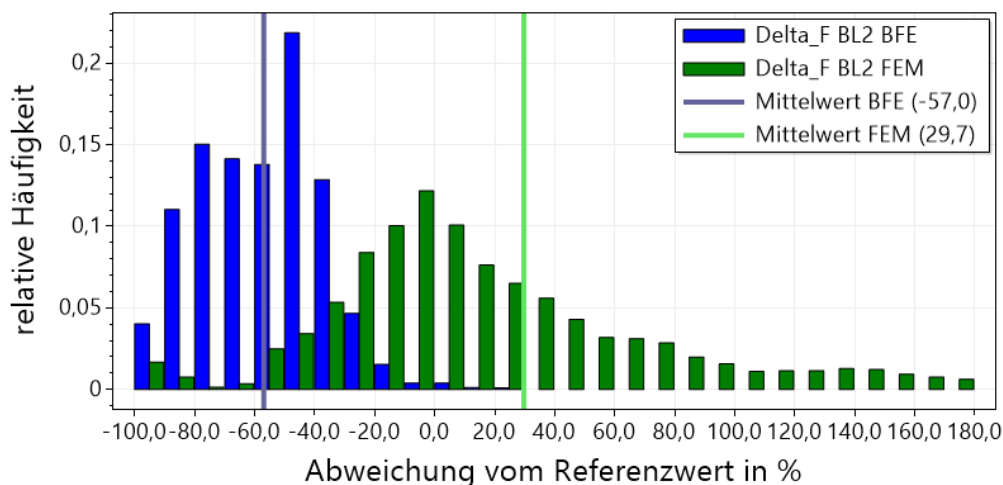
**Abbildung 6.12:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G3 für die Phase BH

In Abbildung 6.12 sind die Abweichungen der berechneten Walzmomente in G3 für die Phase BH dargestellt. Wie in der Phase BL2 weichen auch hier die berechneten Momente deutlich von den Referenzwerten ab. Die mittlere Abweichung ist mit 22,8% auch in dieser Phase für den FE-Ansatz beträchtlich geringer als für die Theorie nach Bland, Ford und

Ellis (51,4%), die Streuung der Abweichungen ist für beide Berechnungsansätze ähnlich groß. Zusammenfassend ist also auch in G3 der FE-Ansatz geeigneter für die Vorhersage der Kräfte und Momente als die Theorie nach Bland, Ford und Ellis. Für die in dieser Arbeit genutzte Datengrundlage fällt allerdings auf, dass die Streuung der Abweichung der berechneten Kräfte und Momente sowie die mittlere Abweichung der Momente deutlich größer ist als in G1 und G2. Die Vorhersagegenauigkeit beider Modelle nimmt also für G3 insgesamt ab.

#### Gerüst 4

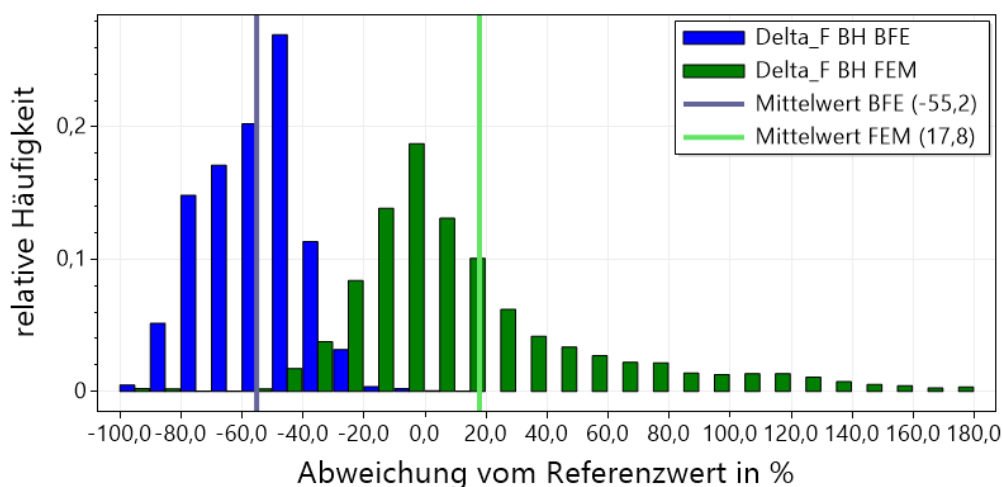
Das Gerüst 4 unterscheidet sich von den anderen drei Gerüsten der untersuchten Tandemstraße in mehrfacher Hinsicht. Zunächst wird es zur gleichmäßigen Übertragung der Walzenrauheit auf das Band im Walzkraftmodus betrieben, sodass die Dickenabnahme in G4 im Verlauf eines Bundes variieren kann, während die Walzkraft auf einen konstanten Wert geregelt wird. Die Gerüste 1 bis 3 werden im Gegensatz dazu anstellungsgeregelt betrieben, sodass die Banddicke auf den Sollwert geregelt wird und die Walzkraft variieren kann. Die Dickenabnahme selbst ist außerdem im Vergleich zu G1, G2 und G3 deutlich geringer, aufgrund der Stichabnahmen der Vorgängergerüste ist das Band allerdings in G4 im Vergleich zu G1 dünner und deutlich verfestigt. Durch die rauen Walzen unterscheiden sich die Reibbedingungen außerdem deutlich von denen der übrigen Gerüste. Aufgrund der zuvor genannten Eigenschaften von G4, insbesondere der geringen Stichabnahme in Verbindung mit dünnem und hochfestem Band, sind einige Vereinfachungen des Modells nach Bland, Ford und Ellis wie die Annahme einer zylindrischen Walzenabplattung oder die Vernachlässigung der Bandelastizität in G4 nicht zulässig. Dies ist anhand der Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkkräfte und -momente in den nachfolgenden Abbildungen erkennbar.



**Abbildung 6.13:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkkräfte in G4 für die Phase BL2

Abbildung 6.13 zeigt die Abweichungen der Walzkräfte für das Modell nach Bland, Ford und Ellis sowie den FE-Ansatz in der Phase BL2. Es wird deutlich, dass die vom Modell nach Bland, Ford und Ellis berechneten Walzkräfte insgesamt beträchtlich geringer sind als die Referenzwerte, was sich in einer durchschnittlichen Abweichung von  $-57,0\%$  äußert. Die Verteilung der anhand des FE-Ansatzes berechneten Abweichungen muss differenzierter betrachtet werden. Es fällt auf, dass die Spitze der Verteilung der mittels FEM ermittelten Abweichungen im Intervall zwischen  $-10$  und  $0\%$  liegt, was zunächst auf eine hohe Genauigkeit dieses Modells schließen lässt. Allerdings zeigt sich hier eine extreme Streuung der Ergebnisse, sodass vereinzelt auch Abweichungswerte von bis zu  $200\%$  auftreten. Diese sorgen in Summe für eine mittlere Abweichung von  $29,7\%$  der berechneten Walzkraft, was zwar im Vergleich zum Modell nach Bland, Ford und Ellis im Mittel eine deutlich höhere Genauigkeit bedeutet, die Präzision der vorhergesagten Werte ist allerdings nicht hinreichend. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Skalierung der zu G4 gehörigen Histogramme aufgrund der höheren Streuung der Abweichungen verändert wurde. In den zu den Gerüsten 1 bis 3 gehörigen Diagrammen entspricht ein Balken dem Intervall von  $5\%$  Abweichung, in Gerüst 4 sind es  $10\%$ .

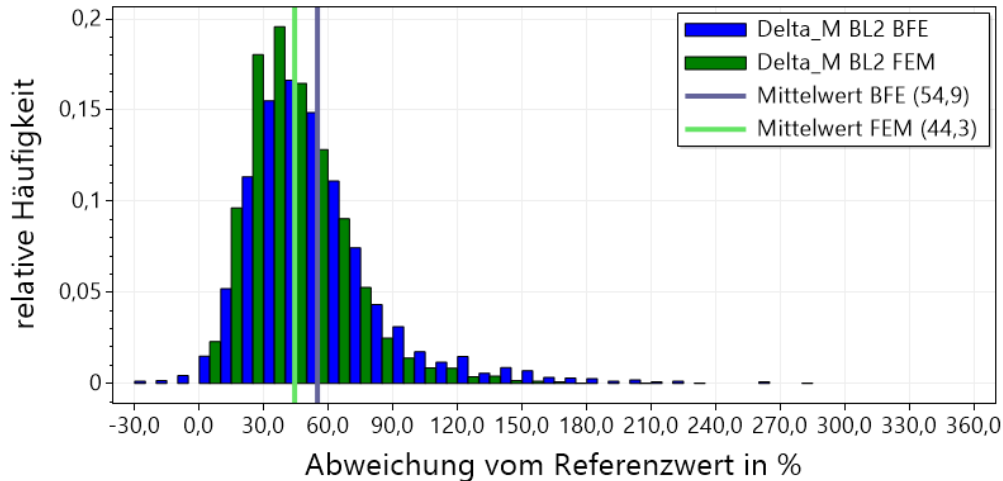
Abbildung 6.14 zeigt die Abweichungen der Walzkräfte für die Phase BH. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie für die Phase BL2. Die nach Bland, Ford und Ellis berechneten Kräfte sind bei einer mittleren Abweichung von  $-55,2\%$  insgesamt deutlich zu klein. Die Spitze der Abweichungsverteilung der mittels FEM berechneten Walzkräfte liegt wieder zwischen  $-10$  und  $0\%$ , weist allerdings auch in dieser Phase eine zu große Streuung auf. Da die Streuung allerdings geringer ausfällt als in der Phase BL2, liegt die mittlere Abweichung bei  $17,8\%$ .



**Abbildung 6.14:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzkräfte in G4 für die Phase BH

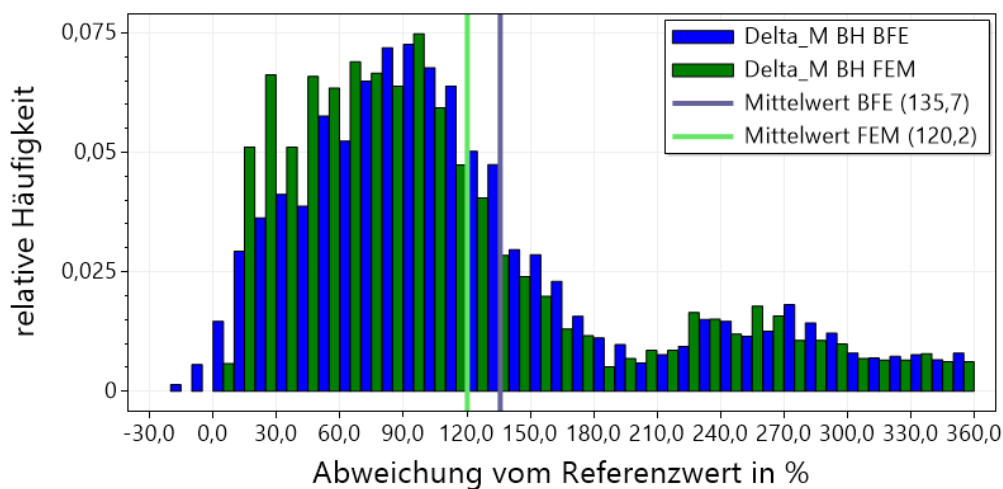
Abbildung 6.15 zeigt die Abweichungen der Walzmomente für die Phase BL2. Die Vertei-

lungen der Abweichungen der nach Bland, Ford und Ellis sowie mittels FEM berechneten Werte liegen in einem ähnlichen Bereich, die Streuung ist mit der Streuung der Momente in G3 vergleichbar. Die mittlere Abweichung ist nach dem FE-Ansatz (44,3%) etwas geringer als nach dem Modell von Bland, Ford und Ellis (54,9%).



**Abbildung 6.15:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G4 für die Phase BL2

In Abbildung 6.16 sind die Abweichungen der Walzmomente in G4 für die Phase BH dargestellt. Die Abweichungen der Momente weisen für die beiden untersuchten Ansätze jeweils eine so hohe Streuung auf, dass die berechneten Walzmomente nicht als aussagekräftig bewertet werden können. Die mittlere Abweichung beträgt für beide Modelle mehr als 100% (BFE 135,7%, FEM 120,2%), die berechneten Momente sind im Mittel also mehr als doppelt so hoch wie der zum jeweiligen Bund gehörige Referenzwert.



**Abbildung 6.16:** Verteilung der Abweichungen der berechneten Walzmomente in G4 für die Phase BH



Die im Vergleich zur Phase BL2 deutlich höhere Abweichung lässt sich durch die große Differenz der Referenzwerte für die beiden Geschwindigkeitsphasen in G4 (vgl. Abbildung 4.11) erklären. Es ist nun zu untersuchen, ob im Walzmodell Einflüsse auf das Walzmoment vernachlässigt werden, welche für die in Abbildung 4.11 dargestellte Diskrepanz zwischen den Momenten der Phasen BL2 und BH verantwortlich sind. Obwohl die in Abbildung 4.11 gezeigten Verteilungen der Walzmomente als plausibel eingestuft wurden, kann allerdings auch die unbewusste Vernachlässigung von bisher unbekanntem Einflüssen auf das Walzmoment in der Datenaufbereitung und damit fehlerhafte Referenzwerte nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Es wäre daher empfehlenswert, das Modell vergleichsweise mit weiteren Daten (idealerweise von einer anderen Anlage) zu testen.

### 6.1.2 Bewertung des FE-Modells anhand der Vergleichsrechnung

Zur Bewertung des FE-Modells von Mathweis Engineering und allpccloud müssen verschiedene Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Zunächst kann festgehalten werden, dass die mithilfe des FE-Modells vorhergesagten Kräfte und Momente insgesamt im Mittel weniger stark von den Referenzwerten abweichen als die nach Bland, Ford und Ellis unter gleichen Randbedingungen berechneten Werte. Für die Gerüste G1 und G2 weichen die FE-Ergebnisse für alle untersuchten Größen im Schnitt um weniger als 20% von den Referenzwerten ab, was als gute Genauigkeit bewertet wird. Die mittleren Abweichungen der Walzkräfte nach Bland, Ford und Ellis und der FEM unterscheiden sich dabei in beiden Gerüsten um weniger als 5%, die Abweichungen der Momente sind nach Bland, Ford und Ellis jedoch im Mittel um ca. 15-30% höher als nach der FEM. Es ist allerdings schon hier teilweise eine erhöhte Streuung der Abweichungen der mit dem FE-Ansatz berechneten Kräfte und Momente bemerkbar. In G3 steigt die Streuung der Kraft- und Momentabweichungen für beide Modelle an, wobei die per FE-Ansatz berechneten Walzkräfte im Mittel um weniger als 15% vom jeweiligen Referenzwert abweichen. Die durchschnittlichen Abweichungen der Momente steigen auf über 20% an, sind allerdings nur in etwa halb so groß wie die durchschnittlichen Abweichungen der Momente nach Bland, Ford und Ellis. In G4 sind die mittels FEM berechneten Kräfte im Mittel genauer als die nach Bland, Ford und Ellis, die Spitze der Histogramme liegt jeweils zwischen -10 und 0%. Allerdings ist eine extrem hohe Streuung zu beobachten, somit sind die vorhergesagten Werte für G4 nicht zuverlässig. Die berechneten Walzmomente weichen für beide Modelle stark von den Referenzwerten ab, wobei ebenfalls eine sehr hohe Streuung vorliegt.

Zusammenfassend kann für die Gerüste 1 bis 3 festgehalten werden, dass der FE-Ansatz unter gleichen Randbedingungen die Walzkräfte ähnlich genau berechnet wie der Ansatz nach Bland, Ford und Ellis, bei der Berechnung der Momente jedoch eine höhere Genauigkeit erzielt. Somit kann gefolgert werden, dass das Zusammenspiel von Kräften und Momenten vom FE-Modell besser abgebildet wird. Vom FE-Ansatz wurde jedoch insbesondere aufgrund der genaueren Modellierung der Walzenabplattung vor allem für G4 eine

Verbesserung der Vorhersage der Druckverläufe im Walzspalt und damit der Walzkraft und des Walzmoments erwartet. An der Form des Histogramms kann abgelesen werden, dass der Ansatz des FE-Modells in jedem Fall besser zur Berechnung der Walzkraft geeignet ist. In der Phase BL2 weichen etwa 40% der mittels FEM berechneten Kräfte um maximal 20% vom Referenzwert ab, in der Phase BH sind es sogar etwa 55%. Für den Ansatz nach Bland, Ford und Ellis liegen jeweils weniger als 5% der berechneten Kräfte in diesem Bereich. In weiteren Untersuchungen müssen allerdings die Gründe der erhöhten Streuung der Walzkraftabweichungen analysiert werden, da diese die Vorhersagequalität stark beeinträchtigt. Ein anderer, in der Praxis nicht zu vernachlässigender Vorteil des FE-Modells ist die Tatsache, dass die Walzkraft eher überschätzt wird. Dies führt dazu, dass bei Orientierung an den mittels FEM berechneten Walzkraftwerten die Anlage im Zweifel eher weniger stark belastet wird. Die deutliche Unterschätzung der Walzkraft in G4 nach Bland, Ford und Ellis kann dazu führen, dass das Modell Walzaufgaben als durchführbar bewertet, die in der Realität die Anlagengrenzen bezüglich des Kraftbedarfs verletzen. Dieser Problemstellung wird in der Praxis durch entsprechende Adaptionparameter (Feldmann et al., 2009) sowie Erfahrungswerte der Anlagenbetreiber begegnet.

## **6.2 Adaption von Fließspannung und Reibwert für einen Teildatensatz**

Im folgenden Abschnitt wird die Funktionalität der automatisierten Adaption anhand der drei am häufigsten in der Datenbasis vertretenen Stahlmarken geprüft. Die Anzahl der Adaptionsschritte wird auf 10 begrenzt, da diese Begrenzung sich in Testrechnungen als guter Mittelweg zwischen Genauigkeit der Adaption und benötigter Rechenzeit herausgestellt hat. Aufgrund der extremen Streuung der Abweichungen der berechneten Walzkraft und -momente und der ohnehin abweichenden Walzsituation in G4 wird die Adaption zunächst nur für die Gerüste G1 bis G3 durchgeführt. Aufgrund der ähnlichen Walzbedingungen in G1, G2 und G3 müssen neben den adaptierten Fließspannungen auch die Ergebnisse der Adaption für die Reibung in diesen Gerüsten sinnvoll zusammenpassen.

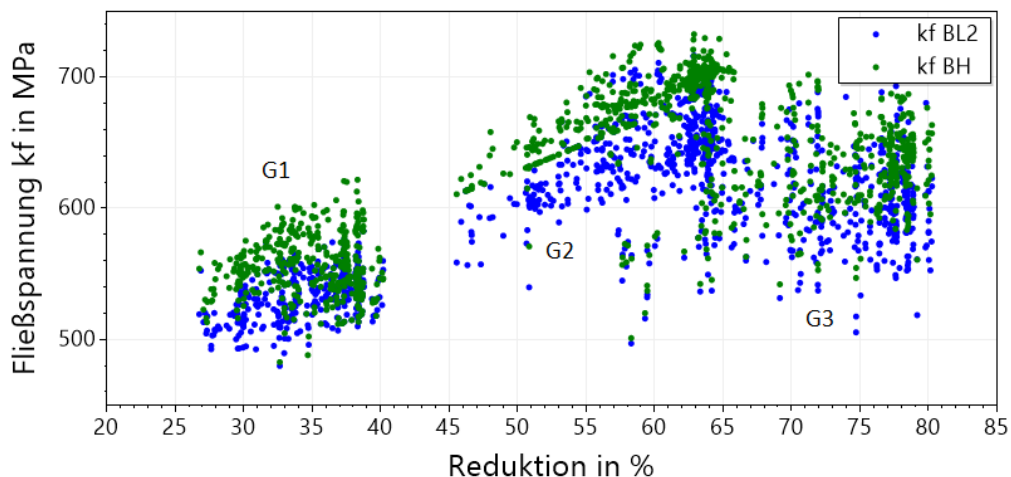
### **6.2.1 Ergebnisse der Adaption für die Stahlmarken 321, 319 und 341**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Adaption für die Stahlmarken 321, 319 und 341 behandelt. Zunächst werden die Adaptionsergebnisse für die Fließspannung ausgewertet, anschließend folgt eine Betrachtung der Adaptionsergebnisse für den Reibwert.

#### **Adaption der Fließspannung für die Gerüste 1 bis 3**

Die Ergebnisse der adaptierten Fließspannungen für die am häufigsten gewalzte Stahlmarke 321 sind in Abbildung 6.17 aufgeführt. Die Fließspannungswerte für die Phasen BL2 und BH sind über die Reduktion aufgetragen. Insgesamt ist erkennbar, dass die

für die Phase BH berechneten Fließspannungswerte tendenziell größer sind als die Werte für die Phase BL2. Dies ist auf den Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung erklärbar (vgl. Tabelle 4.4). Durch die Darstellung der Fließspannung über der Reduktion lassen sich drei Punktwolken voneinander unterscheiden, die die drei betrachteten Gerüste abbilden. Von G1 nach G2 steigt die Fließspannung insgesamt an, was durch den Einfluss der Materialverfestigung bei zunehmender Umformung (Reduktion) bedingt ist (vgl. Tabelle 4.4). Die für G3 adaptierten Fließspannungen sind hingegen insgesamt geringer als die Fließspannungen in G1 und G2 und folgen damit nicht den bekannten Gesetzmäßigkeiten. Um eine Besonderheit des untersuchten Materials auszuschließen, wurden zum Vergleich die adaptierten Fließspannungswerte für zweit- und dritthäufigste Stahlmarken 319 und 341 ebenfalls untersucht. Hier zeigen sich dieselben Gesetzmäßigkeiten, die Trennung der einzelnen Gerüste ist noch deutlicher zu erkennen als für die Stahlmarke 321. Die entsprechenden Diagramme sind im Anhang C aufgeführt (Abbildungen C.1 und C.2).



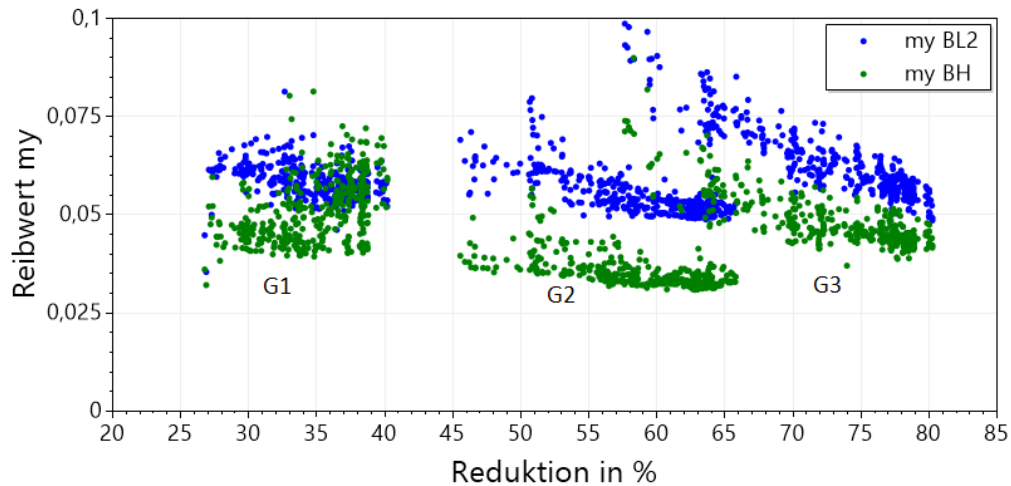
**Abbildung 6.17:** Adaptierte Fließspannungswerte für die Stahlmarke 321, G1 bis G3

Die Adaptionsergebnisse für die Fließspannung in G1 und G2 sind also für die untersuchten Materialien durchaus realistisch, die Ergebnisse für G3 entsprechen jedoch nicht den bekannten Gesetzmäßigkeiten. Dies lässt darauf schließen, dass die Adaption für die Gerüste 1 und 2 wie gewünscht funktioniert, für das Gerüst 3 allerdings nicht. Diese Vermutung soll nun anhand der adaptierten Reibwerte überprüft werden.

### Adaption der Reibwerte für die Gerüste 1 bis 3

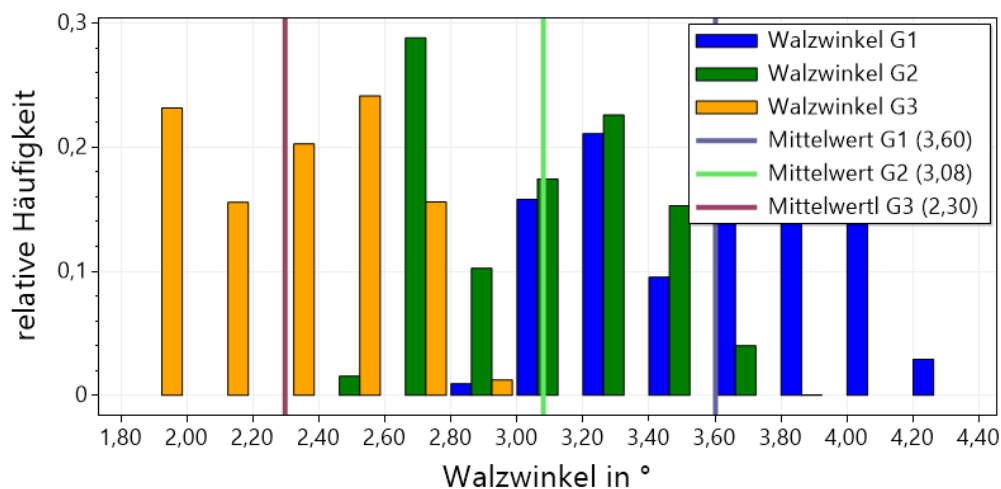
Die adaptierten Reibwerte für die Stahlmarke 321 sind in Abbildung 6.18 dargestellt. Auch sie sind an dieser Stelle über der Reduktion aufgetragen, um eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Gerüsten zu ermöglichen. Insgesamt sind die Reibwerte für die Phase BH in allen Gerüsten tendenziell kleiner als in der Phase BL2, was durch hydrodynamische Ef-

fekte im Walzspalt erklärt werden kann (vgl. 2.2.3). Allerdings weicht auch der adaptierte Reibwert in Gerüst 3 deutlich von den in G1 und G2 herausgestellten Gesetzmäßigkeiten ab und ist im Vergleich zu G1 und G2 deutlich erhöht. Für die Stahlmarken 319 und 341 zeigt sich dieselbe Gesetzmäßigkeit (vgl. Abbildungen C.3 und C.4).



**Abbildung 6.18:** Adaptierte Reibwerte für die Stahlmarke 321, G1 bis G3

Ein in G3 im Vergleich zu G1 und G2 erhöhter Reibwert ist aufgrund des Einflusses der Geschwindigkeit unwahrscheinlich, da diese aufgrund der Volumenkonstanz mit jedem Gerüst steigt. Lediglich ein im Vergleich zu G1 und G2 deutlich höherer Walzwinkel, also eine deutlich größere Dickenabnahme (vgl. Gleichung (2.17)) in G3, könnte trotz der höheren Geschwindigkeit für einen Anstieg des Reibwerts sorgen (vgl. Tabelle 4.4).



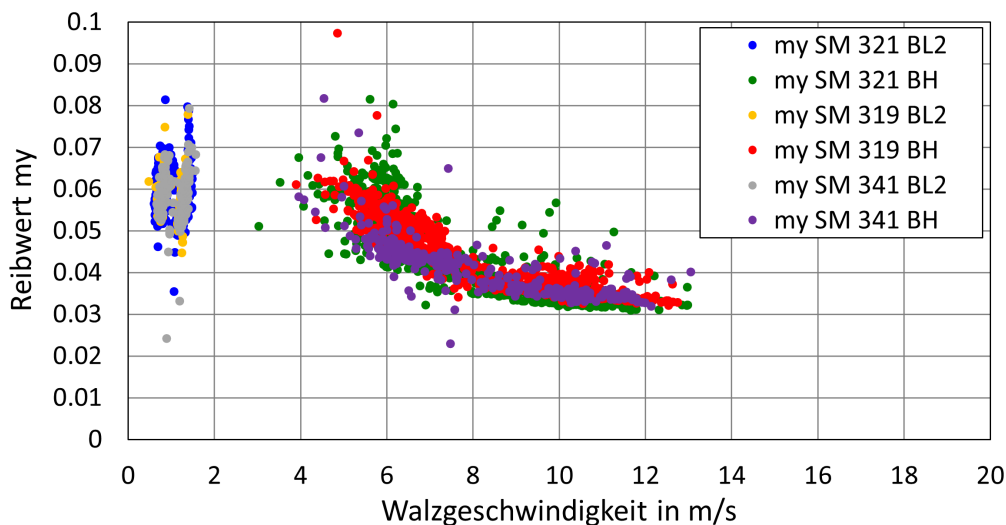
**Abbildung 6.19:** Verteilung der Walzwinkel in den Gerüsten 1 bis 3 für die Stahlmarken 321, 319 und 341

Abbildung 6.19 zeigt jedoch deutlich, dass die Walzwinkel in G3 für die untersuchten

Stahlmarken im Mittel deutlich kleiner sind als in G1 und G2. Zusammen mit der höheren Geschwindigkeit in G3 führt ein flacherer Walzwinkel (und damit eine geringer Dickenabnahme) nach den bekannten Theorien zu einer Verringerung des Reibwerts. Der durch die Adaption ermittelte höhere Reibwert in G3 ist, insbesondere bei gleichzeitiger Betrachtung der unrealistischen Ergebnisse für die Fließspannung in G3, nicht sinnvoll. Somit muss gefolgert werden, dass die adaptierten Ergebnisse für die Fließspannung und den Reibwert in G3 fehlerhaft sind.

### 6.2.2 Nutzung der Adaptionsergebnisse zur Anpassung des Reibgesetzes

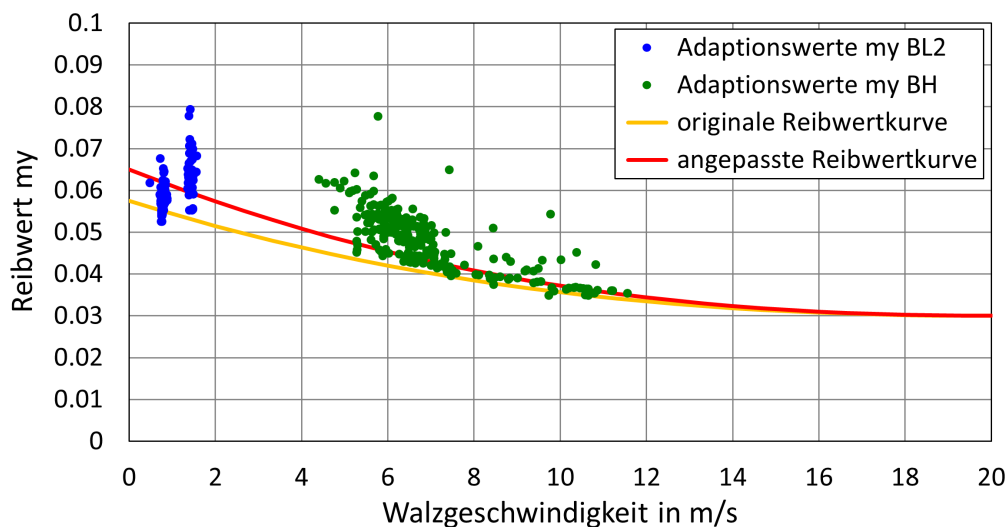
Die Ergebnisse der Adaption werden im folgenden Abschnitt zur Anpassung des Reibgesetzes genutzt. Aufgrund der nicht plausiblen Adaptionsergebnisse für G3 konnten dabei lediglich die adaptierten Reibwerte für G1 und G2 verwendet werden. Das Reibgesetz ist nicht materialabhängig, sodass die Adaptionsergebnisse der untersuchten Materialien gemeinsam betrachtet werden. Die adaptierten Reibwerte der Stahlmarken 321, 319 und 341 sind in Abbildung 6.20 dargestellt.



**Abbildung 6.20:** Adaptierte Reibwerte in den Phasen BL2 und BH für die Stahlmarken 321, 319 und 341 aufgetragen über die Walzgeschwindigkeit

Die abgebildeten Reibwerte sind nach der Geschwindigkeitsphase unterteilt und über die Walzgeschwindigkeit  $v$  aufgetragen. Es ist eindeutig erkennbar, dass die Reibwerte aller abgebildeten Stahlmarken trotz einer gewissen Streuung demselben Muster folgen und der Reibwert wie erwartet bei steigender Walzgeschwindigkeit abnimmt. Die Reibwerte liegen außerdem bis auf wenige Ausreißer in einem plausiblen Bereich und werden daher nun zur Anpassung des Reibgesetzes genutzt. Da das genutzte Reibgesetz allerdings walzwinkelabhängig ist, müssen verschiedene Walzwinkel gesondert betrachtet werden. Als Bezugspunkte, für die das hinterlegte Reibgesetz ausgewertet wurde, wurden die mittleren Walzwinkel in G1 ( $3,60^\circ$ ) und G2 ( $3,08^\circ$ ) ausgewählt. Als Grundlage für die Anpassung

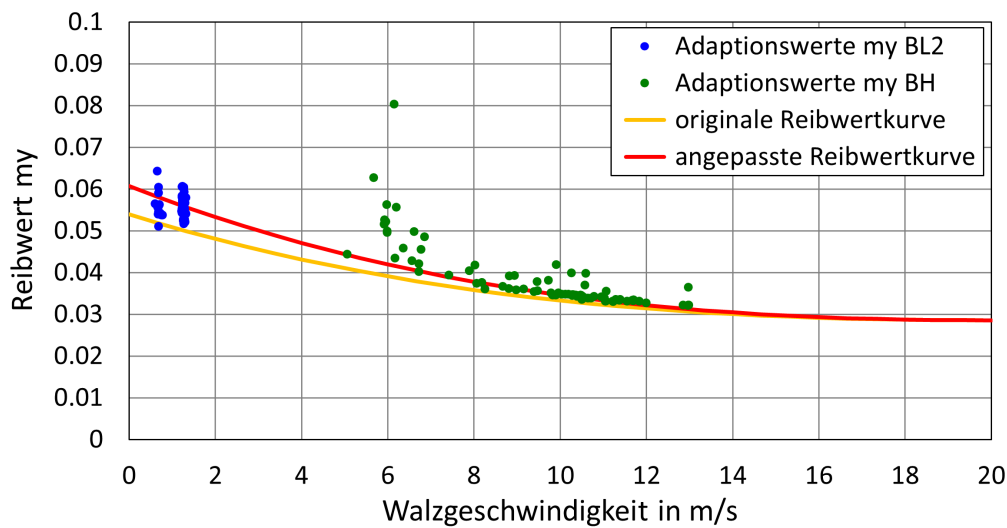
des Reibgesetzes wurden für beide Winkel Adaptionswerte mit einer Streubreite von  $0,2^\circ$  genutzt. Für den ersten Bezugspunkt wurden also die adaptierten Reibwerte aller Bunde genutzt, bei denen der Walzwinkel in G1 zwischen  $3,50$  und  $3,70^\circ$  liegt. Für das zweite Gerüst wurden analog alle Bunde mit einem Walzwinkel zwischen  $2,98$  und  $3,18^\circ$  in G2 verwendet. In Abbildung 6.21 sind die erhaltenen adaptierten Reibwerte für die Phasen BL2 und BH sowie alle Bunde, die in G1 einen Walzwinkel zwischen  $3,50$  und  $3,70^\circ$ , dargestellt. Die adaptierten Werte setzen sich aus den drei untersuchten Stahlmarken zusammen, auf eine farbliche Kennzeichnung wurde aus Gründen der Einfachheit verzichtet. Weiterhin ist das im Modell für die Gerüste 1 bis 3 hinterlegte Reibgesetz für den Winkel  $3,60^\circ$  eingezeichnet (gelbe Linie).



**Abbildung 6.21:** Adaptierte Reibwerte sowie originales und angepasstes Reibgesetz für den Walzwinkel  $\alpha_0(G1) = 3,60^\circ$

Abbildung 6.22 zeigt analog die Adaptionsergebnisse für das Intervall  $2,98$  und  $3,18^\circ$  sowie die hinterlegte Reibwertkurve für den durchschnittlich in G2 vorliegenden Walzwinkel  $3,08^\circ$ .

In den Abbildungen 6.21 und 6.22 ist erkennbar, dass die festgelegten Reibwertkurven näherungsweise mit den Punktwolken der adaptierten Reibwerte für G1 und G2 übereinstimmen. Es fällt allerdings auf, dass für niedrige Walzgeschwindigkeiten die Reibwerte durch die Adaption tendenziell nach oben korrigiert wurden. Aus diesem Grund wurde das Reibgesetz so angepasst, dass sich für den Low-Speed-Bereich höhere Reibwerte ergeben. Das geänderte Reibgesetz ist ebenfalls in den Abbildungen 6.21 und 6.22 eingezeichnet (rote Linien) und stimmt für die Winkel  $3,60$  und  $3,08^\circ$  besser mit den jeweiligen Adaptionsergebnissen überein. Es ist zu beachten, dass das Reibgesetz für einen minimalen und einen maximalen Winkel vorgegeben wird und die Reibwertkurven für alle dazwischen liegenden Winkel interpoliert werden. Somit können die Reibwertkurven für zwei verschiedene Winkel nicht unabhängig voneinander angepasst werden, da



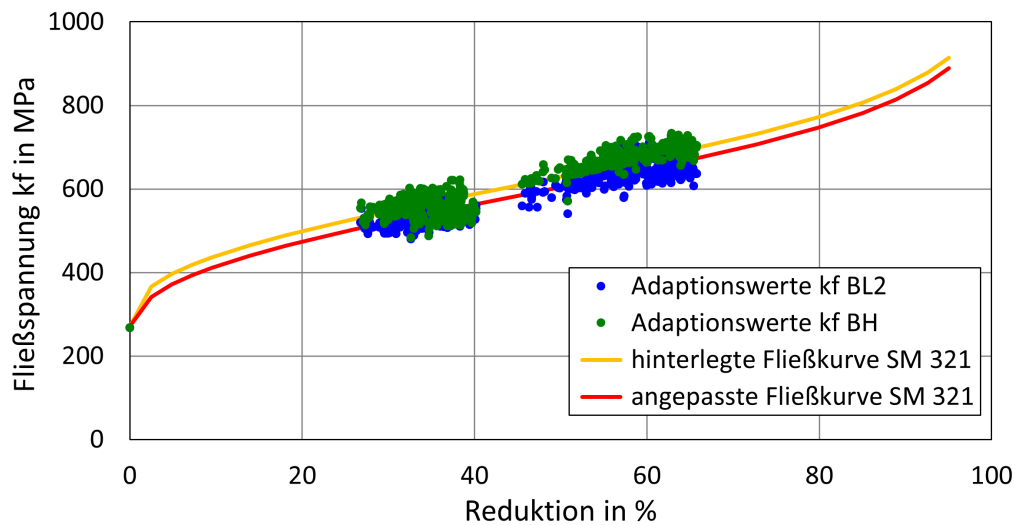
**Abbildung 6.22:** Adaptierte Reibwerte sowie originales und angepasstes Reibgesetz für den Walzwinkel  $\alpha_0(G2) = 3,08^\circ$

sie demselben übergeordneten Gesetz unterliegen. Die in den Abbildungen 6.21 und 6.22 eingezeichneten angepassten Reibwertkurven wurden somit durch die Parametrierung desselben übergeordneten Reibgesetzes erhalten. Da beide Reibwertkurven besser als die originalen Reibwertkurven mit den adaptierten Werten übereinstimmen, wird das Reibgesetz in dieser Form für weitere Rechnungen übernommen. Die zugehörige Wertetabelle ist in Tabelle B.2 im Anhang B aufgeführt. Die Wertetabelle zum originalen, im Fachgespräch mit Mathweis Engineering festgelegten Reibgesetz ist in Tabelle B.1 dargestellt.

### 6.2.3 Nutzung der Adaptionsergebnisse zur Anpassung der Fließkurve

Wie das Reibgesetz kann auch die für ein Material im Modell hinterlegte Fließkurve mithilfe der adaptierten Werte angepasst werden. Dies wird im folgenden Abschnitt anhand der Stahlmarke 321 erläutert. Die adaptierten Fließspannungswerte für die Gerüste 1 und 2 sind in Abbildung 6.23 aufgeführt.

Die hinterlegte Fließkurve (gelb) liegt für beide Gerüste in der Punktwolke der adaptierten Fließspannungswerte und muss daher nur dezent verändert werden. Die Fließspannung wurde anhand der Adaptionsergebnisse durch einen Offset leicht verringert, sodass die angepasste Fließkurve zentraler in der Punktwolke liegt. Die Anfangsfließspannung wurde von der Anpassung ausgenommen, da sie der experimentell gemessenen 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  entspricht. Der Einfluss der Umformgeschwindigkeit wird an dieser Stelle vernachlässigt, da die adaptierten Werte für die Geschwindigkeitsphasen BL2 und BH sich nur geringfügig unterscheiden und die resultierenden Punktwolken sich stark überschneiden. Die Wertetabelle der adaptierten Fließkurve ist in Tabelle B.6 in Anhang B aufgeführt.



**Abbildung 6.23:** Adaptierte Fließspannungswerte sowie originale und angepasste Fließkurve für die Stahlmarke 321

#### 6.2.4 Vergleichsrechnung für die Stahlmarke 321 mit adaptierten Werten

Zur Auswertung der Adaption wurden die Stichpläne für die Stahlmarke 321 ein weiteres mal berechnet. Dazu wurden das adaptierte Reibgesetz aus Kapitel 6.2.2 sowie die adaptierte Fließkurve für die Stahlmarke 321 aus Kapitel 6.2.3 als Eingangsgrößen für das Modell genutzt. Die Adaption wurde ausschließlich für das FE-Modell durchgeführt, sodass in den nachfolgenden Diagrammen jeweils die Ergebnisse des FE-Modells unter Berücksichtigung der adaptierten Fließ- und Reibwertkurven mit den Ergebnissen verglichen werden, die vom FE-Ansatz für die Stahlmarke 321 mit den nicht adaptierten Eingangsgrößen erzielt wurden. Dabei werden die Ergebnisse für die Gerüste 1 bis 3 der Übersichtlichkeit halber zusammengefasst, da die Tendenz der Änderungen für diese Gerüste gleich ist. Die Ergebnisse für die einzelnen Gerüste können in Anhang D eingesehen werden.

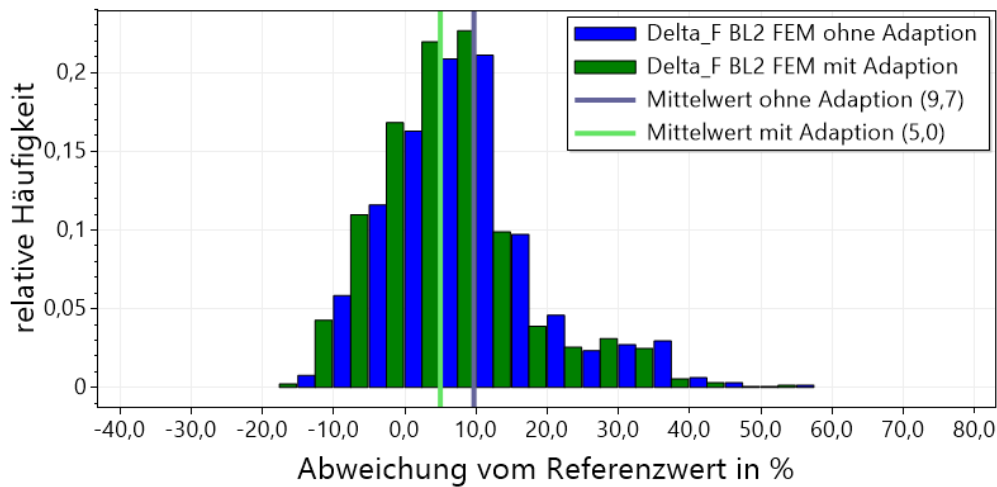
Abbildung 6.24 zeigt die Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte von den Referenzwerten mit und ohne Adaption. Die Streuung der Ergebnisse wurde durch die Adaption nicht signifikant verändert, die mittlere Abweichung wurde allerdings von 9,7 auf 5,0% verringert werden.

In Abbildung 6.25 sind die Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte dargestellt. Auch in dieser Phase ist keine Änderung der Streuung erkennbar, die mittlere Abweichung ist mit -11,0% allerdings im Vergleich zur Rechnung ohne Adaption (-4,4%) angestiegen.

Abbildung 6.26 zeigt die Abweichungen für die Phase BL2 berechneten Walzmomente. Die Streuung konnte durch die Adaption auch für die Momente nicht verringert werden, allerdings wurde die mittlere Abweichung von 20,8 auf 15,9% gesenkt.

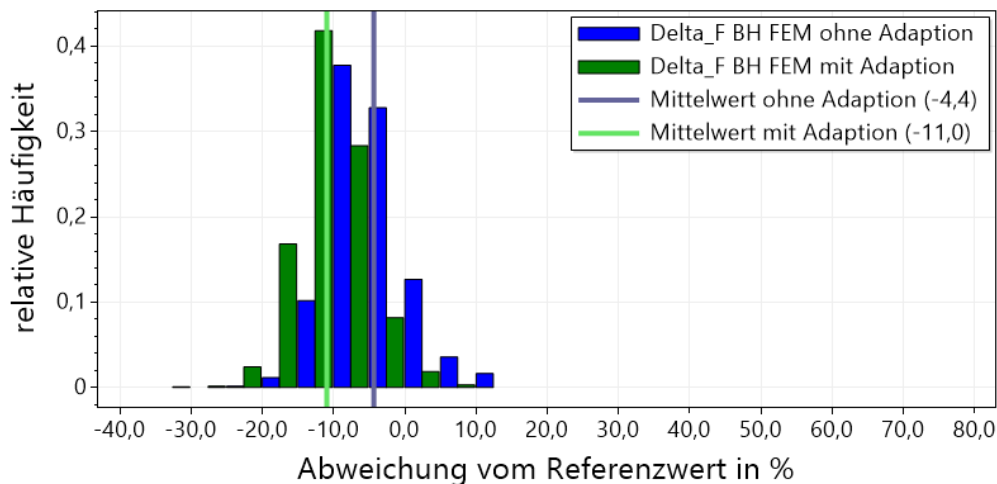
Auch die in Abbildung 6.27 dargestellten Abweichungen der berechneten Walzmomente





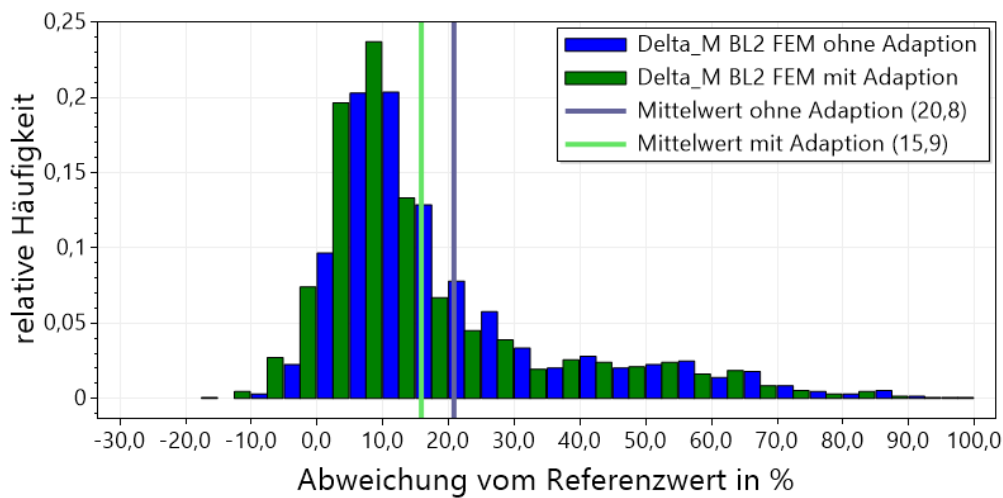
**Abbildung 6.24:** Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3)

für die Phase BH konnten im Durchschnitt gesenkt werden. Die mittlere Abweichung beträgt ohne Adaption 7,0%, mit Adaption 1,0%. Somit konnte in drei von vier Fällen die Vorhersagegenauigkeit im Durchschnitt durch die Adaption verbessert werden.



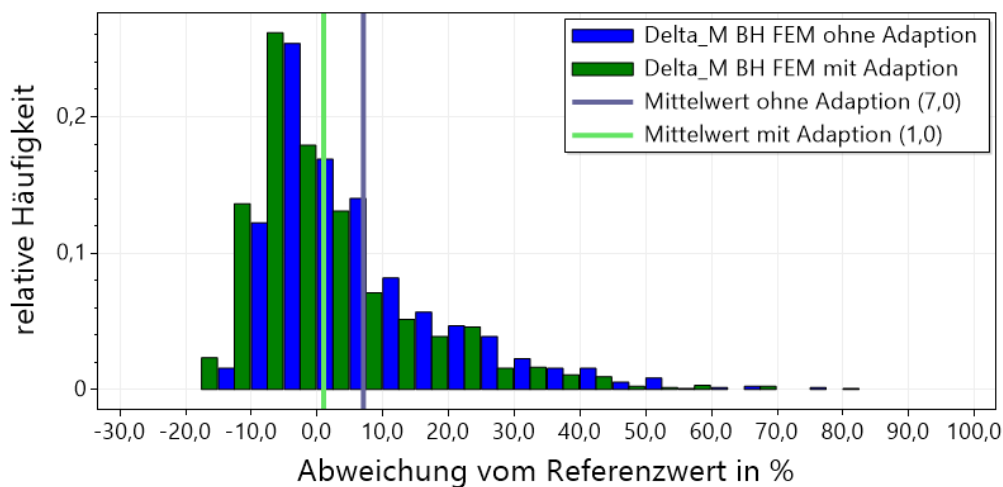
**Abbildung 6.25:** Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzkräfte mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3)

Die Streuung der Werte konnte nicht signifikant verbessert werden. Dies war jedoch zu erwarten, da durch die Adaption das Reibgesetz bzw. die Fließspannung lediglich verschoben wird. Die jeweils optimalen Fließspannungs- und Reibwerte sind allerdings Punktwolken mit einer gewissen Streuung (vgl. Abbildungen 6.20 bis 6.23). Das Ziel der Adaption ist also, die entsprechenden Reibwert- oder Fließkurven so zu verschieben, dass die Punktwolken möglichst gut durch die hinterlegten Gesetze abgebildet werden und somit die mittlere Abweichung sinkt. Die Streuung der adaptierten Ergebnisse selbst



**Abbildung 6.26:** Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BL2 berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3)

kann so allerdings nicht beeinflusst werden.



**Abbildung 6.27:** Vergleich der Abweichungen der mittels FEM für die Phase BH berechneten Walzmomente mit und ohne Adaption (SM 321, G1-G3)

Für Gerüst 4 konnte die Streuung der Abweichungen durch die adaptierten Werte für Fließspannung und Reibung aus den zuvor genannten Gründen ebenfalls nicht verbessert werden. jedoch konnte die mittlere Abweichung der Kräfte in beiden Phasen reduziert werden. Die mittlere Abweichung der Momente wurde nahezu nicht beeinflusst. Die entsprechenden Diagramme sind in Anhang D aufgeführt.

### 6.2.5 Bewertung der Adaption

Bei der Bewertung der Adaption müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Zunächst ist positiv zu bewerten, dass die in den Gerüsten 1 und 2 adaptierten Fließspannungen und Reibwerte für mehrere Materialien plausibel sind. Auch die Tatsache, dass die adaptierten Reibwerte für die verschiedenen Materialien im selben Bereich liegen, ist realistisch. Dies spricht ebenfalls dafür, dass die Adaption wie geplant funktioniert. Durch die Anpassung der Fließkurve für die Stahlmarke 321 und des Reibgesetzes anhand der Adaptionsergebnisse konnte weiterhin die Vorhersagegenauigkeit des Modells für die Stahlmarke 321 insgesamt leicht verbessert werden.

Demgegenüber stehen die Adaptionsergebnisse für G3, die für alle drei untersuchten Materialien unplausibel sind. In diesem Kontext fällt auf, dass auch die nicht adaptierten Berechnungsergebnisse für Walzkraft und Walzmoment in G3 eine im Vergleich zu G1 und G2 erhöhte Streuung aufweisen (vgl. Kapitel 6.1). Es besteht also die Möglichkeit, dass der Grund für die Adaption in G3 die höhere Streuung der Startwerte ist. Diese wiederum werden maßgeblich durch die Datenqualität der Eingangsgrößen beeinflusst. Ein möglicher Grund für fehlerhafte Modellwerte für Walzkraft und Walzmoment in G3 ist beispielsweise die fehlende Kenntnis der Ein- und Auslaufbanddicke in diesem Gerüst. Aufgrund fehlender Messungen werden die Banddicken mithilfe von Sollvoreilungen und gemessenen Walzenumfangsgeschwindigkeiten in G2 und G3 aus der Volumenkonstanz berechnet. Dabei stellen die genutzten Sollvoreilungen eine mögliche Fehlerquelle dar, die im nachfolgenden Kapitel 6.3 näher untersucht wird. Als weiterer möglicher Grund für die größeren Abweichungen zwischen berechneten Modell- und Ist-Werten in G3 können Fehler in der Datengrundlage oder der Datenaufbereitung nicht gänzlich ausgeschlossen werden, auch wenn die Referenzwerte in allen Gerüsten plausibilisiert wurden und anhand von bekannten Phänomenen und Beziehungen im Walzspalt erklärbar sind. Es ist daher ratsam, die Ergebnisse des FE-Modells im Allgemeinen und insbesondere der Adaption zum Vergleich für Daten von weiteren Anlagen zu untersuchen. In jedem Fall sollte die Adaption dahingehend angepasst werden, dass sie auf fehlerhafte Daten robuster reagiert. Eine Möglichkeit dazu wäre beispielsweise die Begrenzung der Adaption durch die Definition sinnvoller Wertebereiche für Material- und Reibgesetze. Auch bei schlechten Startbedingungen könnten somit die möglichen Adaptionsergebnisse für Fließspannung und Reibwert auf einen plausiblen Bereich beschränkt werden.

## 6.3 Untersuchung des Einflusses des Voreilungsfehlers auf die Eingangsgrößen des Walzmodells

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, liefert das FE-Modell von Mathweis Engineering und allpccloud für die Gerüste 1 und 2 gute Ergebnisse, während sowohl die Mittelwerte als auch die Streuungen der Abweichungen von Kräften und Momenten für G3 und G4

deutlich zunehmen. Auch die Adaption liefert für G1 und G2 plausible Ergebnisse, für G3 jedoch nicht (vgl. Kapitel 6.2). Da für die Banddicken  $h_E(G3)$  zwischen G2 und G3 sowie  $h_E(G4)$  zwischen G3 und G4 keine Messwerte vorliegen, werden an dieser Stelle im Modell Sollwerte genutzt. Im Folgenden soll untersucht werden, ob die Nutzung der Solldicken im Modell als Ursache für die abweichenden Modellwerte in G3 und G4 infrage kommt.

Zur Berechnung der Solldicken  $h_A^{\text{Soll}}(G2)$  und  $h_A^{\text{Soll}}(G3)$  wird zunächst der auf die Bandbreite bezogene Volumenstrom  $\dot{V}_b^{\text{Ist}}$  aus den gemessenen Ist-Werten für die Banddicke und die Bandgeschwindigkeit hinter G1 berechnet. Die Gleichung lautet

$$\dot{V}_b^{\text{Ist}} = h_A^{\text{Ist}}(G1) v_A^{\text{Ist}}(G1). \quad (6.2)$$

Nach der Volumenkonstanz lässt sich aus  $\dot{V}_b^{\text{Ist}}$  bei Kenntnis der vorliegenden Bandgeschwindigkeit an jedem Punkt im Tandem die Banddicke berechnen. Zur Ermittlung der Eingangsgrößen  $h_A^{\text{Soll}}(G2)$  und  $h_A^{\text{Soll}}(G3)$  für das Prozessmodell wurden die Geschwindigkeiten  $v_A^{\text{Soll}}(G2)$  und  $v_A^{\text{Soll}}(G3)$  berechnet. Dazu wurden die Walzenumfangsgeschwindigkeiten  $v_W^{\text{Ist}}(G2)$  und  $v_W^{\text{Ist}}(G3)$  sowie Sollwerte für die Voreilungen  $\kappa_V^{\text{Soll}}(G2)$  und  $\kappa_V^{\text{Soll}}(G3)$  genutzt. Die Voreilungssollwerte wurden für jedes Bund den für alle Bunde gespeicherten Datenbankeinträgen entnommen (Datei schedule.csv). Für die Sollgeschwindigkeiten gilt nach der Definition der Voreilung (Gleichung (2.36))

$$v_A^{\text{Soll}}(G2) = v_W^{\text{Ist}}(G2) \left[ 1 + \frac{\kappa_V^{\text{Soll}}(G2)}{100} \right] \quad (6.3)$$

und

$$v_A^{\text{Soll}}(G3) = v_W^{\text{Ist}}(G3) \left[ 1 + \frac{\kappa_V^{\text{Soll}}(G3)}{100} \right], \quad (6.4)$$

wobei  $\kappa_V^{\text{Soll}}(G2)$  und  $\kappa_V^{\text{Soll}}(G3)$  in Prozent angegeben werden müssen. Für die entsprechenden Banddicken ergeben sich somit die Gleichungen

$$h_A^{\text{Soll}}(G2) = \frac{\dot{V}_b^{\text{Ist}}}{v_A^{\text{Soll}}(G2)} = \frac{h_A^{\text{Ist}}(G1) v_A^{\text{Ist}}(G1)}{v_W^{\text{Ist}}(G2) \left[ 1 + \frac{\kappa_V^{\text{Soll}}(G2)}{100} \right]} \quad (6.5)$$

und

$$h_A^{\text{Soll}}(G3) = \frac{\dot{V}_b^{\text{Ist}}}{v_A^{\text{Soll}}(G3)} = \frac{h_A^{\text{Ist}}(G1) v_A^{\text{Ist}}(G1)}{v_W^{\text{Ist}}(G3) \left[ 1 + \frac{\kappa_V^{\text{Soll}}(G3)}{100} \right]}. \quad (6.6)$$

Die Voreilungen  $\kappa_V^{\text{Soll}}(G2)$  und  $\kappa_V^{\text{Soll}}(G3)$  sind also bei der Ermittlung der Zwischengerüsticken

$h_A^{\text{Soll}}(\text{G2})$  und  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G3})$  die einzigen nicht gemessenen Parameter, sodass nur sie als Ursache für eventuelle Banddickenfehler infrage kommen. Der Einfluss der Voreilung auf die Banddicke wird im Folgenden beispielhaft untersucht.

Zur Untersuchung des Einflusses eines Voreilungsfehlers auf die Banddicke wurden zunächst die Durchschnittswerte der in den Gleichungen (6.5) und (6.6) in der Datenbasis ermittelt. Diese sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Unter den in Tabelle 6.1 aufgeführten Bedingungen

Größe	Wert
$h_A^{\text{Ist}}(\text{G1})$	2,01 mm
$v_A^{\text{Ist}}(\text{G1})$	6,24 m/s
$v_W^{\text{Ist}}(\text{G2})$	9,74 m/s
$v_W^{\text{Ist}}(\text{G3})$	14,91 m/s
$\kappa_V^{\text{Soll}}(\text{G2})$	0,64%
$\kappa_V^{\text{Soll}}(\text{G3})$	0,84%

**Tabelle 6.1:** Arbeitspunkt für die Abschätzung des Einflusses des Voreilungsfehlers auf die Banddicke

ergeben sich die gesuchten Banddicken zu

$$h_A^{\text{Soll}}(\text{G2}) = 1,28\text{mm} \quad (6.7)$$

und

$$h_A^{\text{Soll}}(\text{G3}) = 0,83\text{mm}. \quad (6.8)$$

Nach Kämper (2020) sind bei berechneten Voreilungen Fehler von bis zu 3% durchaus realistisch. Bei Einsetzen der Voreilungswerte 3,64% und -2,36% für  $\kappa_V^{\text{Soll}}(\text{G2})$  ergeben sich die Banddicken  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G2}) = 1,24$  mm bzw.  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G2}) = 1,32$  mm. Dies entspricht einer Dickenänderung von -2,89% bzw. +3,07%.

In G3 führt das Einsetzen der Voreilungswerte 3,84% und -2,16% zu den Banddicken  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G3}) = 0,81$  mm bzw.  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G3}) = 0,86$  mm. Dies entspricht ebenfalls Abweichungen von -2,89% bzw. +3,07%. Somit kann festgehalten werden, dass der Dickenfehler die Größenordnung des Voreilungsfehlers besitzt und damit im Modell Banddickenfehler von bis zu ca. 3% auftreten können.

Neben der direkten Verwendung im Prozessmodell werden die Banddicken außerdem zur Berechnung der spezifischen Züge genutzt, die ebenfalls als Eingangsparameter in die Walzspaltberechnung eingehen. Diese berechnen sich aus dem gemessenen Absolutzug und der Bandquerschnittsfläche. Für den spezifischen Zug zwischen den Gerüsten  $i$  und

$j$  gilt

$$\sigma_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{h_{i,j} b}, \quad (6.9)$$

wobei  $T_{i,j}$  den Absolutzug und  $h_{i,j}$  die Banddicke zwischen  $G_i$  und  $G_j$  sowie  $b$  die Bandbreite darstellen. Zwischen G2 und G3 sowie zwischen G3 und G4 werden zur Berechnung die Sollmicken  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G2})$  und  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G3})$  genutzt, sodass für die Zwischengerüstzüge die Beziehungen

$$\sigma_{2,3}^{\text{Soll}} = \frac{T_{2,3}^{\text{Ist}}}{h_A^{\text{Soll}}(\text{G2}) b} \quad (6.10)$$

und

$$\sigma_{3,4}^{\text{Soll}} = \frac{T_{3,4}^{\text{Ist}}}{h_A^{\text{Soll}}(\text{G3}) b} \quad (6.11)$$

gelten. Somit wirken sich fehlerhafte Banddicken neben ihrem direkten Einfluss auch indirekt in Form der spezifischen Züge auf die Stichplanberechnung aus. Der Fehler des spezifischen Zuges liegt in derselben Größenordnung wie der Banddickenfehler und kann damit ebenfalls bis zu etwa 3% betragen.

Durch die Verwendung der Sollbanddicken im Modell werden also mehrere Fehler in Kauf genommen. Durch die Abweichung von  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G2})$  und  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G3})$  im Vergleich zu den im realen Prozess vorliegenden Banddicken können die Dickenabnahme und damit die Reduktion in den Gerüsten 2, 3 und 4 nicht exakt vorhergesagt werden. Dies führt zu Ungenauigkeiten bei den berechneten Walzkräften und -momenten. Weiterhin sorgen falsche Banddickenwerte für zusätzliche Fehler bei der Berechnung der spezifischen Züge, sodass die Berechnungsergebnisse für Kräfte und Momente weiter verfälscht werden. Zusammenfassend kann der Voreilungsfehler bei der Berechnung der Banddicken  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G2})$  und  $h_A^{\text{Soll}}(\text{G3})$  also nicht als Ursache für die fehlerhaften Berechnungsergebnisse in den Gerüsten 3 und 4 ausgeschlossen werden, da er einige weitere Fehler in der Walzspaltberechnung nach sich zieht. Der Einfluss des Voreilungsfehlers auf die Walzspaltberechnung sollte daher in zukünftigen Analysen weitergehend untersucht werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss der Arbeit werden in diesem Abschnitt die durchgeführten Untersuchungen sowie die wichtigsten gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Darüber hinaus werden in einem kurzen Ausblick potentielle Möglichkeiten für die weitere Entwicklung des Prozessmodells angesprochen.

Das übergeordnete Ziel der Arbeit war die Validierung und Erweiterung des Prozessmodells von Mathweis Engineering und allpcloud mithilfe von Anlagendaten, die von ArcelorMittal Eisenhüttenstadt zur Verfügung gestellt wurden. Im Zuge der Modellerweiterung sollte die Adaptionlogik von Mathweis Engineering in die Stichplanberechnung integriert werden, um eine automatisierte Adaption von Material- und Reibgesetzen zu ermöglichen.

Zur Erfüllung der Aufgabenstellung wurden zunächst die verfügbaren Daten, bestehend aus textbasiert gespeicherten Datenbankeinträgen sowie detaillierten Messdateien aus dem iba-System analysiert und aufbereitet. Die Daten wurden insbesondere im Hinblick auf die Definition von zwei repräsentativen Geschwindigkeitsphasen, einer Low-Speed- und einer High-Speed-Phase, untersucht, da diese für die Anwendung der Adaptionlogik benötigt werden. Es wurde festgestellt, dass die textbasiert gespeicherten Datenbankwerte nicht den gestellten Ansprüchen an die Daten entsprechen, somit konnten sie nicht zur Validierung des Modells genutzt werden. Daher wurde aus den Messdateien des iba-Systems eine Zusammenstellung von Datensätzen extrahiert, die eine zuvor definierte Anzahl an Kriterien bezüglich der Datenqualität erfüllen. Ein zentraler Bestandteil der so erstellten Datenbasis sind Ist-Werte für die Walzkraft und das Walzmoment, anhand derer die Vorhersagequalität der modellseitig berechneten Kräfte und Momente bewertet wurde. Da diese Ist-Werte für die Bewertung der Modellqualität eine zentrale Rolle spielen, wurden sie anschließend einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und bei Bedarf überarbeitet.

Anhand der plausibilisierten Datenbasis wurde anschließend die Vorhersagequalität des FE-Modells von Mathweis Engineering und allpcloud im Vergleich zum etablierten Walzmodell nach Bland, Ford und Ellis bewertet. Dazu wurden die Abweichungen der unter gleichen Randbedingungen berechneten Walzkräfte und -momente beider Modelle mit den aus den Messdateien extrahierten Ist-Werten verglichen.

Aufbauend auf der allgemeinen Bewertung des Modells wurde im nächsten Schritt die Funktionsweise der in das Modell implementierten Adaptionlogik für die drei im untersuchten Zeitraum am häufigsten gewalzten Materialien geprüft. Anschließend wurde auf Basis der Adaptionsergebnisse das im Modell hinterlegte Reibgesetz sowie das Materialgesetz für eine Stahlmarke überarbeitet. Zur Bewertung des adaptierten Material- und Reibgesetzes wurden diese in einem weiteren Berechnungsschritt als Eingangsgrößen für das FE-Modell genutzt. Abschließend wurde die Vorhersagequalität des Modells bezüglich Kräften und Momenten bei Nutzung der adaptierten Eingangsgrößen mit der Vorhersa-

gequalität unter Berücksichtigung des nicht adaptierten Material- und Reibgesetzes verglichen.

Die zentralen Erkenntnisse bezüglich der Vorhersagequalität des Prozessmodells im Allgemeinen sowie der Funktionalität der Adaption werden im Folgenden zusammengefasst:

- Der FE-Ansatz von Mathweis Engineering und allpcloud ist eine vielversprechende Alternative für die Vorhersage des Kraft- und Arbeitsbedarfs beim Walzen. Die in Kapitel 6.1 durchgeführte Modellvalidierung zeigt, dass die mittels FEM berechneten Walzkräfte und -momente für ein breites Spektrum an Materialien besser mit den an der Anlage gemessenen Ist-Werten übereinstimmen, als die unter gleichen Randbedingungen nach der Theorie nach Bland, Ford und Ellis berechneten Werte. Es ist jedoch zu beachten, dass Abweichungen zwischen den Ergebnissen der FEM und den Vergleichswerten in Gerüst 3 und insbesondere in Gerüst 4 eine starke Streuung aufweisen.
- Die Integration der automatisierten Adaption gemäß der Adaptionslogik von Mathweis Engineering in das Prozessmodell kann als teilweise erfolgreich bewertet werden. Bei der in Kapitel 6.2 durchgeführten Untersuchung wurden die in den Gerüsten 1 und 2 adaptierten Fließspannungen und Reibwerte als plausibel eingestuft. Anhand dieser Adaptionswerte wurden anschließend das Reibgesetz sowie die Fließkurve für eine Stahlmarke angepasst. Durch die Anpassungen von Material- und Reibgesetz konnte die Vorhersagegenauigkeit des FE-Modells bezüglich der Walzkräfte und -momente leicht verbessert werden.

In zukünftigen Untersuchungen ist anzustreben, die Gründe für die teilweise auftretenden hohen Streuungen der berechneten Modellwerte aufzudecken. Dabei sollte insbesondere die modellseitige Berechnung der Walzkräfte und Momente bei geringen Dickenabnahmen, wie an der betrachteten Anlage in Gerüst 4 der Fall, untersucht werden. Ein Ansatzpunkt könnte dabei der in Kapitel 6.3 angesprochene Einfluss von fehlerhaften Banddicken auf die Eingangsgrößen, und damit die Berechnungsergebnisse, des Modells sein. Um die Möglichkeit von Fehlern in den Anlagendaten oder bei der Datenaufbereitung weitergehend zu analysieren, ist ein Test des Modells auf weiteren Daten, idealerweise von anderen Anlagen, empfehlenswert. Die Produktvariation beispielsweise über die Bandbreite könnte Aufschluss über anlagenspezifische Fehlergrößen liefern.

Da an Tandemstraßen häufig das letzte Gerüst walzkraftgeregelt betrieben wird, sollte in der weiteren Entwicklung des Modells ebenfalls eine Möglichkeit zur Berechnung der Vorgänge im Walzspalt bei Vorgabe der Walzkraft integriert werden. Abweichungen von der Zieldicke bei modellierten Tandemstraßen müssten dann, wie in der Realität, durch



die Anstellungsregelung im zweitletzten Gerüst der Straße ausgeglichen werden. Die Integration der Modellierung von walzkraftgeregelten Gerüsten hätte außerdem den Vorteil, dass die meist nicht gemessene Banddicke zwischen vorletztem und letztem Gerüst nicht als Eingangsparameter benötigt würde.

Der Adaptionalgorithmus sollte ebenfalls anhand von weiteren Anlagendaten getestet werden, um die Gründe für die fehlerhafte Adaption in Gerüst 3 zu untersuchen. In jedem Fall sollte die Stabilität des Algorithmus erhöht werden, sodass die Adaption auch bei nicht optimalen Startwerten plausible Werte für die Fließspannung und den Reibwert liefert. Weiterhin ist bei der Weiterentwicklung der Adaptionslogik anzustreben, dass die im Modell hinterlegten Material- und Reibgesetze automatisch auf Basis der Adaptionsergebnisse angepasst werden.

# Literatur

- Bähr, A. und Falkenhagen, G., Herausgeber (1970). *Herstellung von kaltgewalztem Band*. Verl. Stahleisen, Düsseldorf.
- Becker, H. (1980). *Walzwerke: Maschinen und Anlagen*. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Behringer, J., Hensel, A., Jargstorf, P., Junghans, H., Klunker, H., Körsten, K., Loose, J., Naumann, G., Scharfenorth, U., Schneider, H. Weber, K.-H., und Wolodkiewicz, H. (1971). *Herstellung von Band und Blech: Teil 2*. Vortragsreihe, Bergakademie Freiberg.
- Bland, D. und Ford, H. (1948). The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 159:144–163.
- Bucher, T. und Dinter, B. (2008). Process Orientation of Information Logistics - An Empirical Analysis to Assess Benefits, Design Factors, and Realization Approaches. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Science*.
- Buchholz, F.-G. (1976). *Berechnung und Optimierung von Stichplänen für den stationären Betrieb kontinuierlicher Kalt- und Warmwalzstraßen*. Dissertation, Technische Universität München.
- Burnett, C. (2012). Optimization of a Cold Rolling Mill with a High Speed X-ray Thickness Gauge. White paper, Thermo Fisher Scientific. <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/Optimization-of-a-Cold-Rolling-Mill.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.04.2022.
- DIN 8582 (2003). *Fertigungsverfahren Umformen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Deutsche Norm. Beuth, Berlin.
- DIN 8583-2 (2003). *Fertigungsverfahren Druckformen - Teil 2: Walzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Deutsche Norm. Beuth, Berlin.
- Eigner, M. (2020). Digitaler Zwillling – Stand der Technik. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115(1):3–6.
- Ekelund, S. (1933). *Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling of Steel*.
- Feldmann, F., Gerdau, M., und Vollmer, A. (2009). Walzmodelle. Adaptive Modelle für die Gerüstvoreinstellung in Kaltwalzwerken. *ABB Technik*, 2009(1):43–48.

- Fleck, N. A. und Johnson, K. L. (1987). Towards a new theory of cold rolling thin foil. *International journal of mechanical sciences*, 29(7):507–524.
- Fleck, N. A., Johnson, K. L., Mear, M. E., und Zhang, L. C. (1992). Cold rolling of foil. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 206(2):119–131.
- Ford, H., Ellis, F., und Bland, D. (1951). Cold Rolling with Strip Tension, Part I: A New Approximate Method of Calculation and a Comparison with other Methods. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 168(1):57–72.
- Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., und Wall, W. A. (2021a). *Technische Mechanik 2: Elastostatik*. Springer Vieweg, 14. Auflage.
- Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., und Wall, W. A. (2021b). *Technische Mechanik 3: Kinetik*. Springer Vieweg, 15. Auflage.
- Hegemann, K.-R. und Guder, R. (2020). *Stahlerzeugung: Integrierte Hüttenwerks- und Gasreinigungsanlagen*. Springer Fachmedien Wiesbaden and Imprint Springer Vieweg, Wiesbaden, 1. Auflage.
- Heidari, A., Forouzan, M., und Akbarzadeh, S. (2014). Effect of Friction on Tandem Cold Rolling Mills Chattering. *ISIJ International*, 54:2349–2356.
- Heistermann, F., Mellè, T., und ten Hompel, M. (2017). Digitalisierung in der Logistik: Antworten auf Fragen aus der Unternehmenspraxis. Technical Report, Bundesvereinigung Logistik.
- Hensel, A. und Poluchin, P. I., Herausgeber (1990). *Technologie der Metallformung. Eisen- und Nichteisenmetalle*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1. Auflage.
- Hensel, A. und Spittel, T. (1978). *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. Deutscher Verlag für stoffindustrie, VEB, Leipzig, 1. Auflage.
- Herbertz, R., Hermanns, H., und Labs, R. (2013). *Massivumformung kurz und bündig*. Industrieverband Massivumformung e.V., Hagen.
- Hinkfoth, R. (2003). *Massivumformung*. Verlag Mainz, Aachen.
- Hitchcock, J. H. (1935). *Roll Neck Bearings*. Report of A.S.M.E. Special Research Committee on Heavy-Duty Anti-friction Bearings. The American Society of Mechanical Engineers, New York.
- Hoff, H. und Dahl, T. (1955). *Grundlagen des Walzverfahrens*, Band Bd. 9 in *Stahleisen-Bücher*. Verl. Stahleisen, Düsseldorf, 2. Auflage.

- Hoffmann, H., Neugebauer, R., und Spur, G., Herausgeber (2012). *Handbuch Umformen*. Hanser, München, 2. Auflage.
- Koll, T., Bretschneider, M., Klinkberg, T., Luther, F., und Maas, B. (2016). Optimierter Dressierprozess verbessert die Eigenschaften verzinkter Stahloberflächen. *Stahl und Eisen*, 2016(10):53–57.
- Kopp, R. und Wiegels, H. (1999). *Einführung in die Umformtechnik*. Verlag Mainz, Aachen, 2. Auflage.
- Kämper, J. (2020). Untersuchung des Einflusses der Geschwindigkeit in unterschiedlichen Prozesssituationen auf die Voreilung in einer Kaltwalz-Tandemstraße. Masterarbeit, Technische Universität Dortmund.
- Lange, K., Herausgeber (1988). *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 2: Massivumformung*. Springer Berlin Heidelberg, 2. Auflage.
- Lange, K., Herausgeber (2002). *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 1: Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg, 2. Auflage. Nachdr. 2002 in veränd. Ausstattung.
- Lippmann, H. und Mahrenholtz, O. (1967). *Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe*. Springer Berlin Heidelberg.
- Lyman, P. und Varian, H. R. (2000). How Much Information? 2000. Technical Report, Berkeley University of California.
- Lyman, P. und Varian, H. R. (2003). How Much Information? 2003. Technical Report, Berkeley University of California.
- Mিকেвичиус, P. (2009). 3D Finite Difference Computation on GPUs Using CUDA. In *Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units, GPGPU-2*, Seite 79–84, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Orowan, E. (1943). The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 150(1):140–167.
- Overhagen, C. (2018). *Modelle zum Walzen von Flach- und Vollquerschnitten*. Dissertation, Essen, Universität Duisburg-Essen, Duisburg.
- Pawelski, H. (2017). Walzwerktechnik und die Prozesskette des Walzens. Technical Report, RWTH Aachen.

- Pawelski, H. und Pawelski, O. (2000). *Technische Plastomechanik: Kompendium und Übungen*. Verl. Stahleisen, Düsseldorf.
- Pengfei, W., Yan, P., Dongcheng, W., Jie, S., Dianhua, Z., und Hongmin, L. (2016). Flatness Control Strategy Based on Delay Compensation for Cold Rolling Mill. *steel research international*, 88.
- Pittner, J. und Simaan, M. A. (2011). *Tandem cold metal rolling mill control: Using practical advanced methods*. Advances in industrial control. Springer, London and Heidelberg.
- Rahmad, M. H., Meng, S. S., Karuppiah, E. K., und Ong, H. (2011). Comparison of CPU and GPU implementation of computing absolute difference. In *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Seiten 132–137.
- Schwenzfeier, W. (1979). *Walzwerktechnik: Ein Leitfaden für Studium und Praxis*. Springer Vienna, Vienna.
- Siebel, E. (1924). Kräfte und Materialfluss bei der bildsamen Formänderung. *Bericht des Walzwerksausschusses des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute*.
- Spendla, L., Kebisek, M., Tanuska, P., und Hrcka, L. (2017). Concept of predictive maintenance of production systems in accordance with industry 4.0. In *2017 IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, Seiten 405–410.
- Statista (2018). Prognose zum Volumen der jährlich generierten digitalen Datenmenge weltweit in den Jahren 2018 und 2025. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/267974/umfrage/prognose-zum-weltweit-generierten-datenvolumen/>, zuletzt abgerufen am 08.04.2022.
- Teupel, F.-K., Herausgeber (1980). *Grundlagen der Metallurgie*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage.
- Tresca, H. (1864). *Mémoire sur l'écoulement des solides à de forte pressions*. Gauthier-Villars-Verlag, Paris.
- v. Kármán, T. (1925). 8. Beitrag zur Theorie des Walzvorganges. *Zamm - Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 5:139–141.
- v. Mises, R. (1913). Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1913:582–592.

- Wagner, F., Schmuki, R., Wagner, T., und Wolstenholme, P. (2006). *Modeling Software with Finite State Machines: A Practical Approach*. Auerbach, Boca Raton, FL.
- Wandinger, J. (2020). Ebene Elastizitätstheorie. Technical Report, Hochschule München.
- Weber, K. (1974). *Grundlagen des Bandwalzens: Mit 30 Tabellen*. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1. Auflage.
- Wehr, M. (2021). *Selbstoptimierende Banddickenregelung zum hochpräzisen Kaltwalzen mit piezoelektrischen Aktoren*. Dissertation, RWTH Aachen.
- Wortmann, F. und Flüchter, K. (2015). Internet of Things: Technology and Value Added. *Business & Information Systems Engineering*, 57(3):221–224.