

**Entwicklung eines Überwachungssystems
für
Strangguss – Kokillen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau
der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Frank Weissbuch

aus

Duisburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dieter Wunsch

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht

Prof. Dr. Ing. Hans – Dieter Kochs

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juli 2006

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand überwiegend während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter am Institut für Mechatronik in Moers.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Wunsch danke ich aufrichtig für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht und Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans–Dieter Kochs danke ich für die Übernahme der Korreferate, die kritische Durchsicht der Arbeit und das entgegengebrachte Interesse.

Besonderer Dank gilt den ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für Mechatronik Herrn Dipl.-Ing. Michael Schwarz, Herrn Dipl.-Ing. Guido Kleipass sowie Herrn Dipl.-Ing. Wolf Mißmahl, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen Wegbegleitern an der Universität Duisburg – Essen möchte ich danken, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Ulrich Klein und Frau Dr.-Ing. Gudrun Stockmanns, die die kritische Durchsicht des letzten Kapitels übernahm.

Weiterhin möchte ich mich bei der Firma Mannesmann Demag, Duisburg für die Unterstützung bei den Forschungsarbeiten bedanken. Mein besonderer Dank gilt hier Herrn Dipl.-Ing. Horst von Wyl für die wertvollen Anregungen und Hilfestellungen bei der Durchführung der Arbeit.

Dinslaken, im August 2006

Frank Weissbuch

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	ZIELSETZUNG	3
3	SYSTEMBESCHREIBUNG	4
	3.1 AUFBAU EINER STRANGGIEßANLAGE	4
	3.2 KOKILLE	7
4	STAND DER TECHNIK BEI DER KOKILLENÜBERWACHUNG	10
5	REIBUNG ZWISCHEN STRANG UND KOKILLE	12
	5.1 REIBUNGSARTEN	13
	5.1.1 <i>Viskose Reibung</i>	15
	5.1.2 <i>Coulomb'sche Reibung</i>	16
	5.1.3 <i>Stribeck – Kurve</i>	18
6	REIBKRAFTERMITTLUNG	19
	6.1 DIFFERENZIALGLEICHUNGSMETHODE	20
	6.2 HYSTERESE-MODELL	21
	6.3 HYSTERESEFORM	23
	6.4 BEOBACHTER-MODELL	26
7	ÜBERWACHUNGSMETHODEN	28
	7.1 ABSOLUTWERTKONTROLLE	28
	7.2 TRENDKONTROLLE	28
	7.3 SIGNALVORHERSAGE	30
	7.4 ABSTANDSKLASSIFIKATOR	30
	7.5 WISSENSBASIERTER ÜBERWACHUNG	31
	7.6 KÜNSTLICHE NEURONALE NETZE	35
8	PRÜFSTANDANWENDUNG	38
	8.1 MECHANISCHER AUFBAU DES PRÜFSTANDES	38
	8.2 VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	41
	8.3 ERGEBNISSE DER PRÜFSTANDANWENDUNG	42
	8.3.1 <i>Leerlaufreibung</i>	42
	8.3.2 <i>Differenzialgleichungsmethode</i>	44
	8.3.3 <i>Hysterese</i>	44
	8.3.4 <i>Hystereseform</i>	46
	8.3.4 <i>Beobachter</i>	46
	8.4 FAZIT / ZUSAMMENFASSUNG	48
9	ERGEBNISSE AUS EINER STRANGGIEß – ANLAGE	51
	9.1 GIEßEREIGNISSE BEI STÖRUNGSFREIEM GIEßBETRIEB	54
	9.1.1 <i>Gießbeginn</i>	54
	9.1.2 <i>Gießende</i>	55
	9.1.3 <i>Verteilerwechsel</i>	56
	9.1.4 <i>Breitenverstellung</i>	59
	9.1.5 <i>Änderungen der Gießgeschwindigkeit</i>	61
	9.1.6 <i>Gießpulverzugabe</i>	63
	9.1.7 <i>Abschlacken</i>	65
	9.2 STÖRFÄLLE	66
	9.2.1 <i>Kleber</i>	66
	9.3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	71
	9.4 DATENFERNAKQUISITION	73
10	KONZEPT EINER ZUSTANDSÜBERWACHUNG	76

10.1	Globale Aufgaben und Ziele eines Überwachungssystems	76
10.2	Erster Entwurf eines Überwachungssystems	82
10.3	Validierung der Systemkonfiguration	99
10.4	Zweiter Entwurf eines Überwachungssystems	103
	10.4.1 Hysterese Monitoring	105
	10.4.2 Radiale – Basisfunktionen – Netze	106
	10.4.3 Validierung des zweiten Entwurfes	110
11	 ZUSAMMENFASSUNG	119
12	 NOMENKLATUR	122
13	 LITERATURVERZEICHNIS	124
14	 LEBENS LAUF	129

1 Einleitung

In hochindustrialisierten Ländern werden heute ca. 90 % des Stahls kontinuierlich in Strängen abgegossen. Der ursprüngliche Kokillenblockguss war mit hohen Ausbringungs- und Energieverlusten bei den Verformungsschritten verbunden und wird heute nur noch in Sonderanwendungen genutzt. Bereits Ende des 18. Jahrhunderts existierte die Idee, Stahl kontinuierlich in Strängen abzugießen [Dae89]. Die Umsetzung dieser Idee in ein wirtschaftliches Konzept war damals jedoch technisch nicht realisierbar, so dass dieses Verfahren erst 80 Jahre später industriell genutzt werden konnte.

In der Zeit zwischen 1920 und 1935 wurde zunächst das Stranggießen von Nichteisenmetallen, insbesondere von Kupfer und Aluminium entwickelt. Kennzeichnend für diese Anlagen war und ist noch heute die gerade, feststehende Kokille und eine niedrige Gießgeschwindigkeit von etwa 0.6 m/min [Sch87].

Die entscheidende Idee, die das Stahlstranggießen mit hohen Gießgeschwindigkeiten erst ermöglichte und damit wirtschaftlich interessant machte, war die Erkenntnis, dass die Kokille mit dem Strang eine gewisse Strecke mitwandern muß, um die Zerstörung der Strangschale beim Herausziehen des Stranges aus der Kokille zu vermeiden.

Im Jahre 1933 setzte S. Junghans erstmals eine oszillierende Kokille in einer Stranggießanlage für Kupfer und Aluminium ein [Jun 38]. Nach dem Verfahren von Junghans wandert die Kokille mit gleicher Geschwindigkeit wie der Strang abwärts und mit erhöhter Geschwindigkeit in ihre Ausgangslage zurück.

Erste ernst zu nehmende Versuche, Stahl im Strang zu gießen, wurden sowohl in Deutschland als auch in den USA in den Jahren 1940 bis 1946 unternommen.

Heute gießen mehrere große Hüttenwerke ihre gesamte Rohstahlproduktion über Stranggießanlagen ab. Hierbei werden Gießgeschwindigkeiten von 5m/min erreicht. Die Ausbringung liegt bei ca. 300.000 t/Monat pro Strang.

Kernstück jeder Stranggießanlage ist die Kokille. Durch die Kokille wird der Querschnitt des Stranges festgelegt, und der flüssige Stahl beginnt hier zu erstarren, wodurch die Strangschale entsteht. Die ständige Oszillation zwischen Strangschale und Kühlplatte bewirkt die

gegenüber der Haftreibung geringere Gleitreibung und verhindert so ein Abreißen der Strangschale. Die verschiedenen Strangformate erfordern unterschiedliche Kokillentypen. Man unterscheidet drei Kokillentypen:

Blockkokille

Rohrkokille

Plattenkokille

Alle Kokillentypen können gerade oder gebogen ausgeführt sein. Für größere Formate, vor allem für Brammen, kommen heute fast ausschließlich Plattenkokillen zum Einsatz. Die Plattenkokille besteht im allgemeinen aus zwei großen Kupferplatten für die Breitseiten sowie zwei für die

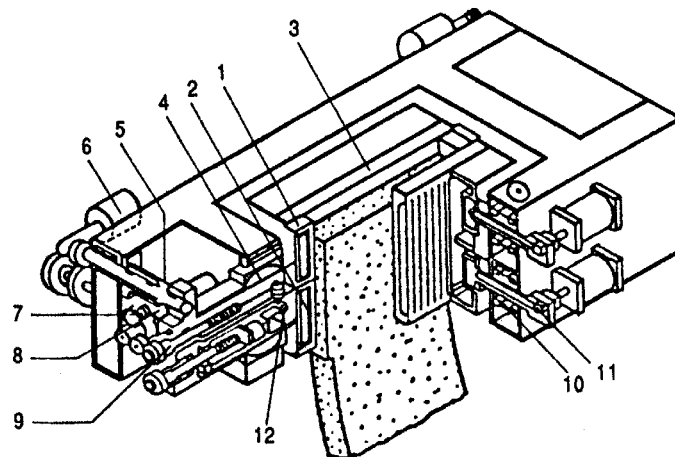


Bild 1.1: Plattenkokille [Sch92] mit 1. obere Schmalseiten, 2. untere Schmalseiten, 3 Breitseiten, 4. Käfig mit Drehsegment, 5. Exzenter, 6 Antrieb, 7. Stellungsanzeiger, 8. Verstellmotor, 9. Spindel, 10. Öffnungsmechanismus zum Breitenwechsel, 11. Anpressung zum Gießen, 12. Arretierung der Schmalseiten

Die Erzeugung der Kokillenoszillation erfolgte nahezu ausschließlich mit Hilfe von Exzenterrollen, die elektromotorisch angetrieben werden. Heutzutage werden immer mehr hydraulische Antriebe verwendet, die in Verbindung mit der von Mannesmann Demag entwickelten blattfedergelagerten Kokille nahezu jede Oszillationsform gestattet.

In der Kokille und deren Betrieb liegen jedoch auch etliche Fehlerquellen, die zu Strangfehlern wie z.B. Längs-, Kantenlängs- und Querrissen sowie zu lokalen Austritten von Flüssigstahl aus der Strangschale (sog. *Bluter*) bis hin zu Strangschalenabrissen (sog.

Durchbrüche) führen. Die mechanischen Komponenten der Kokille unterliegen hohen Beanspruchungen und führen bei Versagen zu kostenintensiven Gießabbrüchen. Weiterhin entstehen durch die Reduktion der Gießgeschwindigkeit infolge der Reaktion der Temperaturüberwachung auf Temperaturveränderungen erhebliche Produktionsverluste.

Demzufolge sind umfangreiche Überwachungs- und Diagnosemaßnahmen zur Sicherung eines störungsfreien Kokillenbetriebes technisch notwendig und wirtschaftlich vertretbar.

Im praktischen Gießbetrieb haben thermische Überwachungsmethoden bisher die besten Ergebnisse zur Detektion von lokalen Austritten von Flüssigstahl bzw. zur Durchbrucherkennung geliefert. Der Trend zu immer höheren Gießgeschwindigkeiten setzt jedoch den thermischen Verfahren eine Grenze. Aufgrund der hohen Stranggeschwindigkeit kommt es zu keinem ausreichenden Temperatenausgleich zwischen dem zu messenden Objekt und den Thermoelementen. Globale Änderungen in der Kontaktzone zwischen Strang und Kokille, wie z.B. ein Ansteigen der Reibung aufgrund von Mangelschmierung, können mit den thermischen Verfahren nicht oder zu spät detektiert werden und führen unerkannt zu Strangdurchbrüchen. Ein weiteres Problem stellt der hohe Wartungsaufwand der bis zu 60 Sensoren pro Kokille dar.

Aus diesen Gründen ist die Entwicklung alternativer Überwachungstechniken erforderlich. Hierbei erscheint eine Neuentwicklung speziell in Verbindung mit der von Mannesmann Demag entwickelten blattfedergelagerten Kokille sinnvoll, da sie über einige, im weiteren noch beschriebene Vorteile gegenüber herkömmlichen Kokillen mit Exzenterrollenantrieb verfügt.

2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und der Vergleich von Analyse- und Klassifikationsverfahren zur sicheren Detektion von Störungen des Gießbetriebes in der Kokille. Ein wesentlicher Indikator für die Schadensentwicklung ist die Variation der Reibungsverhältnisse zwischen Kokillenwandung und Strangschale. Die quantitative Erfassung dieser Reibverhältnisse ist daher primär die Grundlage von Überwachungsmaßnahmen. Hierbei ist es wünschenswert, soweit wie möglich auf zusätzliche Sensorik zu verzichten, um den Wartungs- und Instandhaltungsaufwand so gering wie

möglich zu halten. Als Zielsystem eignen sich daher besonders die hydraulisch angetriebenen Kokillen, da sie bereits über die notwendige Sensorik zur Kokillenregelung verfügen.

Die Erprobung und Beurteilung von Analyseverfahren zur Quantifizierung der Reibung zwischen Kokillenwand und Strangschale erfolgt zunächst an einem Prüfstand einer Vorblockanlage, der definierte Variationen relevanter Gießparameter gestattet. Anschließend kommen die so entwickelten Verfahren an einer Brammenanlage unter Produktionsbedingungen zum Einsatz. Hierbei werden Klassifikationsverfahren eingesetzt und bewertet, die aufgrund der großen Anzahl variabler Gießparameter und -bedingungen besonderen Anforderungen unterliegen.

Neben der primären Zielsetzung der quantitativen Reibkraftbestimmung¹ sollen weiterhin folgende Fehlerzustände sicher erkannt werden:

- Bruch oder Spiel in der Antriebsstange der Servozylinder
- Defekte in der Blattfederanlenkung
- Mangelnde Synchronität der Antriebszylinder einer Brammenkokille
- Defekte an den Hydraulikzylindern
- Gießpulvermangel

Den Abschluß der Arbeit stellt die Umsetzung der Ergebnisse und Verfahren in ein Überwachungssystem für Kokillen dar.

3 Systembeschreibung

3.1 Aufbau einer Stranggießanlage

Beim Stranggießprozess fließt der flüssige Stahl aus der Pfanne durch den Verteiler in die Kokille (**Bild 3.1**). Die mit Stahl gefüllte Pfanne hängt in einem drehbaren Turm, der zwei Pfannen aufnehmen kann. Bei leer gelaufener Pfanne wird durch Drehen des Turms ein Pfannenwechsel durchgeführt.

¹ Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Begriff der Reibkraft beschreibt exakt eine durch die Reibung zwischen Strang und Kokille beeinflusste Größe.

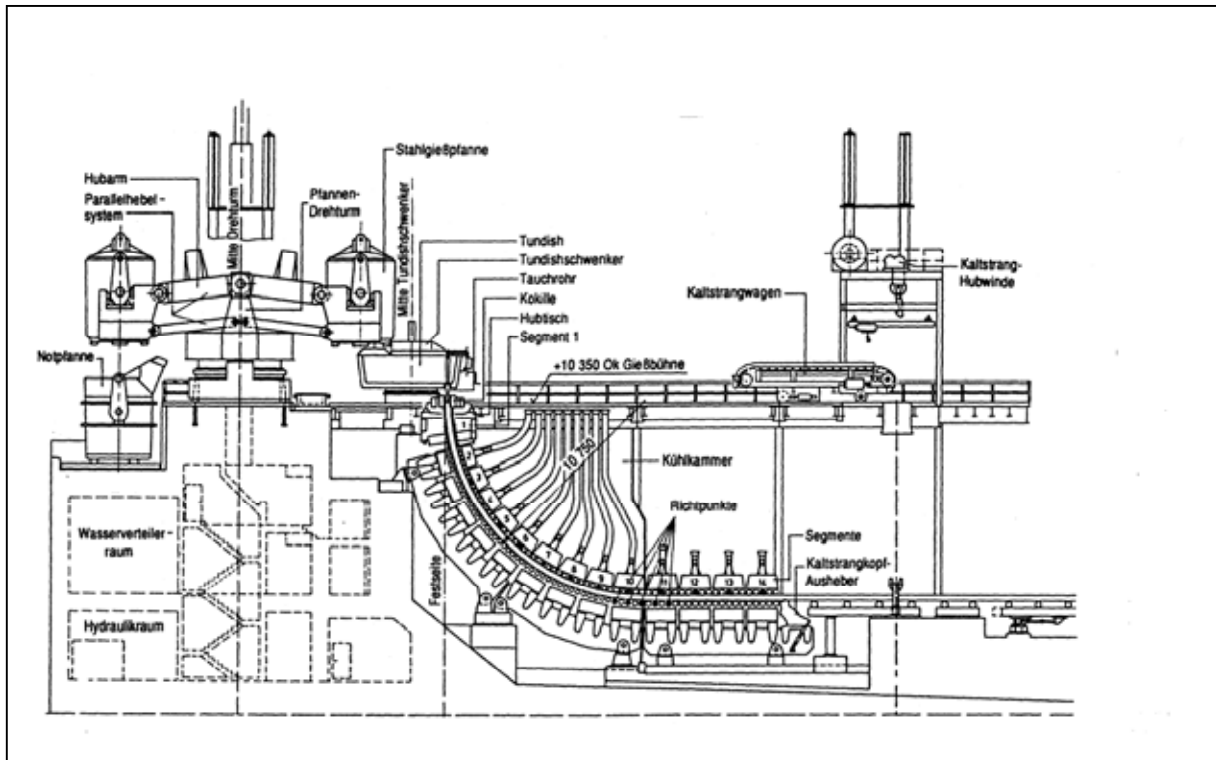


Bild 3.1: Prinzipskizze einer Kreisbogenstranggießanlage [Sch92]

Der Stahl wird aus der Pfanne durch eine Gießhaube in den Verteiler geleitet. Die Gießhaube sitzt auf dem Verteiler und wird ständig mit Argon geflutet, um eine Reoxidation des Stahls zu vermeiden.

Der Verteiler dient bei einem Pfannenwechsel als Speicher, um einen kontinuierlichen Gießbetrieb zu gewährleisten. Er läuft langsam leer, während die volle Pfanne durch den Pfannenturm in Position gebracht wird. Eine weitere Aufgabe des Verteilers ist es, die turbulenten Strömungen in der Stahlschmelze durch die Verweilzeit des Stahls im Verteiler zu verringern. Dadurch wird die Qualität der Brammen verbessert und Störfälle beim Gießen werden vermindert.

Aus dem Verteiler gelangt der flüssige Stahl über ein Tauchrohr in die Kokille. Die Öffnung des Tauchrohres befindet sich unterhalb des Gießspiegels in der Kokille, um die Reoxidation mit der Umgebungsluft zu vermeiden. Damit auch die Oberfläche des Stahlbades in der Kokille nicht mit der Umgebungsluft in Berührung kommt, wird der Stahlspiegel mit Gießpulver abgedeckt.

Das nach kurzer Zeit aufgeschmolzene Gießpulver hat außerdem die Aufgabe, einen Schmierfilm zwischen Strangschale und Kokillenwand zu bilden.

Die Kokille ist das formgebende Element einer Stranggießanlage. Bei einer Brammenstranggießanlage besteht die Kokille aus vier zu einem Rechteck angeordneten

Kupferplatten, die auf sogenannten Wasserkästen befestigt sind, in denen das Kühlwasser zirkuliert. Die längere Seite einer Kokille wird als Breitseite und die kürzere als Schmalseite bezeichnet. Die noch dünne und heiße Strangschale in der Kokille reagiert sehr empfindlich auf Zugspannungen. Damit sie unversehrt aus der Kokille gezogen werden kann, reicht es nicht, die Reibung zwischen Strang und Kokille durch das aufgeschmolzene Gießpulver gering zu halten. Zusätzlich muß die Strangschale in periodischen Zeitabständen durch eine schnellere Abwärtsbewegung der Kokille unter Druckspannungen von der Kokille gelöst werden. Dies wird durch eine Oszillationsbewegung der Kokille längs des Stranges erreicht, wenn die Kokillengeschwindigkeit größer als die Stranggeschwindigkeit ist. Die Zeitdauer während dieses Vorganges wird Negativ-Stripzeit genannt.

Durch die starke Kühlung an den Kupferplatten erstarrt der einfließende Stahl und bildet eine Strangschale (**Bild 3.2**).

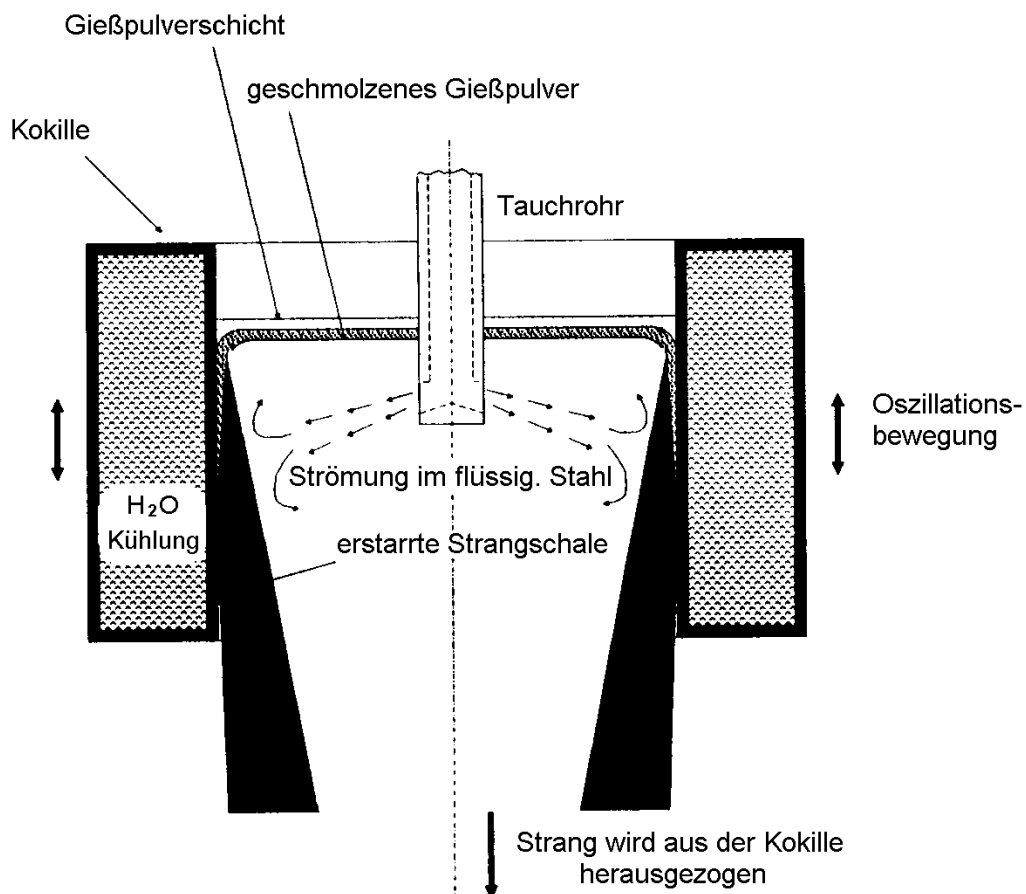


Bild 3.2: Strangbildung in der Kokille [Per91]

Das sich bildende Rechteckprofil wird durch das Rollengerüst, das (in einem Kreisbogen angeordnet) unterhalb der Kokille sitzt, langsam aus der Kokille gezogen. Da der Stahl beim

Erstarren schrumpft, müssen die Kupferplatten in Richtung des Kokillenaustrittes konisch zulaufen, um eine optimale Kühlung der Strangschale zu gewährleisten. Damit die noch sehr dünne Strangschale weiter wächst, wird sie unterhalb der Kokille über Spritzdüsen zwischen den Rollen kontinuierlich mit Wasser gekühlt. Das Rollengerüst besteht aus mehreren Segmenten, die wiederum aus mehreren Stütz- und Antriebsrollen zusammengesetzt sind. Nach dem Verlassen des letzten Segmentes wird der nun ganz erstarrte Strang durch Brennschneidmaschinen in Brammen geschnitten, die entweder direkt in das Walzwerk zur Weiterverarbeitung oder zur Abkühlung zu den Lagerstätten befördert werden.

3.2 Kokille

Die Kokille ist für die Formgebung und Ausbildung der Strangoberflächen das wichtigste Anlagenteil. Durch sie wird der Querschnitt des Stranges festgelegt. Der flüssige Stahl beginnt in der Kokille zu erstarren. Dadurch entsteht die Strangschale, deren Stärke am Kokillenaustritt je nach Gießgeschwindigkeit zwischen 10 und 30 mm beträgt.

Mannesmann Demag entwickelt und vertreibt seit einiger Zeit eine neue Generation von Stranggießkokillen. (**Bild 3.3**). Die wesentlichen Merkmale der Kokille sind der Wegfall des herkömmlichen Hubtisches und die Aufhängung des schwingenden Kokillenkörpers in Blattfedern.

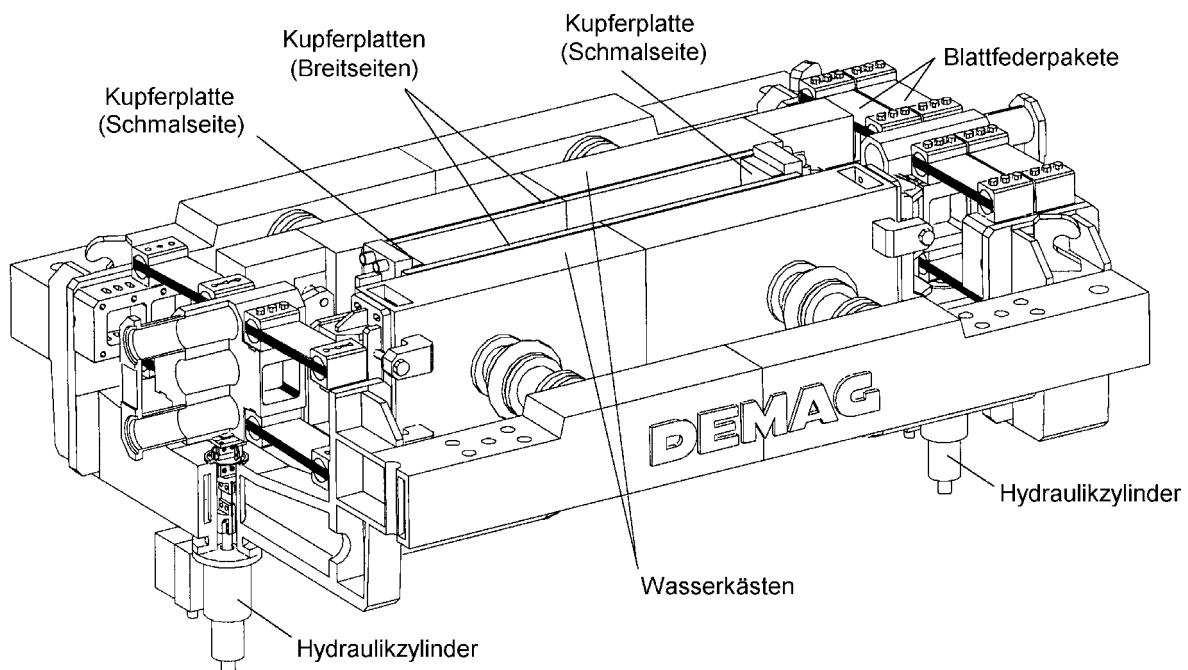


Bild 3.3: Entwurfskizze einer Kokille für Brammen [Boe94]

Die Blattfedern haben die Hauptaufgaben, den Kokillenkörper auf der durch den Gießradius vorgegebenen Kreisbahn zu führen und die Oszillationsbewegung zu unterstützen. Dabei sind die Blattfedern so ausgelegt, dass die erste Eigenfrequenz des mechanischen Systems im Bereich der höchsten zu erwartenden Betriebshubzahl liegt. Die Verwendung von Blattfedern hat eine spiel- und verschleißfreie Anlenkung zur Folge, wodurch eine hohe Führungsgenauigkeit erzielt wird. Aufgrund der Federanbindung wird eine Reduzierung der oszillierenden Masse erzielt, die die Dynamik des Systems weiter verbessert. Dadurch sind hohe Frequenzen bei geringen Hubhöhen sowie die saubere Realisierung nicht-sinusförmiger Schwingungsformen sicher beherrschbar. Ein weiterer Vorteil der Resonanzkokille ist die Reduzierung der benötigten Antriebsleistung durch weitestgehende Kompensation der Gewichts- und Trägheitskräfte. In **Bild 3.4** ist die Kokillenoszillation einer blattfedergelagerten Kokille für Brammen schematisch dargestellt.

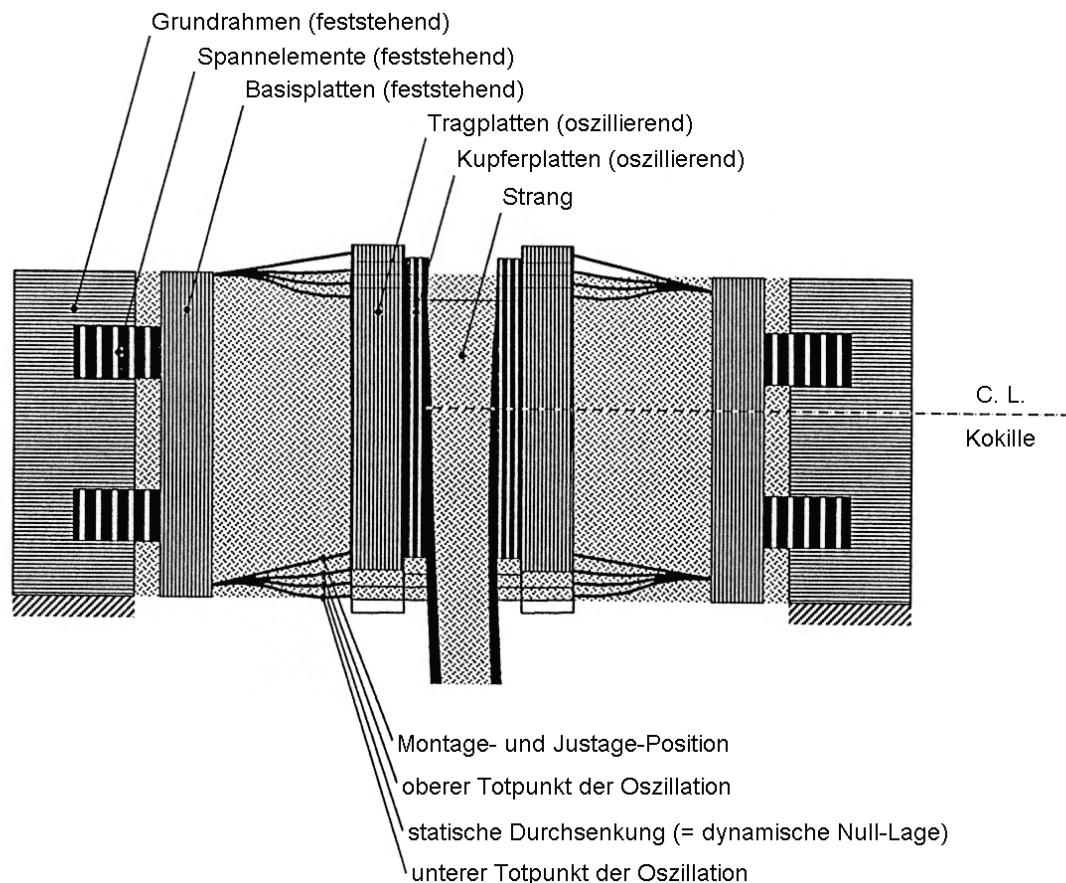


Bild 3.4: Prinzipskizze der Kokillenoszillation (Brammenkokille) [Man94]

Die Resonanzkokille ist mit einem servohydraulischen Antrieb ausgestattet. Zwei Hydraulikzylinder werden direkt über eingebaute Servoventile angesteuert. Sie sind mit integrierten Weggebern versehen, deren Ausgangssignale kontinuierlich mit den gegebenen

Positions-Sollwerten verglichen werden. Eine Differenz zwischen Soll- und Istwert wird direkt ausgeglichen. Die zu regelnde Position kann, wie im Fall der Kokillenzoszillationsregelung, auch Funktion der Zeit sein. Dabei macht es für Regelung und Antrieb kaum einen Unterschied, ob diese Funktion durch ein einfaches Sinus-Gesetz oder einen beliebigen anderen Algorithmus beschrieben ist.

Der Regler befindet sich in einem PC. Dieser PC hat die Gleichlaufregelung der beiden Zylinder, die Generierung der Sollwertkurve sowie die Kommunikation mit dem Bediener zur Aufgabe. Dabei sind die Regelfunktionen auf einer im PC gesteckten Prozessorkarte mit Echtzeitbetriebssystem, die aus Gründen der Betriebssicherheit unabhängig vom Hauptprozessor arbeiten kann.

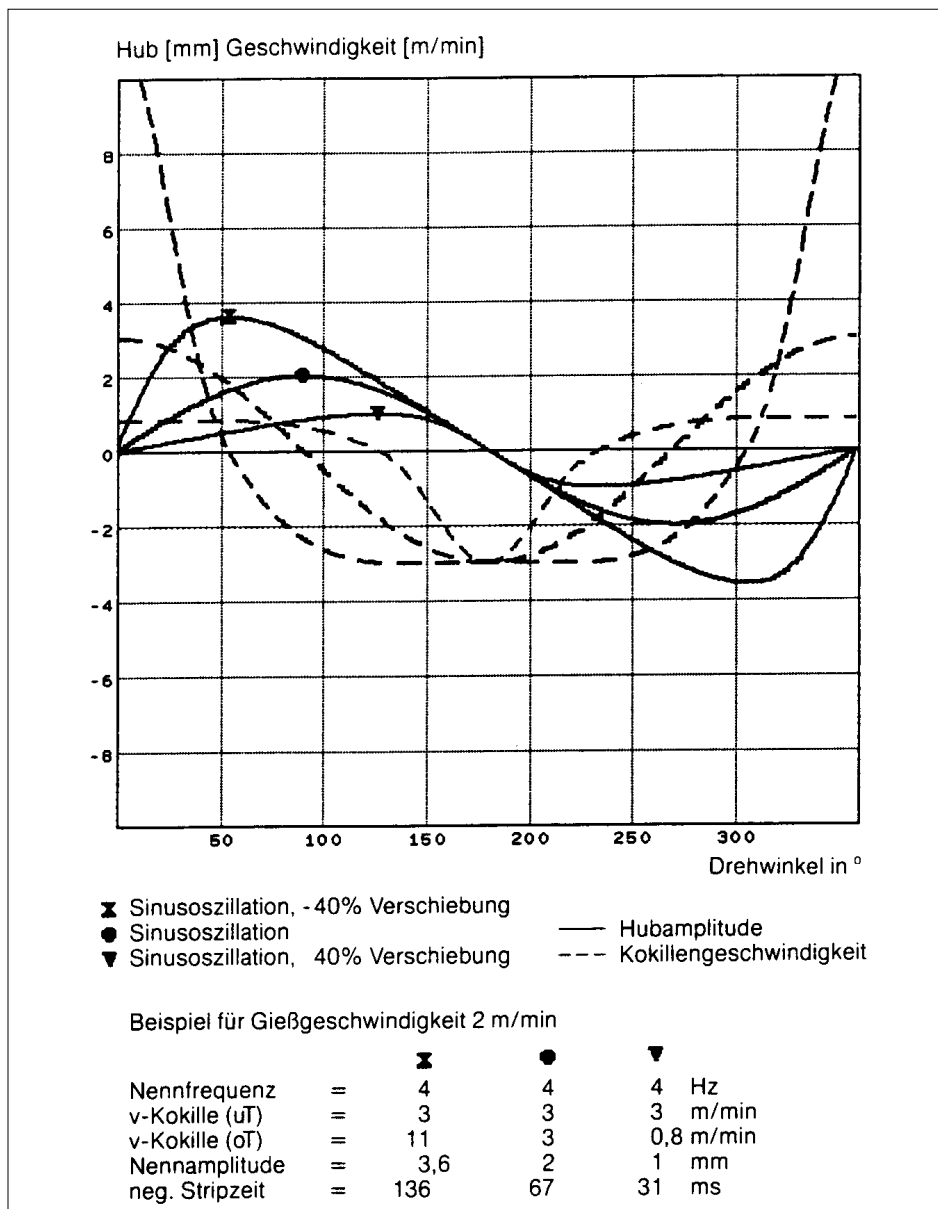


Bild 3.5: Oszillationsverläufe auf der Basis einer Sinuskurve [Man94]

Dieser Kokillentyp hat im Vergleich zu früheren Stranggießkokillen den Vorteil, neben der Hubfrequenz auch die Hubhöhe und die Bewegungsform direkt zu steuern. Bisher wurden Stranggießkokillen üblicherweise mit konstanter Hubamplitude angetrieben. Die Hubfrequenz wurde der Gießgeschwindigkeit angepaßt, und die Oszillationskurve hatte stets annähernd die Form einer Sinuskurve. Mit dieser Kokille sind asymmetrische Oszillationsformen und eine hub- und frequenzgeregelte, sowie eine hub- oder frequenzgeregelte Gießgeschwindigkeitsanpassung möglich. Bei der asymmetrischen Kokillenoszillation wird der sinuidalen Schwingung ein Sägezahn überlagert. Hierdurch ist bei der positiven Asymmetrie die Abwärtsbewegung der Kokille schneller als die Aufwärtsbewegung und bei der negativen Asymmetrie umgekehrt. Somit lassen sich die Vorgänge während der Negativ-Stripzeit, die für die Strangschalenbeanspruchung von großer Bedeutung ist, gezielt beeinflussen. In **Bild 3.5** sind verschiedene Oszillationsverläufe auf der Basis einer Sinuskurve dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass bei einer negativen Asymmetrie (Verschiebung) die Negativ-Stripzeit größer wird, während eine positive Asymmetrie genau das Gegenteil bewirkt.

4 Stand der Technik bei der Kokillenüberwachung

Wie anfänglich erwähnt, haben im praktischen Gießbetrieb **thermische Überwachungsmethoden** bisher die besten Ergebnisse zur Detektion von lokalen Austritten von Flüssigstahl bzw. zur Durchbrucherkennung geliefert. Hierzu werden Thermoelemente in die Schmal- und Breitseiten der Kokille eingelassen, so dass sie ein zweidimensionales Temperaturfeld aller Kokillenseiten abbilden (**Bild 4.1**). Zur Auswertung der bis zu 70 Thermoelemente kommen verschiedene Strategien zum Einsatz. Der einfachste Ansatz verwendet ausschließlich die Amplitude jedes einzelnen Thermoelementes. Darauf aufbauend wird der Gradient der Temperatur, d.h. die zeitliche Ableitung der Temperatur hinzugezogen. Beide Größen werden regelbasiert miteinander verknüpft und lösen unter Berücksichtigung definierter Anstiegs- bzw. Haltezeiten entsprechende Warn- und Alarmmeldungen aus. Komplexere Systeme berücksichtigen die jeweiligen Sensoren in der Nachbarschaft sowie die Anordnung in Gießrichtung.

Die Klassifikation von Fehlerzuständen erfolgt ebenso durch unterschiedliche Ansätze. Der Vergleich mit festgelegten Grenzwerten stellt hierbei die einfachste Form der Klassifikation dar. Die bereits genannte regelbasierte Verknüpfung von Merkmalen kann durch die Verwendung der Fuzzy-Set Theorie, wie in [Pfe02] dargestellt, optimiert werden. Hier erfolgt

die Erkennung von Mustern, die einen Fehlerzustand beschreiben, durch sog. Fuzzy-Mealy-Automaten. Dieser Automat bewegt sich mit jedem weiteren im Signalverlauf detektierten Muster zu einem Zustand höherer Erkennungswahrscheinlichkeit, bis das komplette Muster erkannt wird. Dieses Verfahren wird unter der Bezeichnung BOPS (BreakOut Prediction System) von Siemens I&S für Stranggießanlagen angeboten.

Eine weitere Möglichkeit der Fehlerklassifikation bei Thermoelementen bieten die in [Kem01] vorgestellten rekurrenten Fuzzy-Systeme am Anwendungsbeispiel Durchbruchfrüherkennung in Stranggießanlagen [Ada95]. Die rekurrenten Fuzzy – Systeme werden bei dieser Anwendung als sequentielle Mustererkenner zur Durchbruchfrüherkennung eingesetzt.

Die Verwendung neuronaler Netze erscheint gerade bei voneinander abhängigen Mehrgrößensystemen erfolgversprechend. Wie in [Pau00] dargestellt, können verschiedene Ausprägungen der Temperaturverläufe der Thermoelemente mittels neuronaler Netze klassifiziert werden. Die sich anschließende statistische Bewertung der Folge von einzelnen Prozesszuständen liefert eine Aussage über den gesamten Gießprozess. Der Nachteil dieser Systeme liegt jedoch in der Beschaffung realer Trainingsdatensätze, da lokale Durchbrüche oder Kleber durch Ausheilung am Strang bzw. an der Brammenoberfläche oft nicht mehr nachgewiesen werden können. Die Generierung von Trainingsdatensätzen kann daher durch eine Begutachtung der Messwerte durch erfahrene Anlagenbetreiber erfolgen.

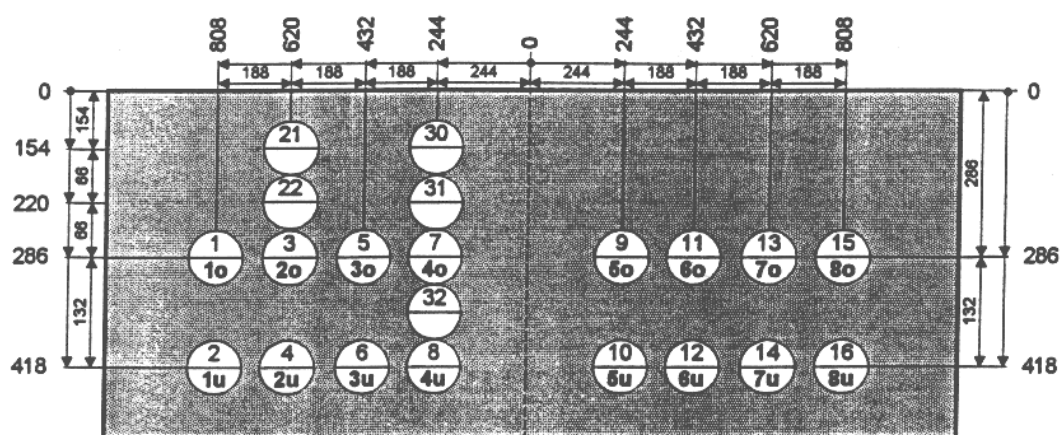


Bild 4.1: Anordnung der Temperaturmessstellen der Kleberfrüherkennung in der Kokillenbreitseite

Bei den **Geometrieüberwachungs-Systemen** [Jac88] wird die Hubbewegung der Kokille möglichst exakt erfasst, um Änderungen der Reibkraft durch die Abweichung der Kokillenbewegung von einem Sollverlauf erkennen zu können. Als Sensoren werden hauptsächlich Wegaufnehmer genutzt. Dieses Verfahren hat sich im industriellen Umfeld jedoch nicht bewährt.

Ein weiteres Verfahren ist die **modellgestützte Reibkraftmessung** [Mai99]. Hierbei wird die Kokillenantriebskraft gemessen, und mit Hilfe des modellhaft abgebildeten gedämpften Feder-Masse-System der Kokille wird ein Reibkraftverlauf aus den Messgrößen ermittelt.

Bei der **adaptiven, parametrischen Prozeß- und Systemidentifikation** [Per91] erfolgt eine adaptive Modellkorrektur durch messbare Prozessgrößen. Durch dieses Verfahren lassen sich nicht unmittelbar erfassbare Größen wie z.B. die Reibkraft aus bekannten Größen ermitteln.

Die **Reibungsüberwachung durch Beschleunigungsmessungen** [Lül93] stellt ein weiteres Verfahren dar, das jedoch auf die Installation zusätzlicher Sensorik in Form von speziellen Beschleunigungsaufnehmern mit einem linearen Übertragungsverhalten von bis zu 20 kHz ausgelegt ist. Durch die Anwendung von Korrelationsverfahren und Spektralanalysen werden die Rauschanteile der Beschleunigungssignale bewertet und den Reibvorgängen zugeordnet. Die Überwachung der Reibung erfolgt schließlich durch die Schwellwertüberwachung von speziell berechneten Kennwerten.

Zur Bestimmung der **Wärmeabfuhr in der Kokille** werden die Größen Kühlwassertemperatur am Kühlwasserein- und auslauf sowie durchgesetzte Kühlmittelmenge ermittelt. Hierbei ist jedoch offensichtlich, dass lokale Fehler der Strangschale durch diese integrative Größe schwer bzw. überhaupt nicht zu erfassen sind.

5 Reibung zwischen Strang und Kokille

In der Kokille bildet sich, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, entsprechend dem Profil der Kokille durch die intensive Kühlung der Kokillenwand die Strangschale. Mit dem Ausziehen des Stranges wächst die Strangschale durch kontinuierliche Kühlung. Um ein „Festkleben“ der Strangschale an der Kokillenwand zu verhindern, und um das aufgeschmolzene Gießpulver besser zwischen Strang und Kokillenwand einbringen zu können, wird die Kokille in Gießrichtung periodisch auf und ab bewegt (Oszillation). In der Abwärtsbewegung der

Kokille überholt die Kokille den Strang, der mit Gießgeschwindigkeit aus der Kokille gezogen wird. Während der Zeit, in der die Kokille schneller als die Gießgeschwindigkeit bewegt wird (Negativ-Stripzeit), wird auf die Strangschale eine Druckkraft ausgeübt. Die restliche Zeit (Positiv-Stripzeit) ist die Kokille langsamer und übt eine Zugkraft auf die Strangschale aus. Durch die Oszillation der Kokille und die Auszugbewegung des Stranges entsteht eine Reibung zwischen der Kokillenwand und der Strangoberfläche.

5.1 Reibungsarten

Die Reibkraft setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Flüssigkeitsreibung beziehungsweise viskose Reibung liegt vor, wenn sich zwischen Strangschale und Kokillenwand aufgeschmolzenes Gießpulver als Schmiermittel befindet. Bei Festkörperreibung, auch Coulomb'sche Reibung genannt, ist kein flüssiges Gießpulver mehr zwischen Strang und Kokille vorhanden.

Bei Vorliegen von hydrodynamischer Reibung liegen berechnete Reibungskräfte im Bereich zwischen 20 und 500 N pro Quadratmeter Kokillenfläche. Aus Messungen kann daher gefolgert werden, dass in einigen Teilen der Kokille eine Fest/Fest Reibung stattfindet. Dies stimmt mit Beobachtungen über den Verschleiß der Kupferplatten im unteren Teil der Kokille überein. Ein weiteres Indiz für das Vorhandensein einer Fest/Fest Zone ist die Unabhängigkeit der Strangabziehkräfte von der Brammengröße, die ja wie folgt beschrieben bei viskoser Reibung flächenabhängig und bei coulomb'scher Reibung flächenunabhängig sind.

Durch die hohen Temperaturen im oberen Teil der Kokille sowie dem ferrostatischen Druck existierten gute Bedingungen für die hydrodynamische Schmierung mit flüssigem Gießschlackefilm. Genau in diesem Bereich mit der dünnsten Metallschale und der geringsten Festigkeit sollten diese Reibungskräfte ausschließlich von der Viskosität der Schlacke abhängen.

In der Nähe des Kokillenendes, besonders an den Schmalseiten, können die Oberflächentemperaturen des Stahls so niedrig werden, dass die Schlacke im Kontakt mit der Strangschale sich wie ein Festkörper verhält.

Wie vorab diskutiert, hat die Schlacke einen wesentlichen Einfluss auf die Reibungszustände in der Kokille. Dieser entscheidende Einfluss kann fatale Folgen haben, da die

Gießpulverzugabe heutzutage in fast allen Anlagen noch manuell und damit ohne Berücksichtigung der Reibungszustände vorgenommen wird. Bei dem Verhalten des Gießpulvers werden hauptsächlich drei Phasen beobachtet:

Der Wärmefluss von der oberen flüssigen Metalloberfläche verursacht Temperaturgradienten im festen Pulver (Phase 1) und in der Schlackenschicht. Der thermische Kontakt zwischen Metall und Schlacke ist gut genug, eine flüssige Schlackenschicht (Phase 2) aufrechtzuerhalten.

Wenn die flüssige Schlackenschicht in Kontakt mit der Kokille kommt, wird sie sehr viskos und erstarrt und bildet einen Überzug auf der Kupferwand (Phase 3). Dieser Überzug gelangt zum Teil zwischen Stahl und Kokille.

Nach der anfänglichen Einführung sorgt die allseitige Abwärtsbewegung des festen Stahls wie in einem hydrodynamischen Schmiersystem für den Transport der Schlacke. **Bild 5.1** zeigt das Verhalten des Gießpulvers zwischen Tauchrohr (6) und Kokillenwandung (1).

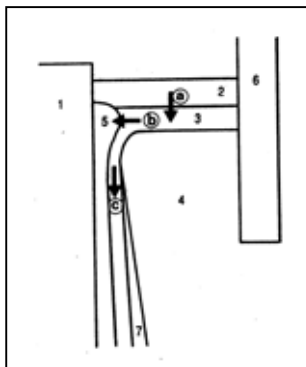


Bild 5.1: Verhalten des Gießpulvers

1. Kokille, 2. festes Pulver, 3. flüssige Schlacke,
 4. Stahl, 5. Rand, 6. Tauchausguss, 7. erstarrte Schale
- [Sch92]

5.1.1 Viskose Reibung

Der viskose Anteil der Reibkraft zwischen Strangschale und Kokillenwand wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$F_{R, \text{viskos}} = \eta \cdot A \cdot \frac{v_{\text{rel}}}{z} \quad (5.1)$$

mit

$F_{R, \text{viskos}}$ = Kraft durch viskose Reibung

η = Viskositätskoeffizient

A = benetzte Fläche

v_{rel} = relative Geschwindigkeit zwischen Strang und Kokille

z = Schmierfilmdicke.

Die dynamische Viskosität, die stark von der Temperatur abhängig ist, und die Schmierfilmdicke liegen nach der einmal erfolgten Wahl eines Gießpulvers für den Prozeßablauf weitgehend fest. Die benetzte Fläche A zwischen Strang und der Kokille wird beeinflusst durch:

- Geometrie
- Füllhöhe
- Bereich der Flüssigkeitsreibung
- Abhebung der Strangschale

Der Bereich der Flüssigkeitsreibung ist nicht eindeutig zu bestimmen, da mit einer bestimmten Temperatur das Gießpulver wieder kristallisiert [Wyl92].

Einzig die Relativgeschwindigkeit zwischen Strang und Kokille ist direkt proportional zum viskosen Reibanteil. **Bild 5.2** zeigt schematisch die Flüssigkeitsreibung in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit [Man94a].

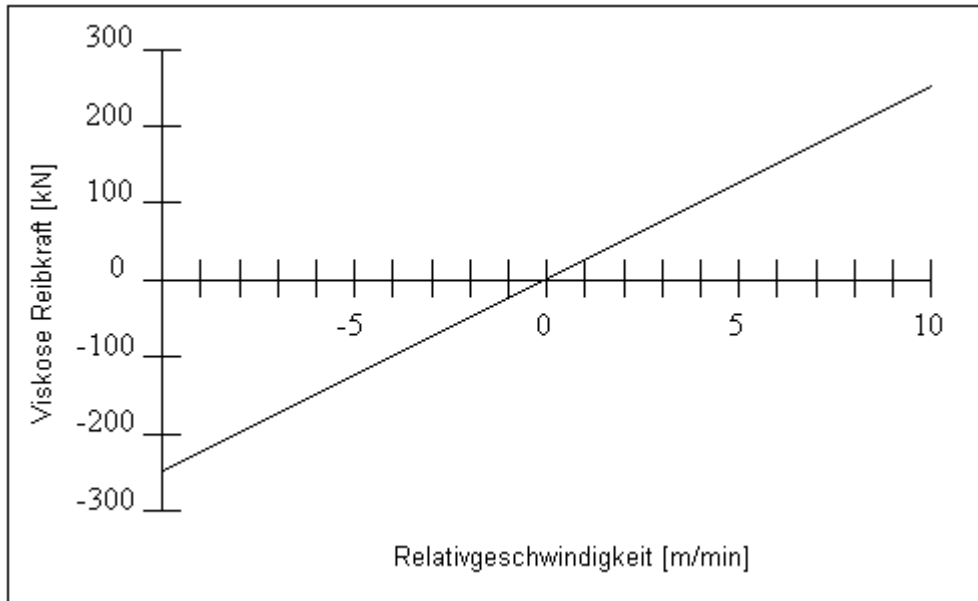


Bild 5.2: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der viskosen Reibung von der Relativgeschwindigkeit zwischen Strang und Kokille

5.1.2 Coulomb'sche Reibung

In den Bereichen ohne Schmierung wird die Festkörperreibung beschrieben durch den Zusammenhang:

$$F_{R,coulomb} = \mu \cdot F_N \cdot \text{sign}[v_{rel}] \quad (5.2)$$

mit

$F_{R,coulomb}$ = Kraft durch Festkörperreibung

F_N = Normalkraft

μ = Gleitreibungskoeffizient

sign = Vorzeichenfunktion.

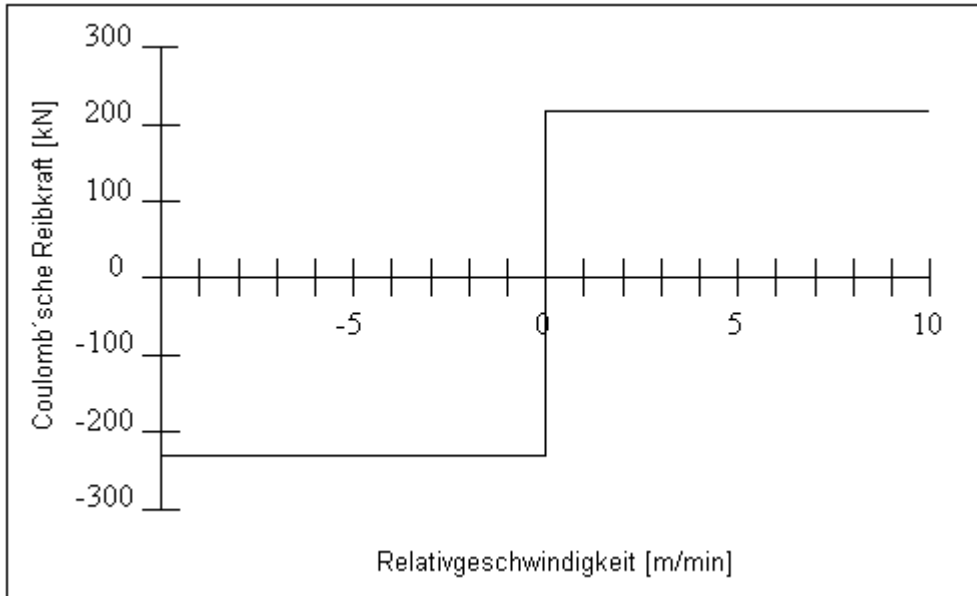


Bild 5.3: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der coulomb'schen Reibung von der Relativgeschwindigkeit zwischen Strang und Kokille [Man94a]

F_N ist die Normalkraft, die vom Strang auf die Kokille wirkt. In Abhängigkeit von der Gießlänge entsteht in der Kokille die wachsende Strangschale. Da der Strang die Kokille nicht komplett erstarrt verläßt, wirken ferrostatische Kräfte, die vom flüssigen Inneren des Stranges zur Kokillenwand gerichtet sind. Die ferrostatischen Kräfte werden von einer Vielzahl von Parametern, wie zum Beispiel dem Strangschalenwachstum und der Gießgeschwindigkeit, beeinflusst.

Der Betrag der Amplitude der Festkörperreibung wird durch die Relativgeschwindigkeit nicht beeinflusst. Allerdings variiert das Vorzeichen der coulomb'schen Reibung mit einem Richtungswechsel der Relativgeschwindigkeit. Ist die Relativgeschwindigkeit gleich null, haftet der Strang an der Kokillenwand. In diesem Fall erhöht sich die Reibung sprunghaft, da hier nicht der Gleitreibungs-, sondern der erhöhte Haftreibungskoeffizient μ_0 in die obige Gleichung eingesetzt werden muß. Ist die Haftreibungskraft erreicht, reißt die Strangschale mit einer ruckhaften Kraftänderung von der Kokillenwand los. Die Reibungszustände gehen dann wieder in Gleitreibung über.

5.1.3 Stribeck – Kurve

Der Reibzahlverlauf innerhalb der Kokille lässt sich in den unterschiedlichen Reibungs- und Schmierzuständen theoretisch umfassend durch die Stribeck – Kurve beschreiben.

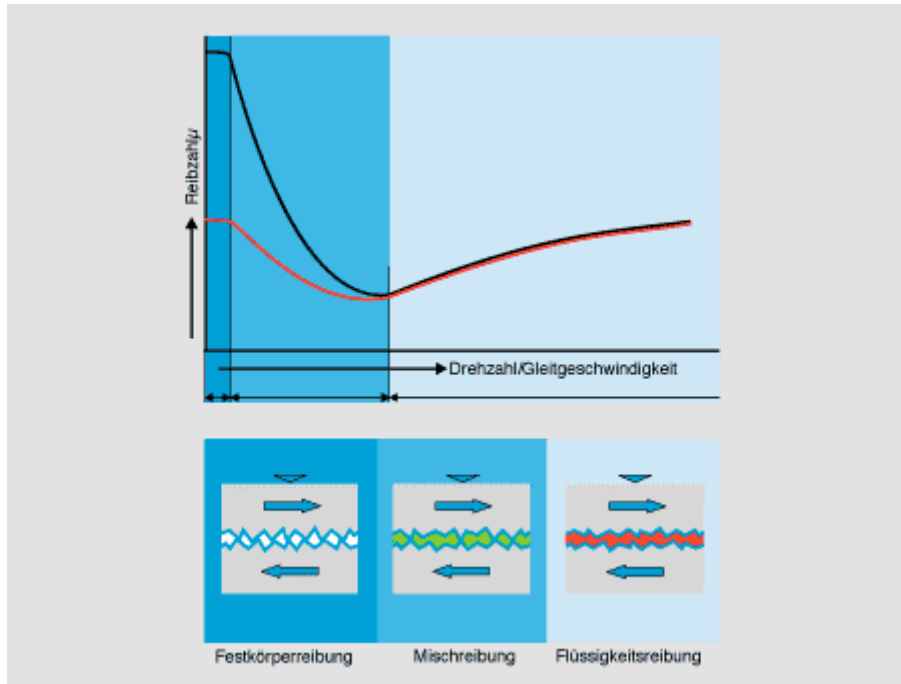


Bild 5.4: Stribeck-Kurve [Oks05]

In der Anlaufphase folgt nach der Ruhreibung die Festkörperreibung (hohe Reibzahl/hoher Verschleiß). Mit zunehmender Geschwindigkeit erfolgt in der Mischreibungsphase (mittlere Reibzahl/mittlerer Verschleiß) eine partielle Trennung der Gleitflächen durch den Schmierfilm. Genau dort schützt nun der Notlauffilm, der sich durch Festschmierstoffe bilden kann (siehe rote Kurve). Bei höheren Geschwindigkeiten trennt ein hydrodynamischer Flüssigkeitsfilm die Gleitflächen voneinander. In dieser Phase der Flüssigkeitsreibung wird der geringste Verschleiß erreicht.

6 Reibkraftermittlung

Ein weit verbreitetes Verfahren zur Reibkraftermittlung ist der sogenannte M. L. Tektor (M. L. für Mould Lubrication) des Belgiers Bernhard Mairy [Mai77], [Mai99]. Es beruht auf einem Beschleunigungs-Sensorsignal und der Auswertung eines Frequenzspektrums. Abweichungen von dem als normal angesehenen Frequenzspektrum deuten auf Reibungsänderungen hin.

Andere Untersuchungen, wie die von Perkuhn [Per91], gehen von der mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessenen Hubstangenkraft aus. Dieses Signal wird anschließend mit Hilfe einer Frequenzanalyse ausgewertet.

Alle Verfahren, die eine Frequenzanalyse durchführen, haben die relativ langsame Auswertung gemein, weil die Auswerteverfahren (Fast Fourier Transformation (FFT) usw.) für den jeweiligen Frequenzbereich einige Sekunden der Datensammlung notwendig machen. Aus diesem Grund scheinen diese Verfahren für schnelle Vorgänge, wie zum Beispiel die Kleberfrüherkennung in schnellgießenden Anlagen, ungeeignet zu sein. Allerdings könnten diese Verfahren für langsamgießende Stranggießanlagen von Nutzen sein.

Untersuchungen von Kemper [Kem93], [Kem91] liegen auch Messungen der Hubstangenkraft mittels DMS zugrunde. Dabei wird die Hubstangenkraft für alle Oszillationsparameter im Leerlaufbetrieb gemessen. Im Gießbetrieb wird von dem gemessenen Kraftwert die den eingestellten Oszillationsparametern entsprechende Leerlaufantriebskraft subtrahiert. Die Differenz der beiden Kräfte ergibt die Reibkraft zwischen Strang und Kokille. Nachteilig erscheinen hier die notwendigen Leerlaufmessungen. Eine weitere Möglichkeit der Reibkraftermittlung ist die Messung der Motorströme der Segmentmotoren. Die Kokille und der Strang sind über die Reibung gekoppelt. So ist zum Beispiel durch genaue Messungen die Kokillenoszillation in der Stranggeschwindigkeit nachweisbar. Die Geschwindigkeitsregelung der Segmentmotoren arbeitet gegen diese von der Kokille aufgezwungene Bewegung. Ein größerer Motorstrom müßte also folglich eine größere Reibung bedeuten. Untersuchungen dieser Art [Per91] zeigten mit entsprechender numerischer Aufbereitung bei konstanter Gießgeschwindigkeit gute Ergebnisse, waren jedoch bei Drehzahlschwankungen problematisch.

Im Folgenden sollen einige Verfahren zur Ermittlung der Reibkraft genauer betrachtet werden. Die Auswahl dieser Verfahren erfolgte speziell im Hinblick auf den Einsatz an einer hydraulisch angetriebenen und blattfedergelagerten Kokille.

6.1 Differenzialgleichungsmethode

Bei der Differenzialgleichungsmethode wird das System Kokille durch ein mathematisches Modell beschrieben. Für die Berechnung der Reibkraft wird eine einfache Kräftebilanz aufgestellt. Da der hydraulische Hubantrieb direkt an der Kokille angreift, erhält man mit der Zylinderkraft auch gleichzeitig die Antriebskraft der Kokille. Die Zylinderkraft ist betriebssicher aus dem Differenzdruck der beiden Zylinderkammern zu ermitteln. Als zweite benötigte Meßgröße für die Berechnung der Reibkraft dient der Zylinderweg, da für die Antriebsregelung der Zylinderweg der Regelung zurückgeführt wird. Die folgende Differenzialgleichung dient als einfaches Modell der Kokille:

$$F_{\text{Antrieb}} = C \cdot s(t) + F_{\text{Reibung}} + m \cdot \ddot{s}(t) + m \cdot g + \Delta s_{\text{statisch}} \cdot C \quad (6.1)$$

mit:

$$F_{\text{Antrieb}} = \Delta p \cdot A_{\text{Kolben}}$$

Δp = Differenzdruck der Zylinderkammern

A_{Kolben} = Kolbenfläche

$s(t)$ = Weg

$\ddot{s}(t)$ = Beschleunigung

C = Federkonstante

g = Erdbeschleunigung

m = schwingende Masse

$\Delta s_{\text{statisch}}$ = statische Durchsenkung der Kokille.

Durch Umstellung und Berücksichtigung von

$$\Delta s_{\text{statisch}} \cdot C = -m \cdot g$$

erhält man für die Gesamtreibung:

$$F_{\text{Reibung}} = F_{\text{Antrieb}} - s(t) \cdot C - \ddot{s}(t) \cdot m \quad (6.2)$$

Wird die Gesamtreibung F_{Reibung} unterteilt in *innere* Systemreibung F_S und *äußere* Reibung F_R erhält man für F_R :

$$F_R = F_{\text{Antrieb}} - s(t) \cdot C - \ddot{s}(t) \cdot m - F_S \quad (6.3)$$

Hierbei entspricht die *äußere* Reibung F_R der Reibkraft zwischen Strang und Kokille. Die *innere* Systemreibung F_S beschreibt die Reibungsverluste im Antriebsstrang und kann durch Leerlaufmessungen ermittelt werden.

6.2 Hysterese-Modell

Zur Erfassung der Reibungszustände zwischen Strang und Kokille mit Hilfe des Hysterese-Modells sind die Meßgrößen Antriebskraft und Hubweg notwendig. Bei einer Kokille mit zwei Hydraulikzylindern ergibt sich die Antriebskraft des schwingenden Systems aus der Addition der Kraftverläufe beider Zylinder, die ihrerseits aus den Druckdifferenzen der Kammerdrücke berechnet werden. In **Bild 6.1** sind der Hubweg der Kokille und der errechnete Antriebskraftverlauf einer Messung (mit positiv asymmetrischem Kurvenverlauf) beispielhaft dargestellt [Boe94].

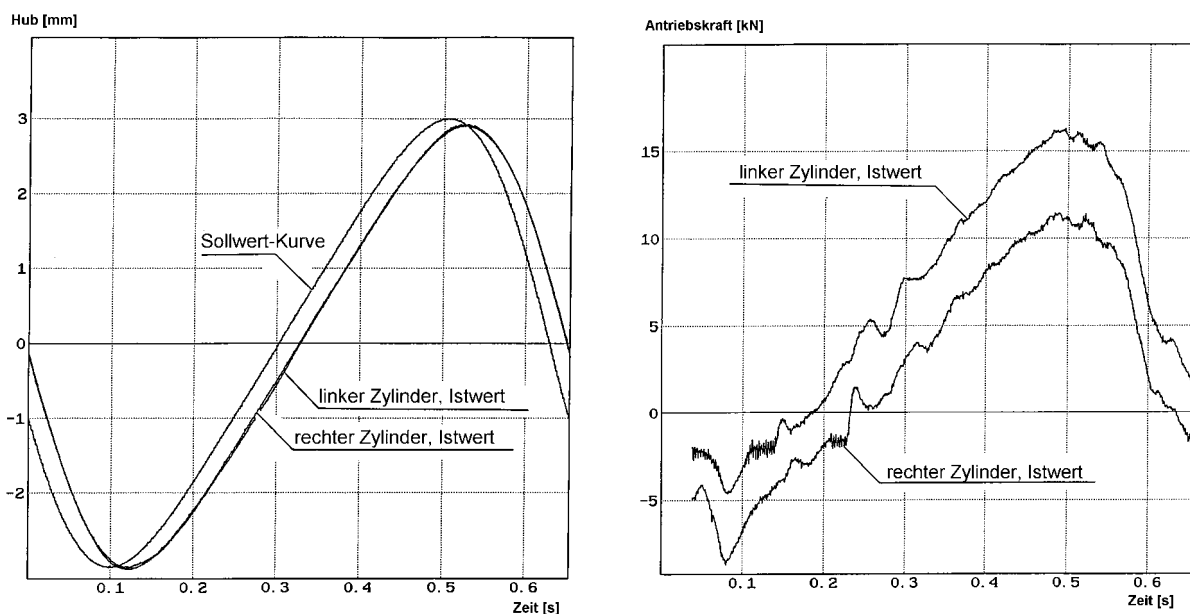


Bild 6.1: Hubweg (linke Grafik) und Antriebskraft (rechte Grafik) über eine Oszillationsperiode aufgetragen

Die Abweichung der Wegkurven beider Antriebsseiten geht gegen null und ist nur in den unteren Totpunkten ansatzweise erkennbar. Die Phasenverschiebung zwischen Soll- und Istkurve ist auf die Trägheit des Regelkreises zurückzuführen. Der Kraftverlauf zeigt zwei annähernd parallel verlaufende Kurvenzüge. Durch Fertigungs- und Montagetoleranzen ist eine unterschiedliche statische Durchsenkung beider Seiten verursacht worden, die durch den Antrieb ins geometrische Gleichgewicht ausgeregelt wird. Dies erklärt den Versatz von etwa 3 kN zwischen beiden Kurven. **Bild 6.2** zeigt die Verknüpfung des Weges mit der Kraft in

Form einer charakteristischen Hysteresekurve [Boe94]. Die von dieser Kurve umschlossene Fläche ist direkt proportional der Verlustarbeit einer Periode im System und damit auch der Strangreibung. Wird die Verlustarbeit nun durch den Gesamthub dividiert, erhält man ein Maß für die mittlere Verlustkraft pro Periode. Durch Leerlaufmessungen ohne Strang sind die Verluste des Systems bekannt und werden von der Gesamtverlustkraft abgezogen, so dass die Reibkraft zwischen Strang und Kokillenwand bestimmt werden kann.

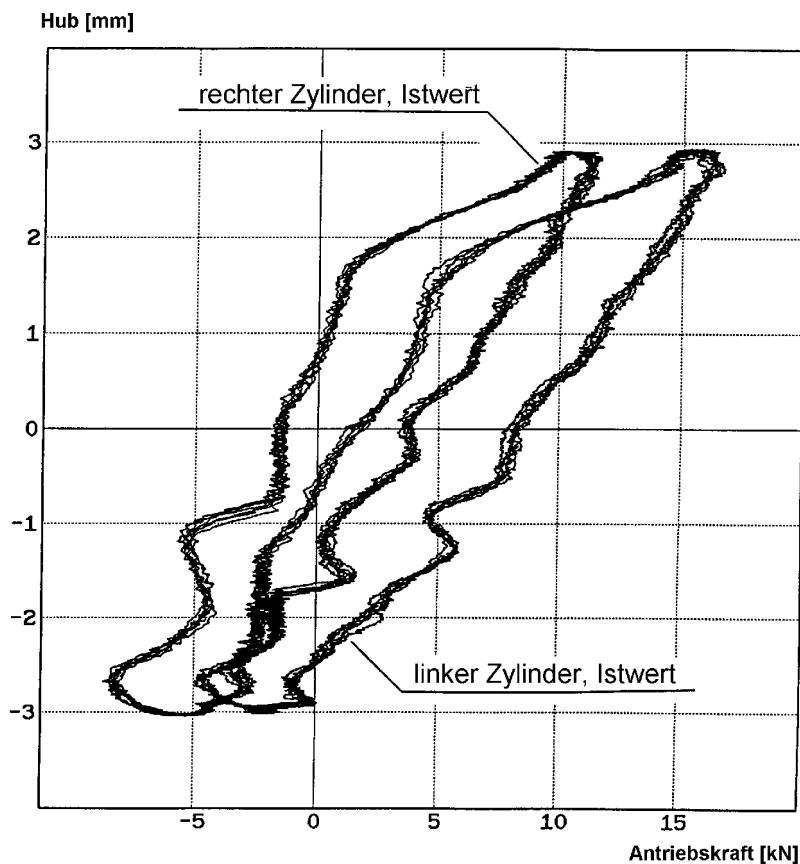


Bild 6.2: Hysteresekurven der beiden Hydraulikzylinder: Antriebskraft über dem Hubweg aufgetragen

Es wird zunächst die Hysteresekurve jedes Hydraulikzylinders einzeln berechnet. Über die Hysteresekurve wird die mittlere Verlustkraft pro Periode des jeweiligen Zylinders bestimmt. Anschließend wird das arithmetische Mittel gebildet. Der Flächeninhalt der Hystereseschleife beschreibt die umgesetzte Dämpfungsarbeit gemäß:

$$W_D = \oint F ds \quad (6.4)$$

und liefert nach Division durch den Kokillenhub die Summe aus der Reibkraft zwischen Strang und Kokille sowie der Leerlaufreibung. Wird die Antriebskraft über dem Kokillenhub

aufgetragen, erhält man die Hysteresekurve. Die von der Hysteresekurve umschlossene Fläche ist proportional der Verlustarbeit des Systems während einer Periode. Die Antriebskraft setzt sich zusammen aus der Federkraft, der Beschleunigungskraft und der Gesamtreibkraft. **Bild 6.3** verdeutlicht schematisch die Zusammensetzung der Antriebskraft im Idealfall bei coulomb'scher Reibung. Hierbei sind die Feder- und Beschleunigungskraft nicht verlustbehaftet und deswegen als Gerade dargestellt. Folglich ist bei unverändertem Kokillenweg $x(t)$ von einer Vergrößerung der Hystereseffläche auf einen Anstieg der Gesamtreibkraft zu schließen. Da die *innere* Systemreibung unabhängig von den Oszillationsbedingungen konstant bleibt, bedeutet die Flächenvergrößerung der Hysterese einen Anstieg der Reibung zwischen Strang und Kokille.

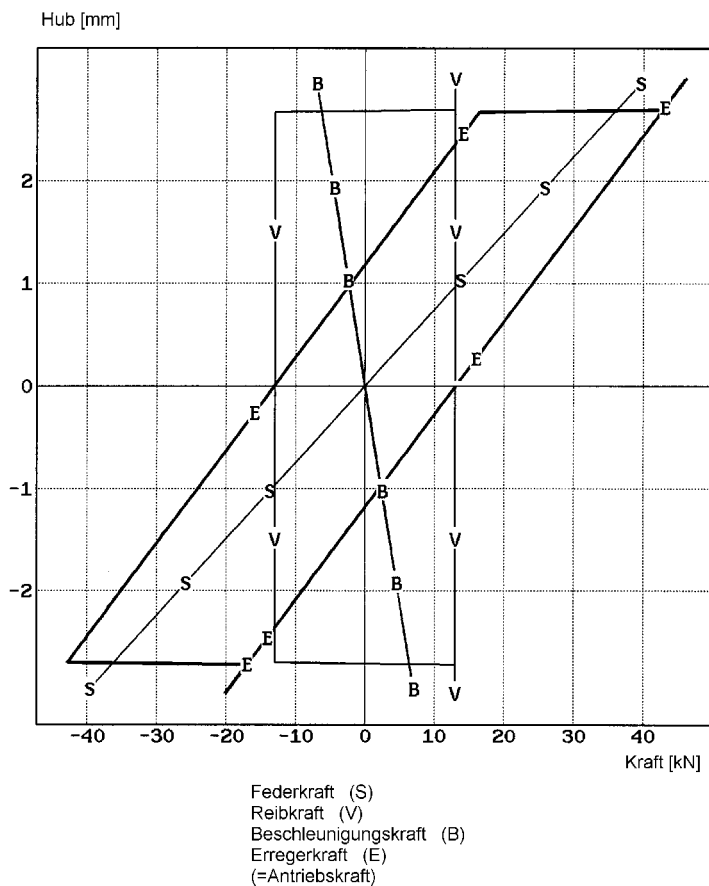
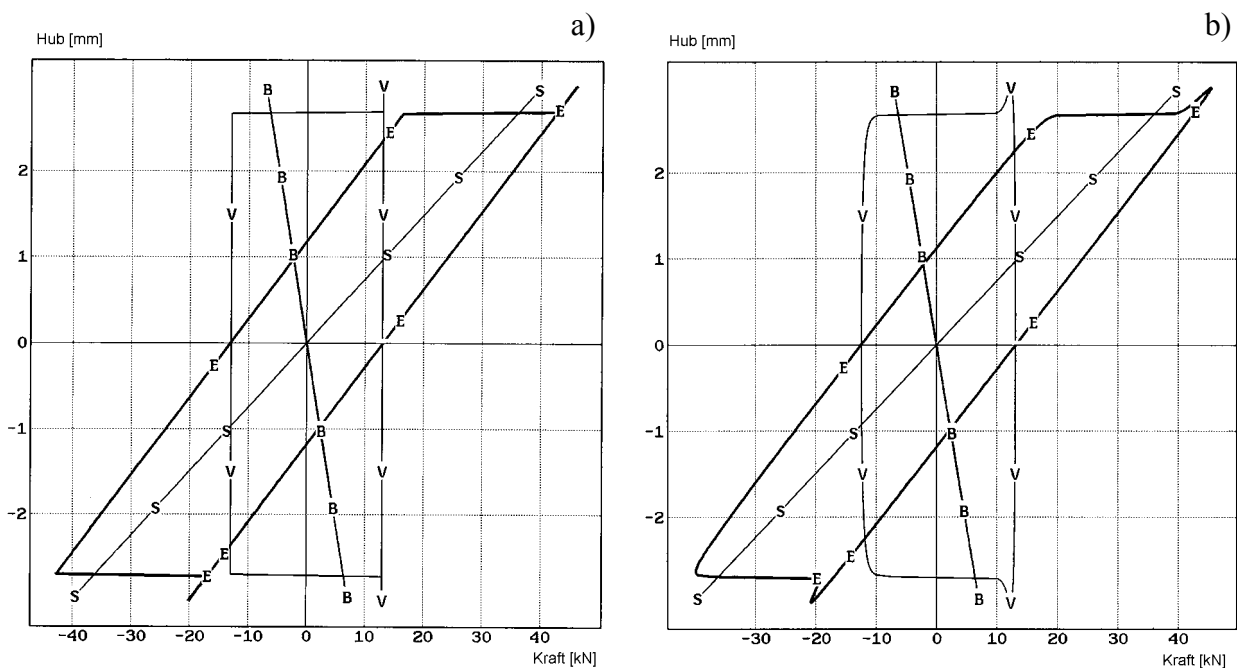


Bild 6.3: Schematische Darstellung der Zusammensetzung der Antriebskraft

6.3 Hystereseform

Eine weitere Möglichkeit zur Erkennung eines Klebers kann die Untersuchung der Form der Hysteresekurve sein. Die unterschiedliche Abhängigkeit der viskosen und coulomb'schen

Reibung von der Relativgeschwindigkeit zwischen Strang und Kokille läßt bei Änderung der Reibungsart auf eine signifikante Formänderung der Hysteresekurve schließen. Theoretische Untersuchungen haben diese Vermutung bestätigt. Verschiedene Hysteresekurven wurden mit Hilfe einer Simulationssoftware simuliert. Dabei wurde zwischen dem idealen Modell (unter Vernachlässigung der Steifigkeiten von Antrieb und Rahmen) und dem realen Modell (unter Berücksichtigung der Steifigkeiten) unterschieden. So konnten durch Änderung der viskosen und coulomb'schen Reibanteile verschiedene Reibungszustände und die dazu gehörigen Hysteresekurven theoretisch dargestellt werden. **Bild 6.4** zeigt die Veränderung der Hystereseform beim idealen Modell. Ausgehend von reiner coulomb'schen Reibung (**Bild 6.4 a**) wird der viskose Reibanteil stetig erhöht. In **Bild 6.4 d** beträgt der viskose Reibanteil ca. 25 %. Beim realen Modell werden die Steifigkeiten von Antrieb und Rahmen berücksichtigt. Dadurch werden Antrieb und Rahmen aufgrund des Haftreibungsimpulses beim Übergang von Haft- in Gleitreibung in Schwingung versetzt. Diese Schwingung wird nun in der Hysteresekurve sichtbar. **Bild 6.5** zeigt die Veränderung der Hystereseform beim realen Modell. Den Abbildungen liegen die gleichen Erhöhungen des viskosen Reibanteils zugrunde wie denen beim idealen Modell. Sowohl bei dem idealen als auch bei dem realen Modell ist bei Erhöhung des viskosen Anteils eine Formveränderung der Hysterese im ersten und dritten Quadranten zu beobachten. Weiterhin ist bei dem realen Modell mit zunehmendem viskosen Reibanteil eine Verkleinerung der Schwingungsamplitude zu sehen.



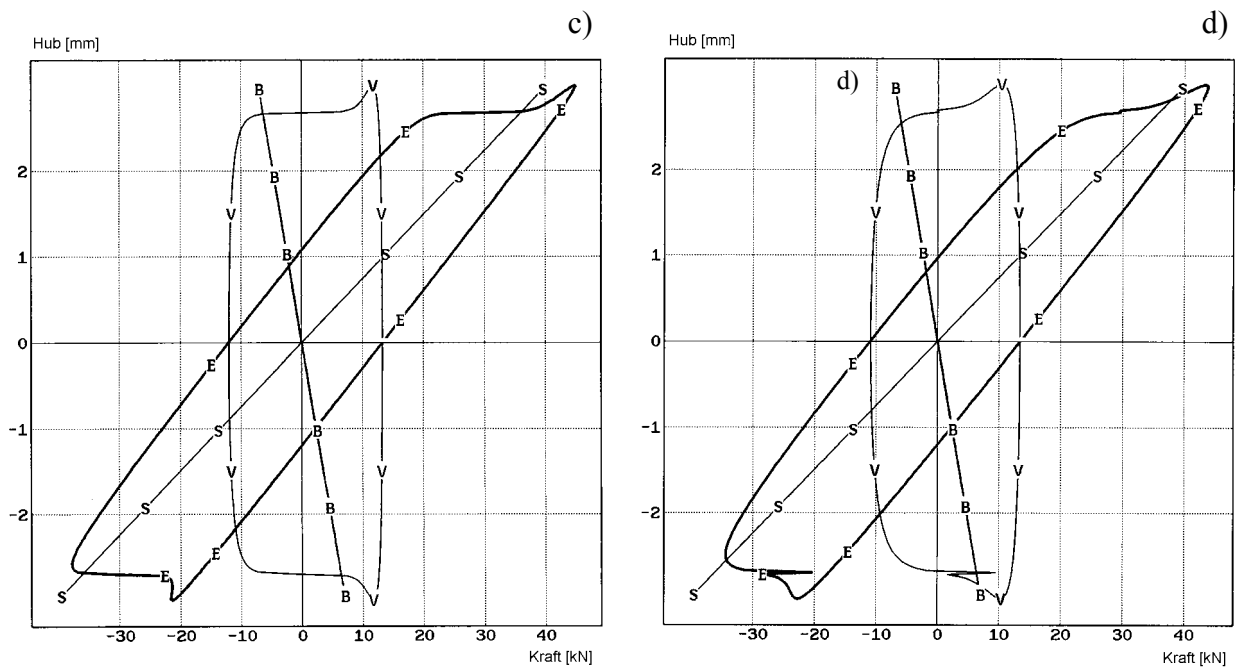
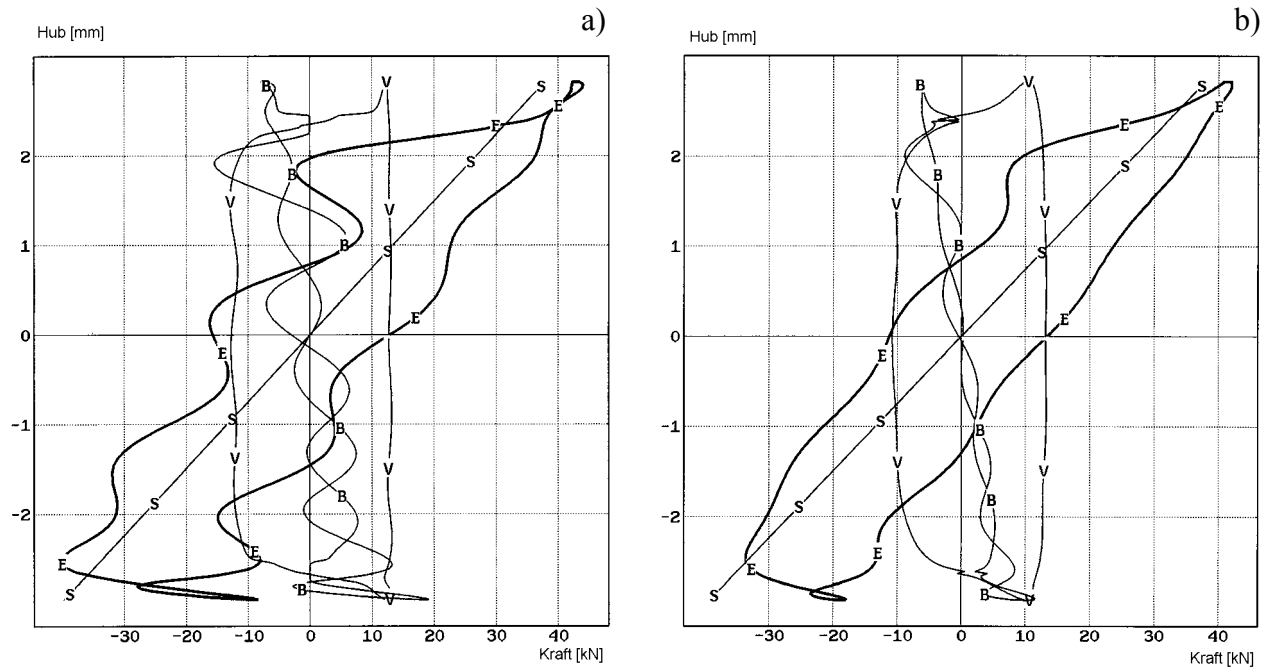


Bild 6.4: Simulierte Hysteresekurven beim idealen Modell: a) 0 %, b) 5 %, c) 11 %, d) 25 % viskoser Reibanteil



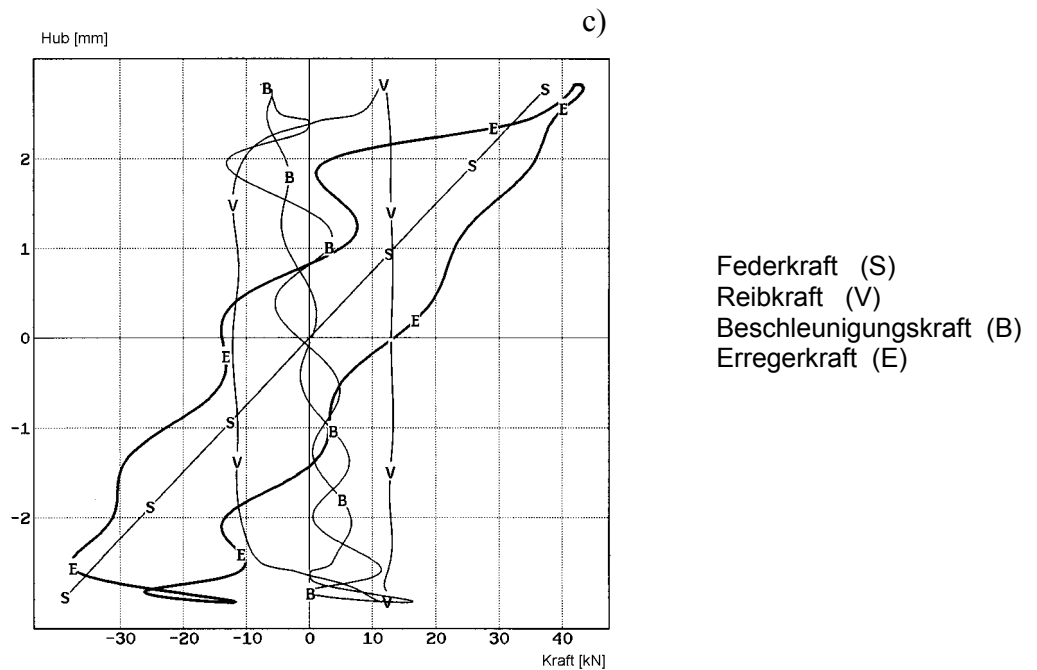


Bild 6.5: Simulierte Hysteresekurven beim realen Modell: a) 5 %, b) 11 %, c) 25 % viskoser Reibanteil

6.4 Beobachter-Modell

Ein weiteres Verfahren zur Reibkraftermittlung ist das Beobachter-Modell, das anhand von **Bild 6.6** näher erläutert werden soll. Der *Beobachter* basiert auf einem Modell der Strecke, wobei ausschließlich die Ausgangsgröße der Strecke und des Modells miteinander verglichen werden. Als mathematisches Modell der Kokille liegen die in Kapitel 6.1 vorgestellten Differenzialgleichungen zugrunde.

Sowohl dem mathematischen Modell als auch dem realen System werden die gleichen Eingangswerte zugeführt. Das mathematische Modell berechnet den Wert der Ausgangsgröße (hier: Kokillenweg x), der am Ausgang des realen Systems vorliegen müßte. Dieser geschätzte Wert (in Bild 6.6 mit einem Dach gekennzeichnet) wird nun mit dem real gemessenen Kokillenweg verglichen. Anschließend wird die Differenz der beiden Werte als Schätzfehler dem mathematischen Modell zugeführt. Durch eine geeignete Wahl der Rückführung kann eine Verkleinerung des Schätzfehlers erzielt werden. Im optimalen Fall konvergiert die Differenz gegen null. So werden die zu Anfang frei gewählten Werte für die Reibkraft und die Systemreibung den tatsächlichen Werten kontinuierlich angenähert. Die Berechnung der Rückführungsmatrix L erfolgt analog zur Auslegung von Zustandsreglern und deren Reglerstabilitätskriterien.

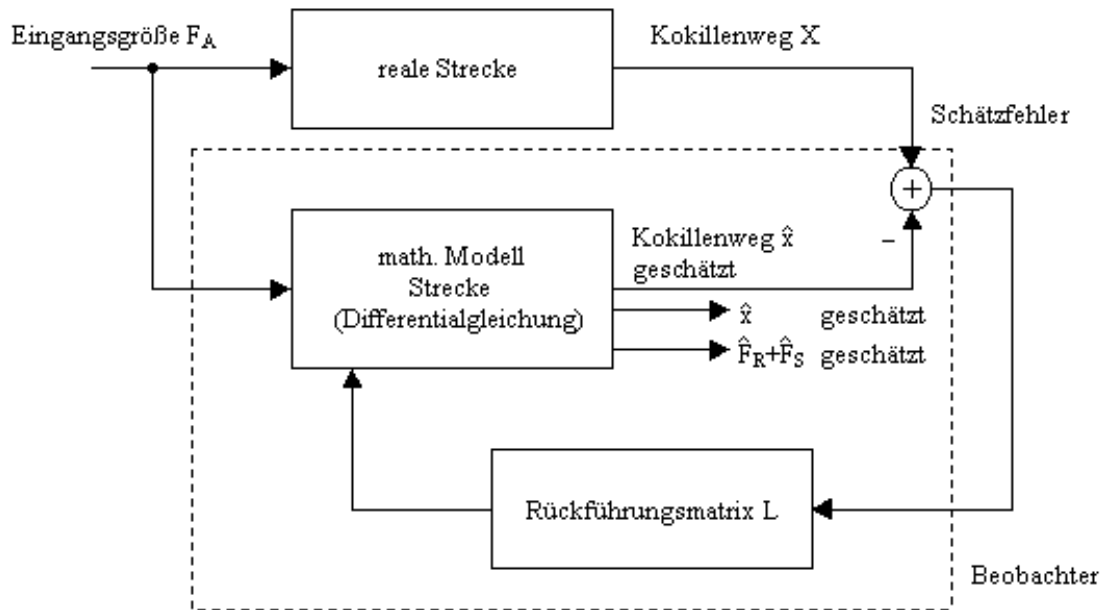


Bild 6.6: Beobachter-Modell

Die Gleichung des Beobachters lautet nach [Föl92]:

$$\underline{\hat{x}}' = \underline{A}\underline{\hat{x}} + \underline{B}\underline{u} + \underline{r} \quad (6.5)$$

mit

$$\underline{r} = \underline{L}(\underline{x} - \underline{\hat{x}}) \quad (6.6)$$

und

$$\underline{u} = F_A$$

oder zusammengefasst:

$$\underline{\hat{x}}' = (\underline{A} - \underline{L})\underline{\hat{x}} + \underline{B}\underline{u} + \underline{L}\underline{\hat{x}} \quad (6.7)$$

Hierbei ist die Rückführmatrix L so zu wählen, dass der sog. Schätzfehler für $t \rightarrow \infty$ gegen Null strebt.

Im Gegensatz zum Hysterese-Modell (siehe Kapitel 6.2) ist das Beobachter-Modell in der Lage, theoretisch den Verlauf der Reibkraft während einer Periode zu berechnen. Durch geeignete Wahl der Elemente der Rückführungsmatrix L besteht weiterhin die Möglichkeit, das Signal des Beobachter-Modells stärker zu glätten. Dies ist mit der Einstellung der Parameter eines Zustandsreglers vergleichbar.

7 Überwachungsmethoden

Ähnlich wie bei der Reibkraftermittlung existieren auch bei der Überwachung zahlreiche Ansätze und Methoden von denen hier einige erfolgversprechende Verfahren vorgestellt werden. Laut Definition [Ise94] dient die Überwachung technischer Prozesse dazu, den gegenwärtigen Prozeßzustand anzuzeigen, unerwünschte oder unerlaubte Prozeßzustände zu melden und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Hierbei besteht eine wesentliche Aufgabe in der Separation von Ursachen, die letztlich zu einer Reibkrafterhöhung führen, jedoch, wie später dargestellt, durch übliche Prozeß- und Verfahrenseingriffe oder –schwankungen verursacht werden.

Unter Überwachungsmethoden werden in dieser Arbeit sämtliche der Signalkonditionierung sowie der Signalwandlung oder -dezimierung nachfolgende Verarbeitungen gefaßt, die in der Regel eine Aussage über den Prozess- bzw. Anlagenzustand liefern.

Zur Prozessfehlererkennung lassen sich die im folgenden diskutierten Methoden unterscheiden.

7.1 Absolutwertkontrolle

Die Absolutwertkontrolle verfolgt den aktuellen vorverarbeiteten Messwert Y und vergleicht ihn mit voreingestellten oder gegebenenfalls parametervarianten Maximal- und Minimalwerten und reagiert bei entsprechender Über- oder Unterschreitung.

$$Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max} \quad (7.1)$$

Die Grenzwerte werden hierbei so eingestellt, dass einerseits noch genügend großer Abstand bis zum Auftreten einer Gefährdung bleibt, andererseits unnötige Störungsmeldungen vermieden werden.

7.2 Trendkontrolle

Unter Trend wird die zeitliche Ableitung des Messsignals Y (Änderungsgeschwindigkeit) verstanden.

$$Y' = \frac{dY(t)}{dt} \quad (7.2)$$

Bei entsprechend klein eingestelltem Grenzwert kann die Störmeldung früher erfolgen als bei der Absolutwertkontrolle, da der Trend eine gewisse Vorhersage des Signalverlaufes erlaubt.

Der Normalzustand liegt vor wenn:

$$Y'_{\min} \leq Y' \leq Y'_{\max} \quad (7.3)$$

Absolutwertkontrolle und Trendkontrolle können auch gleichzeitig durchgeführt werden. Beide Verfahren kann man so kombinieren, dass die Absolutgrenzwerte in Abhängigkeit von der Änderungsgeschwindigkeit eingestellt werden. Damit größere Störungen möglichst frühzeitig erkannt werden und geringfügige Störungen keine unnötigen Meldungen auslösen, kann z.B. nach **Bild 7.1** verfahren werden.

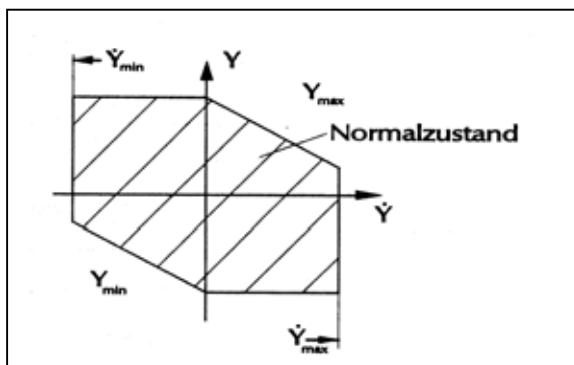


Bild 7.1: Kombination von Absolutwertkontrolle und Trendkontrolle [Ise94]

7.3 Signalvorhersage

Bei der Festlegung der Grenzwerte von relevanten Größen wird man meist den sicheren Weg gehen und die Grenzwerte relativ eng tolerieren. Dies führt vielfach zu häufigen Störmeldungen, die dann unbegründet sind, wenn die betreffende Größe ohne äußeren Eingriff in den Normalzustand zurückkehrt. Dieser Nachteil lässt sich beheben, wenn man den Verlauf des Signals vorhersagen kann. Hierzu muss zunächst ein mathematisches Modell für das Signal gefunden werden. Dies kann durch die Methode der Regressionsanalyse für deterministische Signale erfolgen:

Bei überwiegend deterministischem Signalverlauf kann ein deterministisches Signalmodell durch

$$Y(k) = a_0 + a_1k + a_2k^2 + \dots \quad (7.4)$$

angesetzt werden. Aufgrund der letzten Signalwerte $Y(k)$ wird durch eine Regressionsanalyse der Verlauf des Signals für die N zukünftigen Werte vorherberechnet.

Wendet man nun die Absolutwertkontrolle auf das vorhergesagte Signal $Y(k)$ an, dann kann man einerseits früher Grenzwertüberschreitungen erkennen und andererseits unnötige Störmeldungen vermeiden, wenn die betrachtete Größe ohne zusätzliche Maßnahmen wieder in den Normalzustand zurückkehrt.

Während die zuvor beschriebenen Verfahren vorzugsweise bei einparametrischen Anwendungen Verwendung finden, eignen sich die nachfolgend beschriebenen Verfahren für den mehrparametrischen Anwendungsfall.

7.4 Abstandsklassifikator

Unter der Klassifikation mit Abstandsfunktionen versteht man den Vergleich eines Merkmalvektors \underline{Y} mit einem Referenzvektor \underline{Y}_{REF} und der Berechnung eines Abstandsmaßes. Für den zweidimensionalen Fall lässt sich dies in **Bild 7.2** darstellen. Hier wird ein unbekannter Merkmalvektor Y mit 4 Referenzvektoren verglichen. Eine Zuordnung erfolgt zu dem Vektor mit dem geringsten Abstand. Der Erfolg dieses Verfahrens hängt in starkem Masse von der Wahl der Referenzvektoren ab.

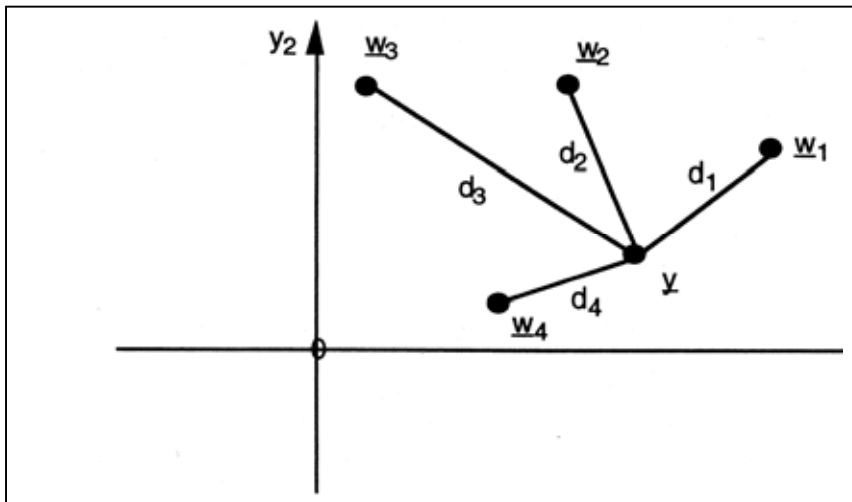


Bild 7.2: Abstandsklassifikation [Rig96]

Bei der Bestimmung des Abstandes zweier Vektoren, bzw. des Abstandes des Punktes mit den Koordinaten \underline{Y} zu einem Punkt mit den Koordinaten \underline{w} , wird die geometrische Abstandsformel zwischen zwei Punkten, die dem euklidischen Abstand entspricht, gewählt.

$$d(\underline{w}, \underline{Y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (w_i - y_i)^2} \quad (7.5)$$

7.5 Wissensbasierte Überwachung

In einer Wissensbasis wird das erforderliche Fachwissen abgelegt, z.B. in Form von analytischem und/oder heuristischem Wissen. Ein Inferenzmechanismus zieht dann Schlussfolgerungen und präsentiert ein Ergebnis. Durch die Kopplung mit dem Prozess entsteht ein Online-System. Hierbei werden die Signale zunächst vorverarbeitet. Die so gewonnenen Prozessinformationen werden danach einem Inferenzmechanismus zugeführt, in dem unter Nutzung von heuristischem Wissen bestimmte Schlussfolgerungen gezogen werden. **Bild 7.3** zeigt den Aufbau eines solchen Systems.

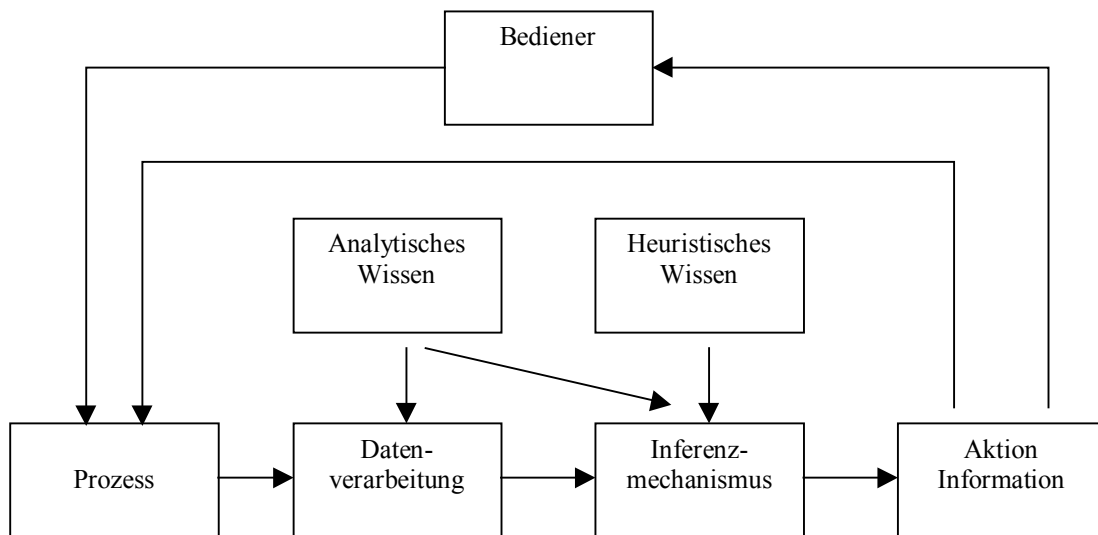


Bild 7.3: Wissensbasiertes Online - Überwachungssystem

Die Prozessdaten werden zunächst mit Verfahren wie beispielsweise der Filterung, Spektralzerlegung oder

Kennwertbildung vorverarbeitet. Hierzu ist ein detailliertes analytisches Wissen über den Prozess notwendig.

Die so aufbereitete Prozessinformation wird dann einem Inferenzmechanismus zugeführt, der unter Nutzung von heuristischem Wissen über den Prozess Schlussfolgerungen zieht und direkt in den Prozess eingreift oder dem Bediener entsprechend Informationen zukommen lässt. Diese Systeme empfehlen sich dann, wenn ein Teil des Prozesses mathematisch beschreibbar ist, jedoch zur Fehlererkennung ein gewisses Maß an heuristischem Wissen erforderlich ist, das z.B. in Form von Regeln in die Wissensbasis eingebracht werden kann.

Die Definition solcher Regeln stellt sehr hohe Anforderungen an den Designer dieser Wissensbasen, da das Wissen über den Prozess einerseits verteilt vorliegt andererseits nur mit linguistischen Variablen beschrieben werden kann. Hier kann die Fuzzy-Set-Theorie einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung dieser linguistischen Regeln in einen Algorithmus leisten. Die grundlegende Idee besteht darin, aus einem Satz linguistischer Regeln, welche die Erfahrungen des Bedieners repräsentieren, einen Algorithmus zu konstruieren, bei dem die linguistischen Variablen als Fuzzy-Sets definiert sind. Die Vorteile dieses Ansatzes sind Erfahrungen, Intuitionen und Heuristiken zu implementieren und die Tatsache, dass kein Prozessmodell vorhanden sein muss. Die **Bilder 7.4 a,b** und **7.4 c** zeigen beispielsweise Fuzzy-Sets zu den linguistischen Variablen, die die Temperaturen der Thermoelemente in der Kokille beschreiben, deren Gradient sowie die Dauer der Grenzwertüberschreitung.

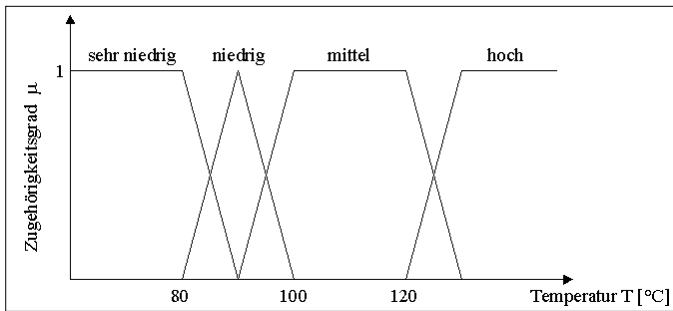


Bild 7.4 a: Fuzzy-Sets der Thermoelementtemperaturen

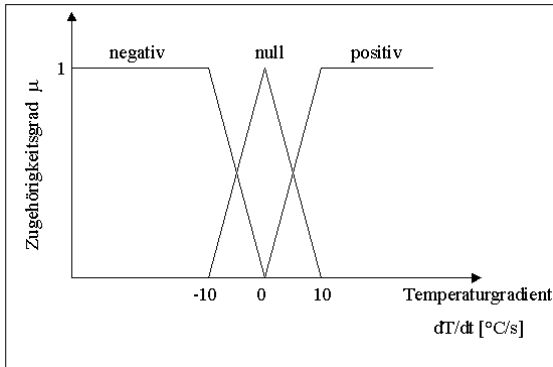


Bild 7.4 b: Fuzzy-Sets des Gradienten der Thermoelementtemperaturen

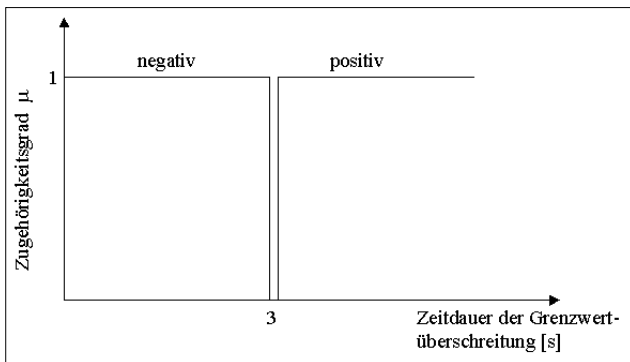


Bild 7.4 c: Fuzzy-Sets der Zeitdauer der Grenzwertüberschreitung

Zum besseren Verständnis wird nun als Beispiel eine Regel in Form einer WENN-DANN-Regel formuliert:

WENN ($T = \text{hoch}$ UND $dT/dt = \text{positiv}$ UND Zeitdauer der G.Ü. = positiv)
DANN $v_G = \text{niedrig}$.

Hierbei bedeutete der Schlußfolgerungsteil „ $v_G = \text{niedrig}$ “ eine Reduktion der Gießgeschwindigkeit.

Für die Regelauswertung wird hier das gebräuchliche MAX-MIN-Inferenzschema benutzt. Dabei wird zunächst der Erfüllungsgrad jeder aktiven Regel mit dem MIN-Operator bestimmt.

$$\mu_{Eh}(\mathbf{x}) = \min\{\mu_T(\mathbf{x}), \mu_{dT/dt}(\mathbf{x}), \mu_{GÜ}(\mathbf{x})\} \quad (7.6)$$

Anschließend werden die Inferenzergebnisse der einzelnen Regeln zum Gesamtergebnis überlagert. Die Einzelergebnisse, das heißt die in der Höhe des Erfüllungsgrades der jeweiligen Regel abgeschnittenen Schlußfolgerungs-Fuzzy-Mengen, werden über den MAX-Operator miteinander zum Gesamtergebnis verknüpft.

$$\mu_E(\mathbf{x}) = \max\{\mu_{E1}(\mathbf{x}), \mu_{E2}(\mathbf{x}), \dots, \mu_{En}(\mathbf{x})\} \quad (7.7)$$

Um nach der Anwendung des MAX-Operators erneut einen scharfen Ausgangswert zu erhalten, wird häufig die Flächenschwerpunktmethode (kurz: cog / center of gravity) eingesetzt.

Eine Anwendung der Fuzzy –Logik in der Maschinenüberwachung wird in [Sch96] beschrieben. In diesem Beitrag wird exemplarisch die Fehlerfrüherkennung an Wälzlagern vorgestellt. Zur Klassifikation von Störungen wird hier kein Referenzvergleich aktuell gemessener Daten mit zuvor definierten Grenzwerten genutzt. Die Beurteilung des Maschinenzustandes erfolgt durch einen Fuzzy – Klassifikationsalgorithmus, bei dem Störungen und Merkmalschwankungen durch die unscharfe Klassenbeschreibung wesentlich einfacher berücksichtigt werden können. Die zur Gewinnung der Zugehörigkeitsfunktionen notwendigen Lernmengen lassen sich sowohl durch reale Messungen, als auch durch eine verbale Beschreibung verschiedener Zustände durch einen menschlichen Experten gewinnen, wobei durchaus unpräzise Formulierungen zugelassen sind.

Wie in [Str99] dargestellt, besteht die Grundaufgabe des Klassifikators, ein durch den Merkmalsvektor charakterisiertes Muster einer der Entscheidungsklassen zuzuordnen. Diese Aufgabe ist für die Verwendung klassischer, d.h. scharfer Klassifikatoren und für unscharfe Mustererkennungsmethoden weitgehend identisch. Während bei scharfen Mustererkennungsverfahren allerdings eine Zuordnung zu exakt einer Klasse vorgenommen wird, erlauben unscharfe Methoden über die Berechnung so genannter

Klassenzugehörigkeiten die Zuordnung zu mehreren Zuständen. Bei komplexen Diagnoseaufgaben mit starkem Störpegel und bei Mehrfachschädigungen sind scharfe Klassifikationssysteme häufig mit erheblichen Fehlklassifikationen verbunden. Derartige Mängel können nach bisherigen Untersuchungen durch Verwendung eines unscharfen Klassifikationsalgorithmus deutlich verbessert werden. Die Umsetzung in ein PC basiertes Fuzzy - Experten – System wird in [Liu96] beschrieben.

7.6 Künstliche Neuronale Netze

Weitere, speziell in der jüngsten Zeit populär gewordene Klassifikationsverfahren sind die Künstlichen Neuronale Netze. Auch bei diesem Klassifikationsverfahren wird nicht notwendigerweise ein Prozessmodell vorausgesetzt. Dieses Verfahren erscheint sogar dann geeignet, wenn weder heuristisches noch analytisches Prozesswissen vorliegt. Eine wesentliche Eigenschaft der Neuronale Netze ist ihre Lernfähigkeit. Hierdurch sind sie in der Lage, Klassifikationsprobleme selbstständig aus Trainingsdatensätzen zu erlernen. Ein weiterer Vorteil ist ihre massive Parallelität, die speziell bei der vorliegenden vielparametrischen Aufgabenstellung Anwendung finden kann.

Abstrahiert wird durch ein Neuronales Netz aus einem Eingangsmuster ein Ausgangsmuster berechnet. Anhand des Ausgangsmusters können Klassifikationen des Eingangsmusters vorgenommen werden. Man differenziert zwischen zwei Phasen. Der Lernphase, während der dem Netz eine Vielzahl von Trainingsdatensätzen, bestehend aus Ein- und Ausgabevektoren, präsentiert werden und der Anwendungsphase, in der das Netz seiner Klassifikationsaufgabe nachkommt. Aus der mittlerweile großen Zahl von Netzwerkarchitekturen sei hier das häufig verwendete und in **Bild 7.5** dargestellte *Feedforward-Netz* vorgestellt.

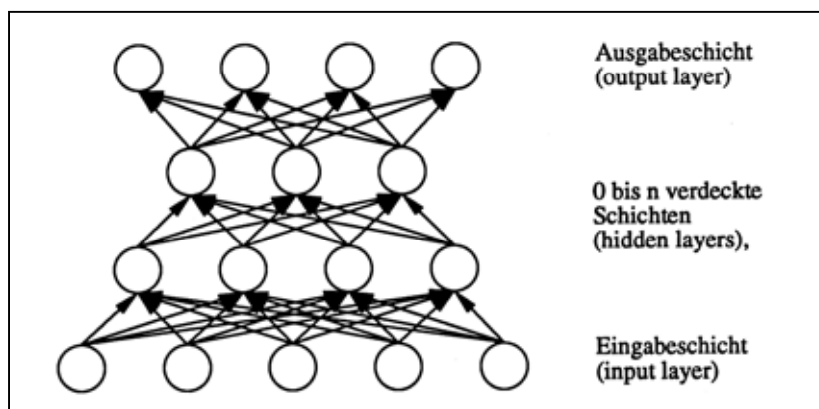


Bild 7.5: Topografie eines Feedforward-Netzes [Zel94]

Es handelt sich hierbei um ein Netz mit drei trainierbaren Schichten. Die Zellen der Eingabeschicht leiten den Eingangsvektor in das Netz. Die Ausgabeschicht übernimmt die Ausgabe des Ergebnisvektors. Die Zellen dazwischen dienen der Informationsverarbeitung innerhalb des Neuronalen Netzes und werden daher auch als verdeckte Schichten bezeichnet.

Während der Lernphase werden dem Netz Trainingsdatensätze, d.h. Eingangsvektoren sowie die entsprechenden erwünschten Ausgangsvektoren präsentiert. Durch das Backpropagation - Verfahren werden nun die Synapsengewichtungen und die Schwellwerte solange optimiert bis die Differenz zwischen Soll- und Istwerten des Ausgabevektors minimal wird.

Viele Probleme, wie beispielsweise die Zustandsüberwachung in der Medizin oder in technischen Anwendungen, sind jedoch mit diesem Netztyp bzw. mit überwachten Lernverfahren schwierig zu lösen. Die Ursache liegt teilweise darin begründet, dass die Anzahl der Daten, die Alarmzustände repräsentieren, sehr rar sind und dadurch nur eine unzureichende Anzahl von Trainingsdatensätzen dem Netz präsentiert werden können.

Eine Lösung bieten hier die sog. SOM (self-organizing maps). Dieser Netztyp wird mit den bekannten Datensätzen trainiert und klassifiziert in der Anwendung unbekannte und damit wahrscheinlich fehlerrepräsentative Datensätze. **Bild 7.6** zeigt die Netzstruktur einer selbstorganisierenden Karte.

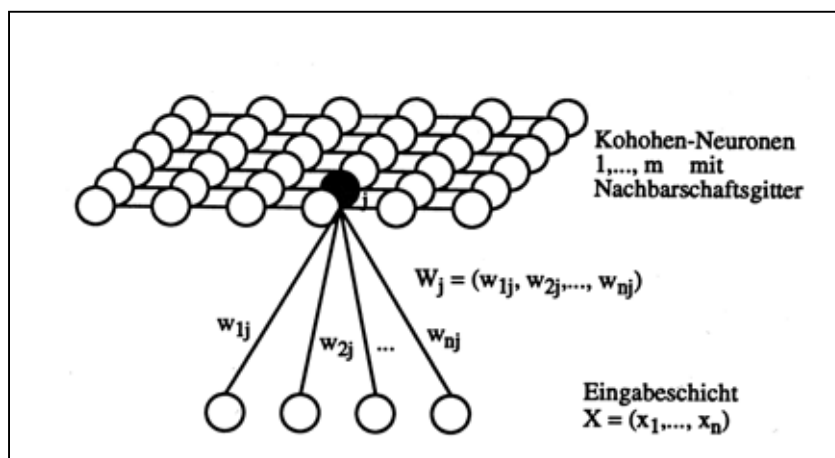


Bild 7.6: Netzstruktur einer selbstorganisierenden Karte [Zel94]

Der Einsatz Neuronaler Netze in der Zustandsüberwachung von Maschinen wird in [Hac00] beschrieben. Am Beispiel eines Überwachungssystems für eine Dampfturbine werden die Vorteile eines neuronalen Klassifikators, wie z.B. die Datenreduktion bei komplexen Systemen sowie die Festlegung der Signifikanz einzelner Prozessparameter für die Überwachung dargestellt.

[Ter00] beschreibt ein hybrides System zur Überwachung und Diagnose eines Walzprozesses. Das hybride System verwendet hier sowohl regelbasierte Methoden als auch neuronale Netze. Durch die regelbasierten Methoden werden relevante Eingangsdaten für das Netz selektiert und die Ausgabe des Netzes validiert. Durch die Anwendung von selbstorganisierenden Karten können, wie auch in [Pen94] gezeigt, nicht spezifizierte Änderungen im Maschinenzustand detektiert werden.

Bezüglich der Datenvorselektion von Neuronalen Netzen wird in [Sax05] die Anwendung genetischer Algorithmen zur Selektion optimaler Eingabeparameter eines Netzes diskutiert. Durch die Verwendung von genetischen Algorithmen kann nicht nur die Anzahl der Neuronen in den verborgenen Schichten entwickelt werden, sondern ebenso die Anzahl der Eingangsneuronen und die Größe der Verbindungsmatrix.

Eine spezielle Gruppe vorwärtsgerichteter Neuronaler Netze, die Radialen - Basisfunktionen – Netze, und ihre besondere Fähigkeit “unbekannte Fehler“ zu klassifizieren wird in [Li 02] vorgestellt. Der Beitrag beschäftigt sich speziell mit der Entwicklung einer neuen Technik zur Bestimmung geeigneter Grenzwerte für Radial –Basisfunktionen – Klassifikatoren zur Interpretation der Ausgangsdaten.

8 Prüfstandanwendung

Der nachfolgend beschriebene Prüfstand dient in erster Linie der Erprobung und Einstellung der unter Kapitel 6 dargestellten Methoden zur Ermittlung der Reibkräfte zwischen Kokille und Strang. Der Aufbau des Prüfstandes läßt jedoch ausschließlich die Simulation von coulomb'scher d.h. Festkörperreibung zu. Diese Vereinfachung des realen Modells ist jedoch insofern zu vertreten, da speziell die Festkörperreibung beim Anlagenbetrieb zu vermeiden ist und deren Identifikation das primäre Ziel der Untersuchungen darstellt.

Die relativ aufwendige Installation einer Vorblock-Kokille, anstelle einer simplen federgelagerten Masse, läßt sich durch die Vergleichsmöglichkeiten mit den Untersuchungsergebnissen unter realen Betriebsbedingungen rechtfertigen.

8.1 Mechanischer Aufbau des Prüfstandes

Kernstück des Prüfstandes ist die in **Bild 8.1** dargestellte Vorblock-Kokille. Diese Testkokille ist die erste gießfähige Kokille, welche zu Testzwecken bei der Firma Thyssen Stahl AG in Duisburg Ruhrort eingesetzt wurde. Die in Blattfedern aufgehängte schwingende Masse beträgt ca. 2.2 t. Die Testkokille ist auf einem Maschinenbett installiert und kann mit einem eigenständigen Hydraulikaggregat betrieben werden. Der zur Kokillenregelung eingesetzte PID-Regler wurde auf einem Industrie-PC implementiert.

Der Strang, der in einer realen Anlage die Reibkräfte auf die Kokille überträgt, wird durch ein System aus einer rotierenden Bremsscheibe und einem an der schwingenden Masse der Kokille befestigten Bremssattel ersetzt. Der von einem Frequenzumrichter gespeiste Asynchronmotor treibt die Bremsscheibe an, deren Umfangsgeschwindigkeit der Strangabzugsgeschwindigkeit entspricht. Der Bereich der einstellbaren Drehzahl entspricht einer Strangabzugsgeschwindigkeit von 1 bis 5 m/min. Die Amplitude der Bremskraft kann über den Druck am hydraulisch betätigten Bremssattel stufenlos eingestellt werden. Der momentan eingestellte Wert der Reibkraft wird durch eine zwischen Bremssattel und schwingender Masse eingebauten Kraftmessdose ermittelt.

Dieser Aufbau ermöglicht einerseits die genaue Einstellung der Strangabzugsgeschwindigkeit und andererseits die exakte Bestimmung der auf das System wirkenden äußeren Reibkraft.

Zur Bestimmung der Reibkraft werden verschiedene Messwerte erfasst. Der Hub des Zylinders wird durch interne, d.h. in den Zylindern eingebaute Wegmesser, abgetastet. Über

die Kammerdrücke der Antriebszylinder kann die Antriebskraft ermittelt werden. Weitere Messgrößen sind die Drehzahl der Bremsscheibe, die Kokillenbeschleunigung sowie die an der Messdose anliegende Kraft.

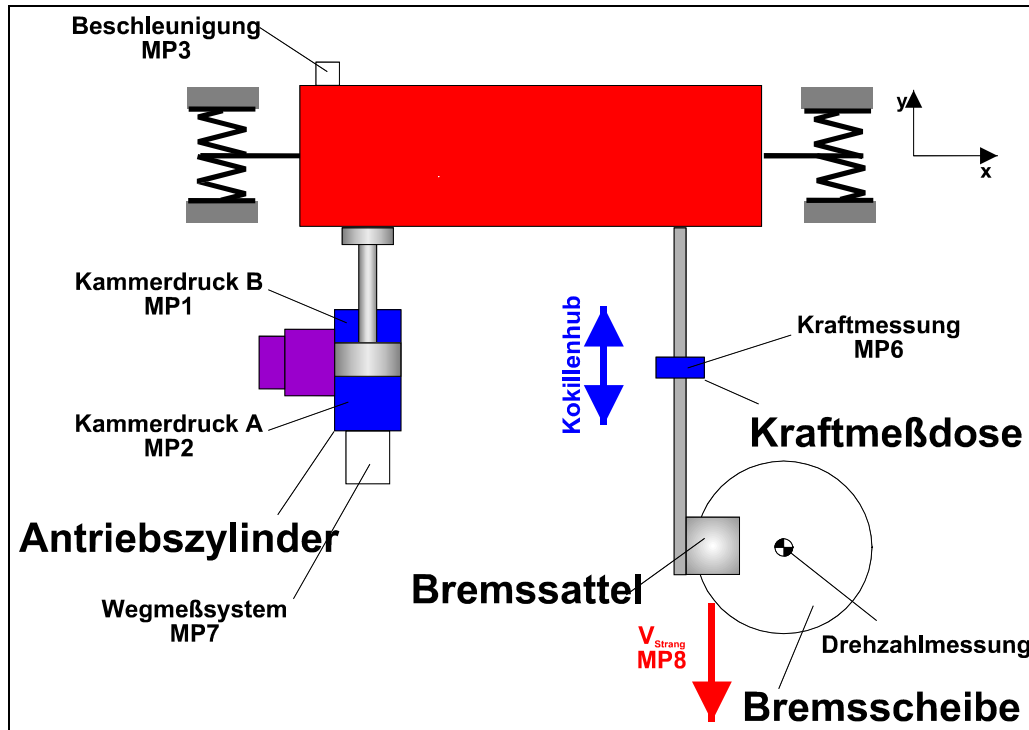


Bild 8.1: Prüfstand einer Vorblock-Kokille

Bild 8.2 zeigt das zugehörige Betriebsfenster dieses Kokillentyps. Es macht deutlich, wieviel Permutationen des Betriebszustandes möglich sind und wie hoch der messtechnische Aufwand ist, um diese Bereiche alle zu erfassen, wenn man bedenkt, dass zu den dargestellten Parametern wie Hubhöhe, Hubfrequenz und Strangabzugsgeschwindigkeit noch die Parameter Reibkraftamplitude und Asymmetrie verändert werden können.

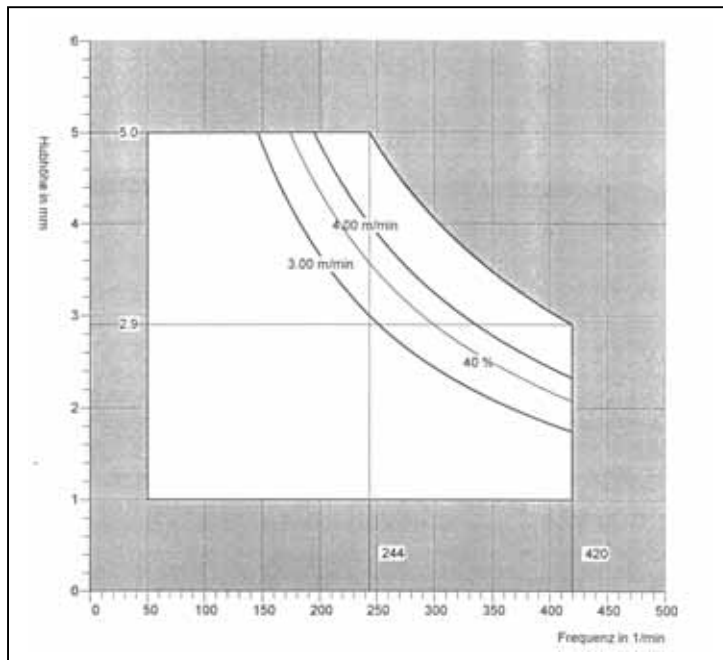


Bild 8.2: Betriebsfenster der Versuchskokille [Man94a]

Als Asymmetrie A_v wird hier die Abweichung der Oszillationskurve von der Sinusform bezeichnet. Als metallurgisch vorteilhaft haben sich Oszillationsstrategien erwiesen, die die auf der Sinusfunktion basierenden Kokillbahn zu einem Sägezahnverlauf hin deformieren. Wie in **Bild 8.3** dargestellt, wird dabei die aufsteigende Flanke der Geschwindigkeitsfunktion flacher und die absteigende Flanke steiler angestellt. Zur Asymmetrie sind in diesem Zusammenhang in der Literatur einige Definitionen bekannt. In der hier verwendeten Definition wird die Asymmetrie durch eine Prozentzahl dargestellt, die angibt, um welchen Betrag die maximale Kokillengeschwindigkeit im Abwärtshub größer ist als bei einer Sinusbewegung gleicher Frequenz und gleicher Amplitude.

$$A_v = \frac{V_{\text{asymmax}} - V_{\text{symmax}}}{V_{\text{symmax}}} 100\% \quad (8.1)$$

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu realen Betriebsbedingungen besteht in der Entkopplung von Hubfrequenz und Strangabzugsgeschwindigkeit, die in der Praxis bei gegebener Hubamplitude miteinander verknüpft sind. Diese Verknüpfung ist in der Regel eine lineare Relation. Im unteren Geschwindigkeitsbereich wird jedoch aus regelungstechnischen Gründen davon abgewichen und mit konstanter Hubfrequenz gearbeitet.

Bei der Nachbildung der Reibungszustände wurde eine Vereinfachung dahingehend vorgenommen, dass hier ausschließlich die coulomb'sche Reibung simuliert werden kann. Der gesamte Komplex der Misch- und Flüssigkeitsreibung kann aus verfahrenstechnischen

Gründen nicht nachgebildet werden. Dieser Umstand ist insofern nicht gravierend, da die Quantität der Flüssigkeitsreibung verschwindend gering ist gegenüber der Festkörperreibung und die störungsrelevanten Veränderungen der Reibkraft in einem Übergang von Mischreibung zu Festkörperreibung sowie im Anstieg der Festkörperreibung zu suchen sind.

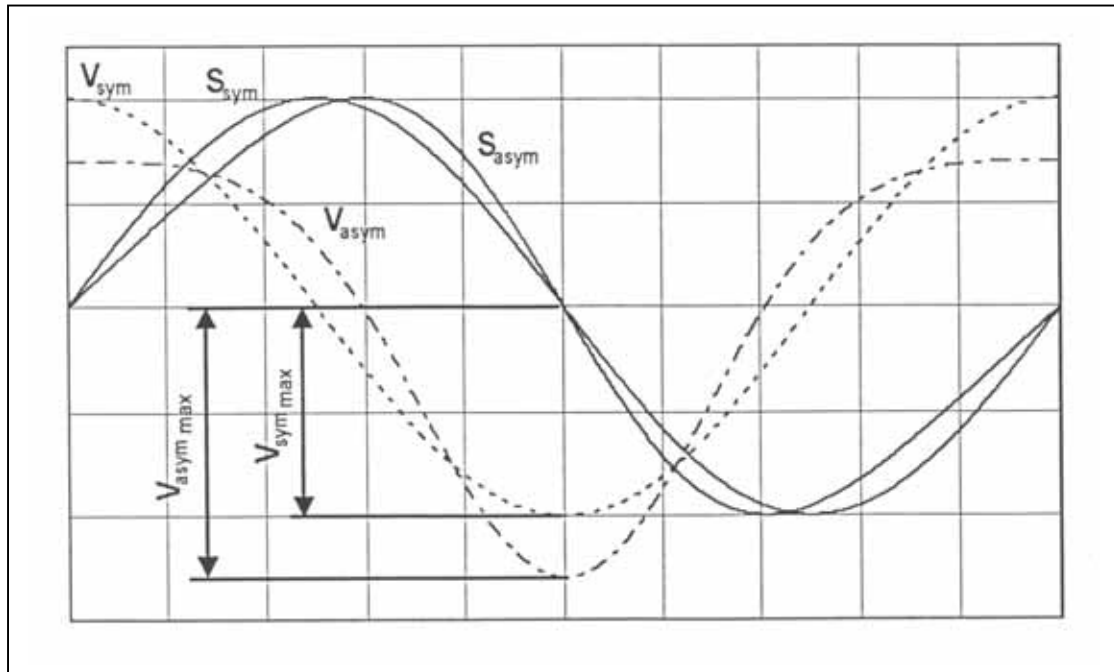


Bild 8.3: Asymmetrischer Verlauf der Kokillenszillation [Man94a]

8.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Datenerfassung und Verarbeitung erfolgte in zwei Phasen. In der ersten Phase wurden die Messdaten durch einen DAT-Rekorder erfasst und offline ausgewertet. In der zweiten Phase wurde ein mit Hilfe der Offline-Daten entwickelter Online-Prototyp einer PC basierenden Datenerfassung und Auswertung an dem Prüfstands Aufbau getestet und validiert. **Tabelle 8.1** zeigt den Messstellenplan der ersten Phase.

Meßpunkt	Meßstelle	Skalierung	Bemerkung
MP1	Drucksensor B	250 bar / 5 Volt	Ringraum
MP2	Drucksensor A	250 bar / 5 Volt	Kolbenraum
MP3	Beschleunigungssensor	49,4 m/s**2 / Volt	Wasserkasten in Richtung der Zylinder
MP6	Kraftaufnehmer	1000 N / Volt	Reibkraft
MP7	Wegaufnehmer	1 mm / Volt	Wegmesssystem im Zylinder
MP8	Gießgeschwindigkeit	1 m/min / Volt	Relativgeschw. Kontaktpunkt Bremse

Tabelle 8.1: Messstellenplan (vgl. Bild 8.1)

Obwohl die gesamte Messsensorik (mit Ausnahme des Beschleunigungssensors) am Prüfstand vorhanden war, wurden zusätzlich entsprechend kalibrierte Sensoren eingesetzt.

8.3 Ergebnisse der Prüfstandanwendung

Ein wesentlicher Parameter einiger Verfahren zur Reibkraftermittlung ist die sog. Leerlaufreibung oder auch Systemreibung. Die Systemreibung entsteht vor allen Dingen durch die Relativreibung der Blattfederpakete, Reibung innerhalb des hydraulischen Antriebes sowie durch Materialdämpfungen. Dieser Parameter unterscheidet sich von Kokille zu Kokille und ist daher in einer Setup-Phase der Kokillenüberwachung vorab zu ermitteln.

8.3.1 Leerlaufreibung

Die Leerlaufreibung der Versuchskokille wird durch die Komponenten Hydraulikzylinder sowie die Blattfederungen maßgeblich bestimmt. In der Produktionsanlage sind weiterhin die elastischen Koppелеlemente für die Plattenkühlung zu berücksichtigen. Während durch den Hydraulikzylinder Reibkräfte zwischen Kolben und Zylinderlaufbahn im Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung erzeugt werden, addieren sich die inneren Reibungen der einzelnen Blattfedern zu den Reibungsvorgängen zwischen den einzelnen Blattfedern der Federpakete. Die Leerlaufreibung stellt daher eine komplexe Funktion der Betriebsparameter und vor allen Dingen der Oszillationsbahn dar und lässt sich nicht durch eine Konstante erfassen. Allerdings ist anzumerken, dass der Beitrag der Hydraulik relativ zum Beitrag der Blattfederung vernachlässigbar ist. Daher wird vereinfacht eine Leerlaufreibungskorrektur eingeführt, die den Geschwindigkeitsverlauf der Kokille berücksichtigt. Diese Korrektur wird durch Abfahren des Betriebsfensters der Kokille ermittelt und hinterlegt.

Die Inbetriebnahme einer Kokillenüberwachung erfordert also in jedem Fall eine sogenannte Setup – Phase, die unter anderem eine Erfassung der Leerlaufreibung gestattet. Da die Produktion in der Regel über mehrere baugleiche Kokillen verfügt, bleibt die Übertragbarkeit der ermittelten Leerlaufreibung untereinander zu überprüfen.

Durch Variationen von Oszillationsfrequenz und –amplitude bzw. der resultierenden maximalen Oszillationsgeschwindigkeit ergibt sich die in **Bild 8.4** dargestellte lineare Abhängigkeit der Leerlaufreibkraft von der maximalen Oszillationsgeschwindigkeit. Die Leerlaufreibung folgt, wie in Bild 8.4 dargestellt, der Oszillationsgeschwindigkeit, die

zwischen Geschwindigkeit Null (Umkehrpunkte der Oszillationskurve) und dem Geschwindigkeitsmaximum (Nulldurchgang des Kokillenhubes) alterniert.

Die Leerlaufreibung wurde mit der Differenzialgleichungsmethode (s. Seite 16) ermittelt.

Zur Untersuchung wurde jeweils einer der Leerlaufparameter Oszillationsfrequenz oder Oszillationsamplitude konstant gehalten und der verbleibende Parameter im Rahmen des Betriebsfensters variiert. Bild 8.4 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen.

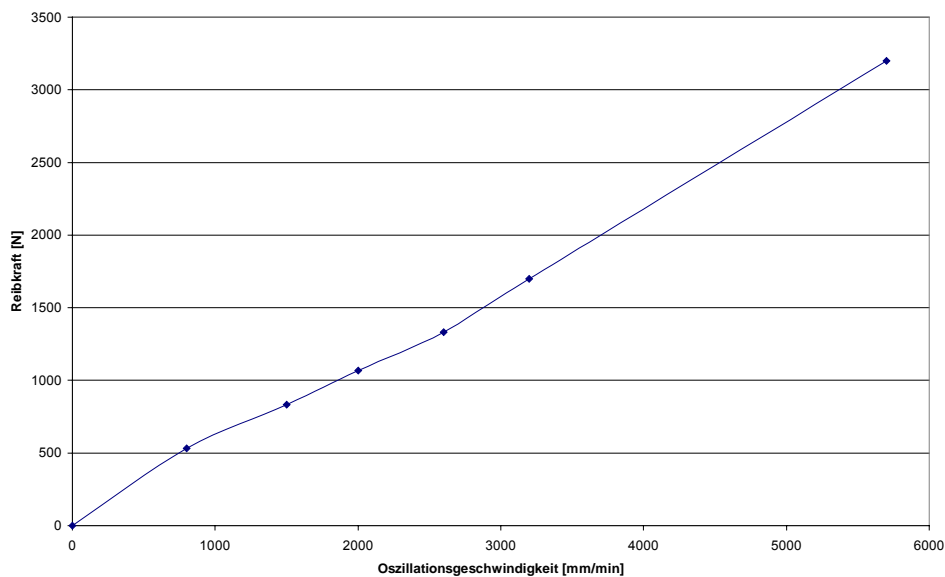


Bild 8.4: Abhängigkeit der Leerlaufreibung von der Oszillationsgeschwindigkeit

8.3.2 Differenzialgleichungsmethode

Die Differenzialgleichungsmethode lässt sich relativ schnell implementieren und gestattet die Überwachung der Reibkraft im Zyklus der Abtastfrequenz der Signale. Die Differenzialgleichungsmethode setzt sowohl die exakte Bestimmung der Parameter oszillierende Masse sowie resultierende Federsteifigkeit voraus als auch die zeitliche Konstanz dieser Größen, da Veränderungen dieser Größen direkt zu einer vermeintlichen Veränderung der resultierenden Reibkraft führen. Wie auch bei den anderen Methoden muss hier die Leerlaufreibung phasengleich abgezogen werden um die resultierende Strangreibung zu erhalten. Der Reibverlauf alterniert bei stillstehender Bremsscheibe zwischen Null (Nulldurchgang des Hubes) und dem Maximum (Umkehrpunkte des Hubes). Die Zone der Haftreibung in den Umkehrpunkten der Oszillation ist nicht besonders ausgeprägt. Bei Rotation der Bremsscheibe, die ja bekanntlich die Strangabzugsgeschwindigkeit simuliert, verschieben sich die Maxima, da sich der Zeitpunkt bzw. die Lage, an dem die Relativgeschwindigkeit zwischen Kokille und Bremsscheibe Null beträgt, verschiebt. Zusätzlich steigt der Offset der Reibkraft in Abhängigkeit vom Anpressdruck der Bremszange an. **Bild 8.5** zeigt den Verlauf der kalkulierten Reibkraft im Vergleich zu der gemessenen Reibkraft bei stetigem Anstieg des Anpressdruckes der Bremszange. Da primär der Anpressdruck, der in der Prüfstandanwendung die Reibung zwischen Strang und Kokille repräsentiert, von Interesse ist, wird das Ausgangssignal einer Mittelwertbildung unterzogen.

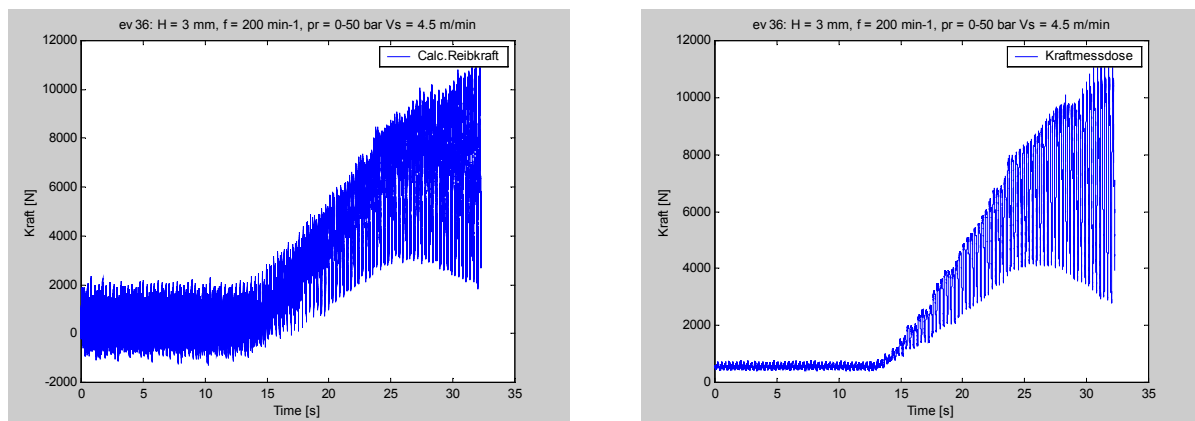


Bild 8.5: Vergleich der kalkulierten Reibkraft (links) mit der gemessenen Reibkraft (rechts)

8.3.3 Hysterese

Das Hysterese-Verfahren bietet zahlreiche Vorteile bezüglich der Implementierung und des Informationsinhaltes. Für die Darstellung der Hysterese werden lediglich die hydraulischen

Kammerdrücke der Antriebszylinder sowie der Kokillenhub, der in der Regel über interne Wegaufnehmer in den Zylindern abgenommen wird, benötigt. Im Gegensatz zur Differenzialgleichungs-, oder Beobachter - Methode sind keine Mehrfachdifferentiationen des Hubes notwendig. Ein weiterer Vorteil ist die Repräsentation sekundärer Systemfehler, wie z.B. Lose im Antriebsstrang, der großen Einfluss auf die Oberflächenqualität des Produktes haben kann. Dieser Fehler zeigt sich, wie nachfolgend noch dargestellt, sehr ausgeprägt im Hystereseverlauf, während bei den übrigen Verfahren aufwendige zusätzliche Signalanalysen zur Fehlerseparation angewandt werden müssen. Die Nachteile dieser Methode sind die Auswertezyklen, die in der Regel einen vollen Hub erfordern, sowie das Fehlen der Detailinformationen innerhalb eines Hubes. Bei genauerer Betrachtung der Zielstellung sind die Informationen für die Fehleranalyse völlig ausreichend. Darüber hinaus müsste beispielsweise der der Reibkraft zwischen Strang und Kokille proportionale Signaloffset bei den übrigen Verfahren durch Mittelwertbildung herausgerechnet werden, was ebenfalls zu einer Verlängerung der Zykluszeit führen wird. Die Leerlaufreibung, die dementsprechend mit dem Hystereseverfahren ermittelt wird, kann demnach als Skalar von dem aktuellen Reibwert abgezogen werden und erfordert keine phasengenaue Subtraktion. **Bild 8.6** zeigt exemplarisch die Hysterese bei den Oszillationsparametern $f = 300 \text{ min}^{-1}$ und $\text{Hub} = 3 \text{ mm}$.

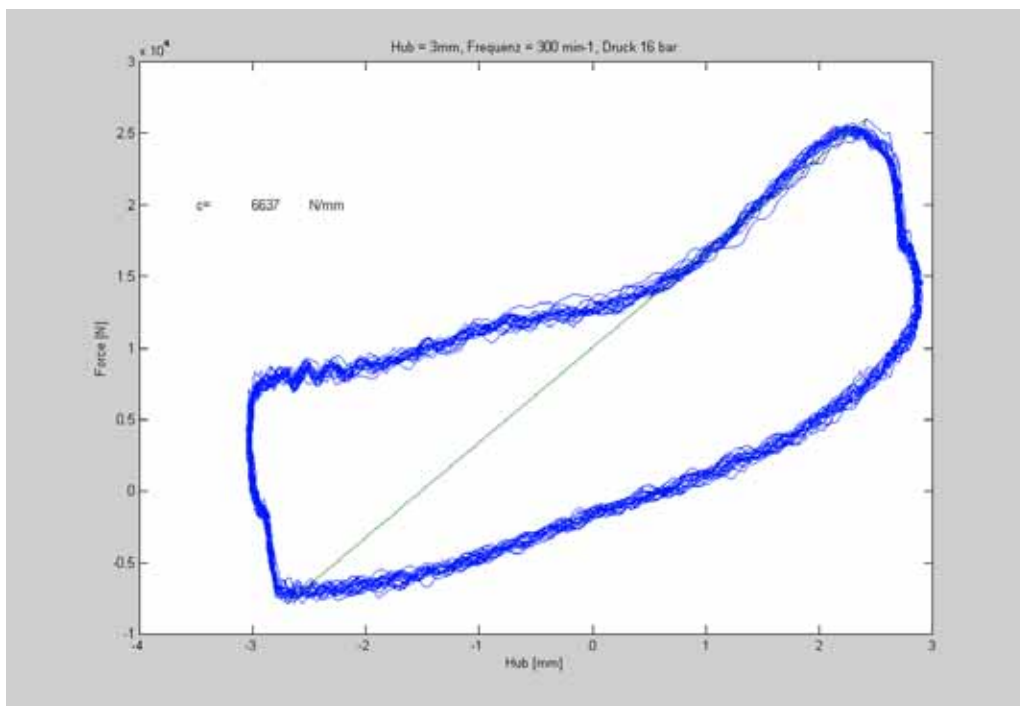


Bild 8.6: Hystereseverlauf bei den Oszillationsparametern $f = 300 \text{ min}^{-1}$ und $\text{Hub} = 3 \text{ mm}$

In **Bild 8.7** wird der Verlauf der Reibkraft bei stetigem Anstieg des Anpressdruckes der Bremszange dem Mittelwert der gemessenen Reibkraft gegenübergestellt. In **Bild 8.8** ist der Verlauf der Hysterese bei Auftreten einer Lose im Antriebsstrang dargestellt.

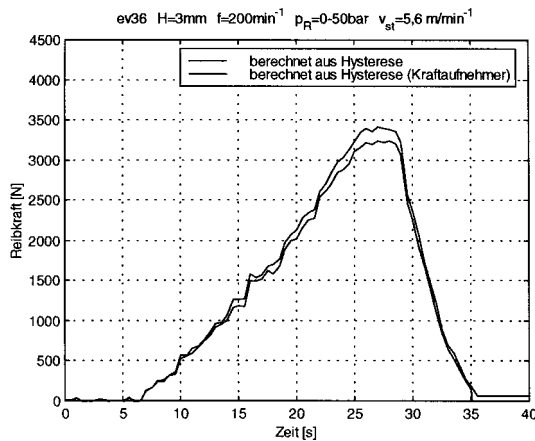


Bild 8.7: Berechnete und gemessene Reibkräfte

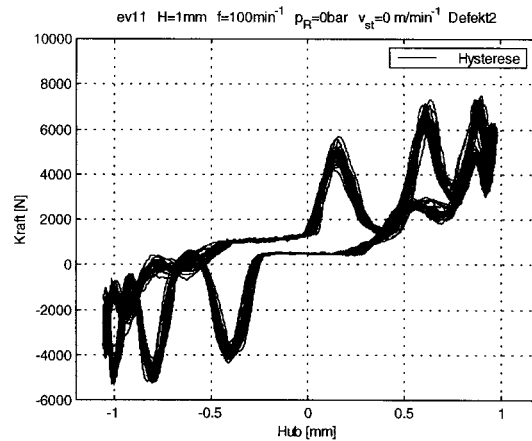


Bild 8.8: Hystereseverlauf bei Lose im Antrieb

8.3.4 Hystereseform

Obwohl die in Kapitel 6.3 dargestellten simulierten Hysteresekurven die Veränderungen der viskosen / coulomb'schen Reibung zufriedenstellend repräsentierten, stellt die Auswertung der Hystereseform der messtechnisch gewonnenen Daten kein anwendbares Verfahren zur Detektion von Reibkraftveränderungen dar. Die Ursache liegt einerseits in der Überlagerung durch Rauschsignale andererseits in der Abweichung der realen Hystereseform von der theoretisch ermittelten idealen Form.

8.3.4 Beobachter

Das Beobachtermodell ist relativ aufwendig zu implementieren. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Rechenaufwand, der einer Online - Verarbeitung der Reibkraft entgegen steht. **Bild 8.9** zeigt exemplarisch den Reibkraftverlauf bei den Oszillationsparametern $f = 300 \text{ min}^{-1}$ und $\text{Hub} = 3 \text{ mm}$. Typisch ist der asymptotische Verlauf der kalkulierten Reibkraft zu Beginn der Beobachteraufschaltung. Nach dem Einschwingen des Beobachtermodells wird ein sehr gutes phasenverschobenes Folgeverhalten erzielt.

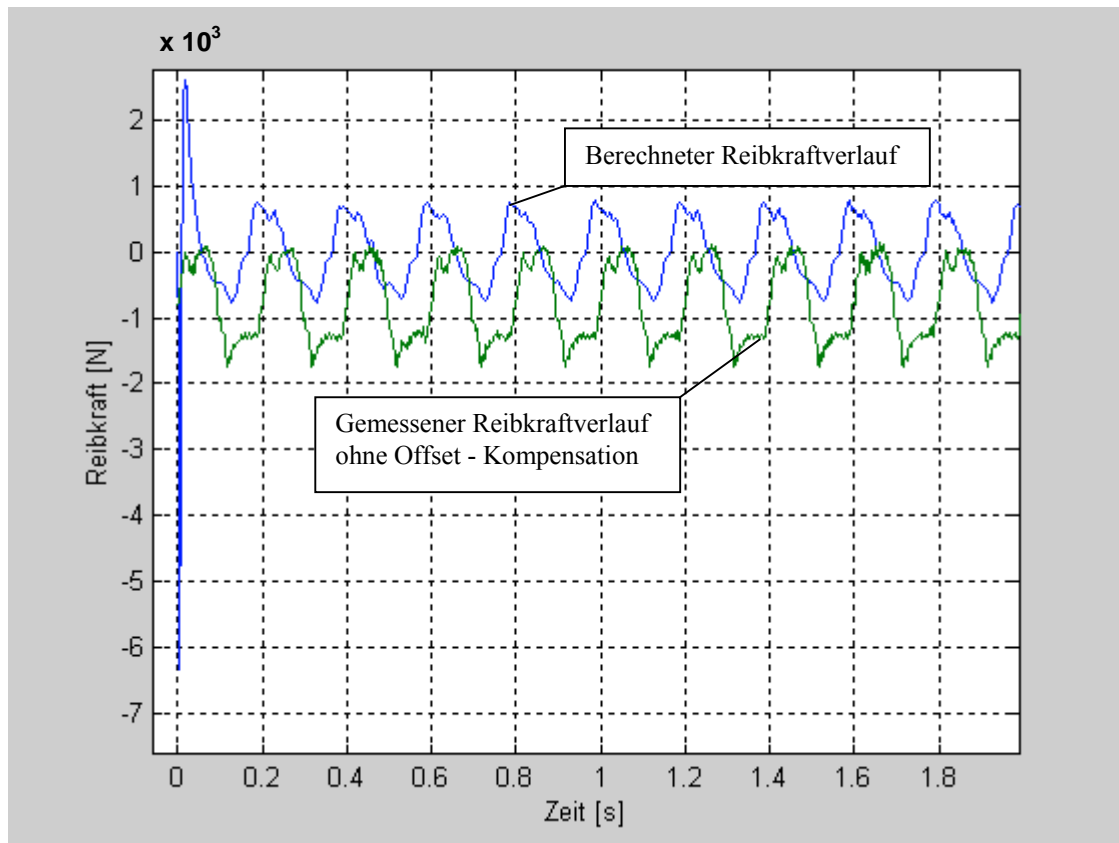


Bild 8.9: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Reibkraft

8.4 Fazit / Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich generell folgendes zu den oben beschriebenen Verfahren feststellen: Jedes der dargestellten Verfahren besitzt individuelle Vor- und Nachteile. Neben dem primären Ziel, die Reibkräfte bzw. deren Änderung mit ausreichender Genauigkeit zu detektieren, müssen unter Berücksichtigung der Implementierbarkeit der Algorithmen in ein Monitoring - System weitere Anforderungen an die Verfahren gestellt werden. Als zusätzliche Anforderungen sind beispielsweise die Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen, die Abarbeitungsgeschwindigkeit sowie geringe Anforderungen an die Hardware - Architektur des Monitoring - Systems zu nennen. Ein weiterer Aspekt ist das Detektionspotential des Verfahrens gegenüber möglichen weiteren Systemfehlern wie Lose im Antriebsstrang, Asymmetrien der Antriebseinheiten sowie Brüchen in den Blattfedern oder deren Anlenkungen.

Bei der *Differenzialgleichungsmethode* ist von Nachteil, dass die Masse und die Federkraft als konstant vorausgesetzt werden. Insbesondere bei kleinen Gießformen, mit verhältnismäßig geringen oszillierenden Massen, können nämlich Zusatzgewichte, wie veränderliche An- und Einbauten, Bedienpersonal auf der mitschwingenden Abdeckung, unterschiedliche Einstellungen von Eigengewichtskompensationen, Verschleiß, Ermüdung etc. das Auswertergebnis signifikant beeinflussen. Zudem geht die Berechnung von einer idealen Sinusschwingung des linearen Einmassenschwingers aus, wovon reale Kokillenoszillationen mehr oder weniger stark abweichen. Bei realen Kokillenoszillationen wird beispielsweise beobachtet, dass diese in verschiedene typische Schwingungsmoden, sogenannte Eigenformen, fallen. Diese können isoliert oder kombiniert auftreten und überlagern die Grundform in nur schwer vorhersehbarer Weise. Erschwerend für eine numerische bzw. rechnerische Ermittlung der Reibungskraft kommt hinzu, dass die Reibungskraft selbst Einfluß auf die Frequenzlage dieser Eigenschwingung nimmt, indem sie dämpfend wirkt. [SMS02]

Unter den vorgestellten Methoden zur Reibkraftermittlung stellt das *Hystereseverfahren* speziell unter Berücksichtigung systemrelevanter Faktoren wie z.B. Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen, Abarbeitungsgeschwindigkeit sowie geringe Anforderungen an die Hardware – Architektur, den vielversprechendsten Ansatz zur Reibkraftermittlung dar. Weiterhin wurden bei der Detektion des Systemfehlers Lose im Antriebsstrang die besten Ergebnisse erzielt.

Für die Reibkraftermittlung durch das *Beobachter – Modell* lassen sich prinzipiell die gleichen Nachteile wie für die Differenzialgleichungsmethode aufführen. Zusätzlich erfordert dieses Model die Echtzeitfähigkeit der Systemhard- und software, die die Implementierung in eine Überwachungssystem deutlich erschweren würde.

Bedingt durch das Signal - Rausch – Verhältnis sowie die prinzipielle geringfügige Änderung der *Hystereseform* bei Veränderung der Reibungszustände führte diese Methode zu keinem verwertbaren Ergebnis.

Weiterhin ist anzumerken, dass durch keines der Verfahren hinreichende Informationen bei Vorliegen eines Blattfederbruches zu erzielen waren. Der Blattfederbruch wurde durch den Ausbau einer Blattfeder aus dem Blattfederpaket simuliert. Speziell die Differenzialgleichungsmethode und das Beobachter - Modell lassen keine differenzierte Diagnose der Signaländerung zu. Der Ansatz, die resultierende Änderung der Gesamtfedersteifigkeit durch die Veränderung der Lage der Hysterese zu ermitteln, führte aufgrund des ungünstigen Signal – Rausch Verhältnisses ebenfalls zu keinem befriedigenden Ergebnis.

Zur Unterstützung der Auswahl des optimalen Verfahrens wurde ein Kriterienkatalog erstellt und die einzelnen Verfahren beurteilt. Die Beurteilung schließt die gleichzeitige Anwendung mehrerer Verfahren nicht aus. Vorab soll jedoch nur ein Verfahren eingesetzt werden um die notwendigen Erfahrungen im Produktionsbetrieb zu sammeln.

Kriterium	Differenzialgleichung	Hysterese	Hystereseform	Beobachter
Auflösung und Empfindlichkeit	++	+	o	++
Abweichung von gemessener Reibkraft	++	++	o	o
Rechenzeit	+	++	o	o
Zusätzlicher Informations-Gehalt	o	+	o	o
Implementierung	+	+	+o	o
Transparenz	+	++	+	o

Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der Verfahren ++ sehr gut, + gut, o befriedigend oo unzureichend

Erläuterung zu den Kriterien:

Auflösung und Empfindlichkeit	Beschreibt die Änderung der kalkulierten Reibkraft zur Änderung der tatsächlich eingepprägten Reibkraft
Abweichung von gemessener Reibkraft	Beschreibt die absolute Differenz zwischen der kalkulierten Reibkraft und der Änderung der tatsächlich eingepprägten Reibkraft
Rechenzeit	Benötigte Rechenzeit bezogen auf einen Oszillationszyklus
Zusätzlicher Informationsgehalt	Neben der Reibkraft enthaltenen Sekundärinformationen, wie beispielsweise Systemlose, die ohne zusätzliche aufwendige Analyseverfahren separiert werden können.
Implementierung	Implementierbarkeit mit speziellem Fokus auf die Online Verarbeitung der Messdaten.
Transparenz	Die Transparenz des Verfahrens ist ein wesentlicher Aspekt der die Systemakzeptanz der Anwender massiv beeinflusst und von dem die Interpretationsmöglichkeiten der Analyseergebnisse abhängt.

9 Ergebnisse aus einer Stranggieß – Anlage

Für die Untersuchungen steht eine zweisträngige Kreisbogenanlage mit einer maximalen Formatbreite von 2100 mm, einer Formatdicke von 250 mm und einer metallurgischen Länge von 31 Metern zur Verfügung. Die maximale Gießgeschwindigkeit der SGA beträgt 1,1 m/min. Die Anlage enthält zwei blattfedergelagerte Kokillen, die von der Firma Mannesmann Demag entwickelt wurden. Die benötigten Meßdaten der Kokille und der Anlage sind durch geeignete Hard- und Software am Rechner visualisier- und abrufbar.

Die Kokille ist mit 40 Thermoelementen ausgestattet, die eine kontinuierliche Überwachung der Kokillenwandtemperaturen gestatten. Zur Auswertung und Klassifikation der Meßdaten stehen keine einheitlichen Konzepte zur Verfügung. Während einige Anlagenbetreiber ausschließlich die Temperaturamplitude zur Kleberdetektion nutzen, verwenden andere den Temperaturgradienten bzw. eine Kombination aus beiden Werten. In einigen Systemen werden nicht nur die maximalen Temperaturwerte einzelner Meßstellen betrachtet, sondern zusätzlich das Verhalten der benachbarten Sensoren vorzugsweise in Gießrichtung.

In der betrachteten Anlage ist für einen Kleberalarm nicht die absolute Temperatur ausschlaggebend, sondern es sind die Temperaturgradienten. Übersteigt der Temperaturgradient einer Meßstelle einen vorab eingestellten Grenzwert, so wird vom Rechner eine Kleberwarnung ausgegeben. Bleibt der Grenzwert eine gewisse Zeit überschritten, erkennt das System dies als einen Kleber und greift in den Gießprozeß ein, indem es die Gießgeschwindigkeit auf 0,3 m/min reduziert. Anschließend wird die Gießgeschwindigkeit wieder auf den Ausgangswert kontinuierlich hochgefahren. Die für die Kleberwarnung und -erkennung relevanten Grenzwerte (für Temperaturgradient und Zeitdauer) werden als Parametersatz abgespeichert. Das Kleberfrüherkennungssystem kann so durch das Hochladen verschiedener Parametersätze auf unterschiedliche Stahlsorten eingestellt werden.

Die in der Anlage eingesetzte Kokille wird mit folgenden Oszillationsparametern betrieben:

- Konstante Hubamplitude von ± 3 mm
- Hubfrequenzbereich liegt zwischen 1 und 7 Hz
- Anpassung der Hubfrequenz an die Gießgeschwindigkeit
- 0 % Asymmetrie
- Maximale Gießgeschwindigkeit von 1,1 m/min

Damit eine zuverlässige Zustandsüberwachung auf Basis der Reibkraft entwickelt werden kann, müssen Reibkraftänderungen sowohl bei Gießereignissen im normalen Gießbetrieb als auch bei Störfällen bekannt sein. In diesem Kapitel werden die häufigsten Gießereignisse vorgestellt und erläutert. Mögliche Abhängigkeiten der Reibkraft von den Gießereignissen werden durch einzelne Beispiele dargestellt.

Für die Reibkraftermittlung wurde das Hysterese-Modell verwendet.

Um eine Zustandsüberwachung auf Basis der Reibkraft entwickeln zu können, müssen zunächst die Reibkraftverläufe der in Kapitel 9 vorgestellten Gießereignisse analysiert und ausgewertet werden. Dazu muß festgestellt werden, dass die folgende Auswertung nicht statistisch abgesichert ist. Die Ursache liegt unter anderem an der Vielzahl der Parameter, die auf die Reibkraft Einfluß nehmen können. So werden zum Beispiel in dieser Anlage über 100 Stahlsorten vergossen. Zusätzlich können sich zwei Schmelzen der gleichen Stahlsorte anhand der Zusammensetzung minimal unterscheiden. Dadurch muß auch die Stahlanalyse der einzelnen Schmelzen berücksichtigt werden. Weiterhin muß der Verschleiß der Anlagenteile (zum Beispiel Kokille, Kupferplatten, Verteiler, Stopfen, Tauchrohr) in die Auswertung einfließen. Dies ist aufgrund des begrenzten Zeitraumes im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar. In dieser Arbeit soll vielmehr untersucht werden, ob eine Zustandsüberwachung auf Basis der Reibkraft überhaupt realisiert werden kann. Um darüber eine Aussage machen zu können, ist keine statistische Auswertung nötig.

Für diese Auswertung sind die Meßdaten von über 100 Stahlschmelzen untersucht worden. In *Tabelle 9.1* sind die Daten der jeweiligen Gießereignisse quantitativ zusammengefaßt.

Gießereignis	Anzahl der Gießereignisse	Anzahl der Schmelzen	Anzahl der Stahlsorten	Anzahl der Gießpulver
Gießbeginn	6	6	6	4 FS, 2 PM
Gießende	12	12	7	4 FS, 2 PM, 2 IS, 3 V1, 1 CS
kurz vor Verteilerwechsel	8	8	7	5 FS, 3 PM
kurz nach Verteilerwechsel	9	9	8	9 FS
neg. Breitenverstellung bei konst. V_G	21	19	6	19 FS
pos. Breitenverstellung	7	7	6	6 FS, 1 PM

bei konst. V_G				
neg. Breitenverstellung bei ansteig. V_G	11	11	9	10 FS, 1 PM
Änderung der Gießgeschwindigkeit	7	6	4	4 FS, 2 PM
Zugabe des Gießpulvers	76	6	1	6 FM
Abschlacken	15	15	9	4 FS, 3 PM, 4 V1, 2 FM, 1 IS, 1 CS
Kleber	23	17	10	13 FS, 3 PM, 1 IS

Tabelle 9.1: Zusammenstellung der ausgewerteten Gießereignisse

So sind beispielsweise die Reibkraftverläufe von 23 Klebern erfaßt und ausgewertet worden. Diese Kleber verteilen sich auf 17 Schmelzen mit 10 verschiedenen Stahlsorten. Von den 17 Schmelzen wurden 13 mit dem Gießpulver mit der werksinternen Bezeichnung FS, drei mit dem Gießpulver PM und eine Schmelze mit Gießpulver IS vergossen.

Die Zuverlässigkeit eines Zustandsüberwachungssystems ist von der frühzeitigen Erkennung und Vermeidung von Störfällen abhängig. Aus diesem Grund wurden zunächst die Reibkraftverläufe bei Klebern auf eine mögliche Reibkraftänderung untersucht. Allerdings konnte die Reibkraftentwicklung bei Klebern nur bis zu dem Zeitpunkt der Klebererkennung beobachtet werden, da sich anschließend aufgrund der implementierten Temperaturüberwachung völlig neue Betriebsbedingungen einstellten. Ein weiteres Problem stellte die Aussagefähigkeit des Kleberfrüherkennungssystems dar. Nach Auslösung einer Alarmmeldung konnte erst die Analyse des Temperaturverlaufes des auslösenden Thermoelements eine Aussage darüber liefern, ob ein sogenannter „Minikleber“ (Fehlalarm) oder ein Kleber mit möglichen Beschädigungen der Brammenoberfläche vorlag.

9.1 Gießereignisse bei störungsfreiem Gießbetrieb

Folgende Gießereignisse wurden während des störungsfreien Gießprozesses auf mögliche Reibkraftänderungen untersucht:

- Gießbeginn
- Gießende
- Vor und nach Verteilerwechsel
- Positive und negative Breitenverstellung bei konstanter und sich ändernder Gießgeschwindigkeit
- Änderungen der Gießgeschwindigkeit
- Gießpulverzugabe
- Abschlacken

9.1.1 Gießbeginn

Der Gießbeginn ist einer der kritischsten Vorgänge im Gießprozeß, der mit großer Sorgfalt durchgeführt werden muß. Doch bevor angegossen werden kann, muß die Kokille an der unteren Seite verschlossen werden. Dies wird mit dem sogenannten Kaltstrangkopf erreicht. Der Kaltstrangkopf ist mit der Anfahrkette verbunden. Sie wird mit dem Kaltstrangkopf soweit durch die Kokille in die Anlage gezogen, bis die Oberkante des Kaltstrangkopfes das untere Drittel der Kokille erreicht hat. Der Spalt zwischen Kokille und Kaltstrangkopf wird abgedichtet und anschließend mit Metallspänen abgedeckt. Damit soll verhindert werden, dass flüssiger Stahl am Kaltstrangkopf vorbei in die Anlage gelangt. Wenn dies geschieht, hat das den sofortigen Gießabbruch zur Folge. Ein weiterer folgenschwerer Fehler kann bei dem Angießen entstehen, wenn der Gießspiegel in der Kokille zu hoch ist. Dabei kann flüssiger Stahl auf die Oberseite der Kupferplatten gelangen. Nach dem Erstarren des Stahls kann dies zu einem Durchbruch führen, da die sich bildende Strangschale an der Oberkante der Kokille festhängt. **Bild 9.1** zeigt drei Beispiele von Reibkraftverläufen während des Angießens.

Während des Gießbeginns ist stets ein Ansteigen der Reibkraft zu verzeichnen. Erreicht die Gießgeschwindigkeit 0,4 - 0,5 m/min, sinkt die Reibkraft auf ein normales Reibkraftniveau. Das Reibkraftmaximum variiert bei den zur Verfügung stehenden Reibkraftverläufen zwischen 10 und 16 kN. Es ist bei allen Gießereignissen abhängig von der Paarung *Stahlsorte/Gießpulver*.

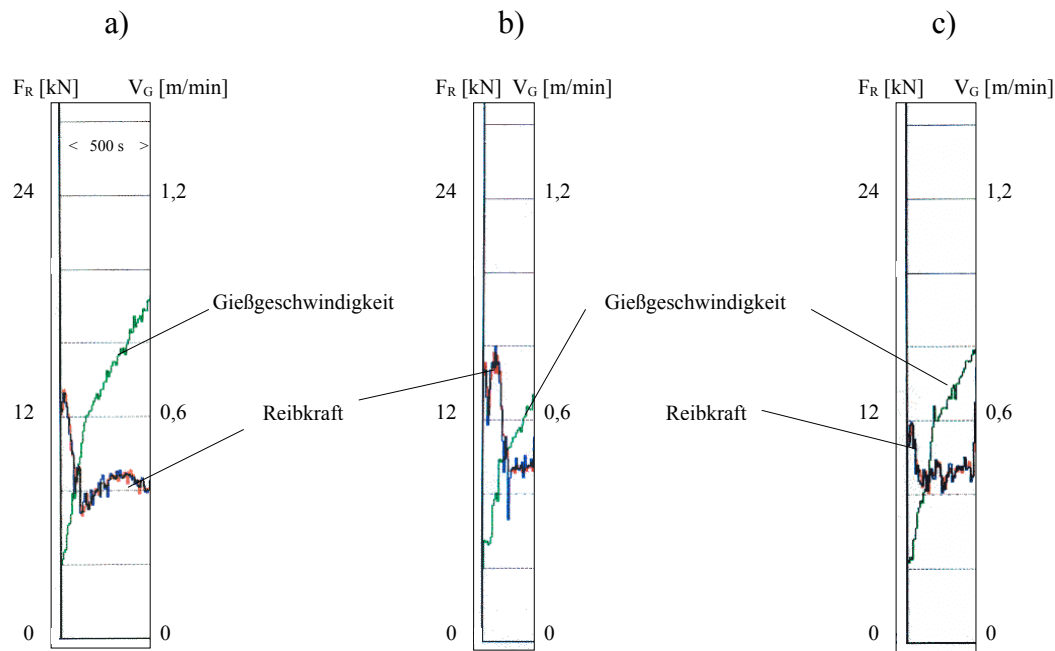


Bild 9.1: Reibkraftverläufe bei Gießbeginn: a) Stahlgüte: ST 15; Gießpulver: FS, b) ZSTE 2201; FS, c) SB 36F NB-CE T; PM

9.1.2 Gießende

In der untersuchten Stranggießanlage wird der sog. Sequenzguß durchgeführt. Mit Hilfe des fliegenden Pfannen- und Verteilerwechsels werden bis zu 40 Schmelzen vergossen. Am Ende einer Sequenz läuft der Verteiler leer, bis er nur noch Schlacke enthält. Nachdem der Ausguß des Verteilers mit dem Stopfen verschlossen worden ist, wird der Verteiler mit dem Tauchrohr angehoben und seitlich weggefahren. Der Gießer entfernt mit einer fahnenförmigen Metallschaufel das restliche Gießpulver vom Gießspiegel der Kokille. Dieser Vorgang wird Abschlacken genannt. Inzwischen wird die Gießgeschwindigkeit stufenförmig heruntergefahren. Das Strangende wird nun mit Wasser besprüht, um die Erstarrung zu beschleunigen. Anschließend wird die Gießgeschwindigkeit wieder hochgefahren und der Strang aus der Anlage gezogen. Danach wird entweder die nächste Sequenz vorbereitet oder es werden an der Anlage nötige Reparaturen durchgeführt. In **Bild 9.2** sind einige Reibkraftverläufe des Gießendes zusammengestellt. Während der Reibkraftverlauf in **Bild 9.2a** die reine Strangreibung darstellt, wurden bei den Reibkraftverläufen in **Bild 9.2b/c** die Systemreibung nicht abgezogen. Dies hat ein höheres Reibkraftniveau zur Folge.

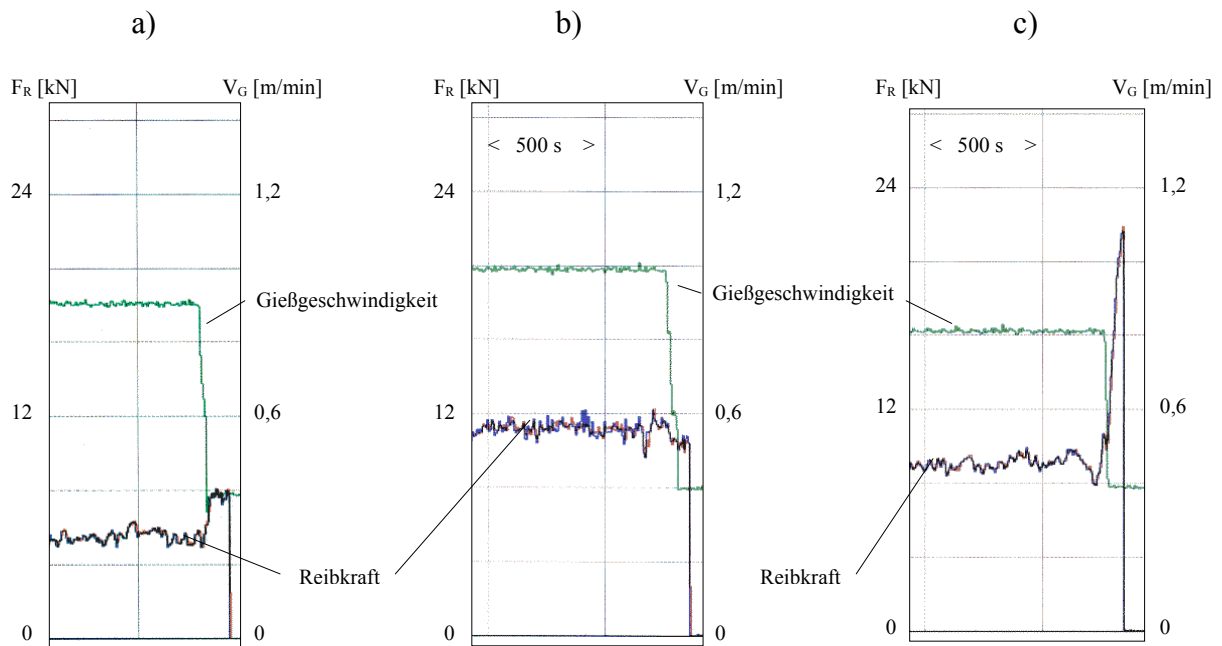


Bild 9.2: Reibkraftverläufe bei Gießende: a) Stahlgüte: ST 15 MD; Gießpulver: FS, b) RST 37; PM; c) Güte S VAK07Z*62; V1

Während des Gießendes ist ein deutlicher Anstieg der Reibkraft bei der Verwendung der Gießpulver FS und V1 zu erkennen, während bei dem Gießpulver PM keine oder nur eine sehr leichte Steigung der Reibkraft sichtbar wird. Anhand der vorliegenden Meßdaten liegt das Reibkraftmaximum bei Gießende in etwa zwischen 8 und 20 kN. Allerdings ist der registrierte Reibkraftanstieg eindeutig auf das Abschlacken zurückzuführen, das bei jedem Gießende durchgeführt wird.

9.1.3 Verteilerwechsel

Je nach Anzahl der Schmelzen einer Sequenz muß der Verteiler ein- oder mehrmals gewechselt werden. Aufgrund der großen Hitzeentwicklung werden der Verteiler und das Tauchrohr sehr stark beansprucht. Der Verschleiß ist zusätzlich abhängig von der Stahlgüte, die vergossen wird.

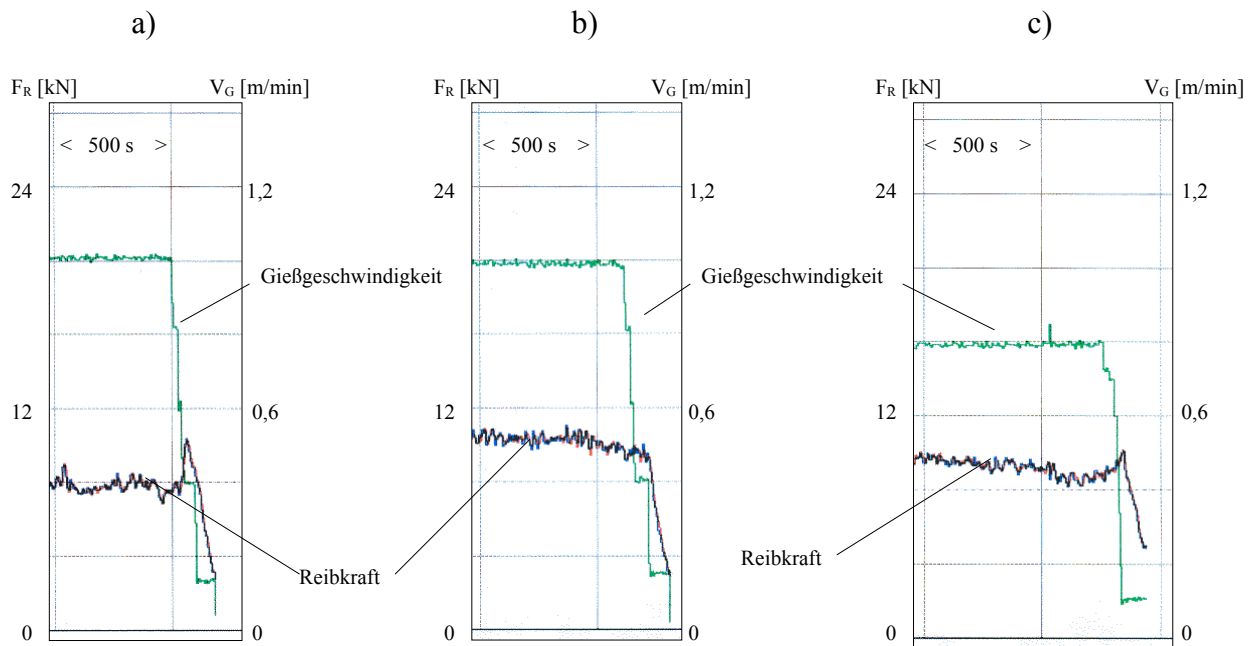


Bild 9.3: Reibkraftverläufe vor einem Verteilerwechsel: a) Stahlgüte: ST 15 SG-V; Gießpulver: FS, b) PT 355 A+B-W2; PM, c) QST 44-3 WB Z; PM

Der Verteilerwechsel wird zeitgleich mit einem Pfannenwechsel durchgeführt. Dabei wird der Verteiler soweit angehoben, bis das Tauchrohr über den oberen Kokillenrand ragt. Der Verteiler kann nun zusammen mit dem Tauchrohr seitwärts auf Schienen weggefahren werden. Anschließend wird der neue Verteiler, der zuvor mehrere Stunden durch Gasbrenner vorgewärmt worden ist, über der Kokille in Position gefahren. Nach dem Absenken des neuen Verteilers kann mit dem Öffnen der inzwischen neuen Pfanne der Gießbetrieb fortgeführt werden. Während des Verteilerwechsels wird die Gießgeschwindigkeit stark heruntergefahren. Auf diese Weise wird die Kokille als Puffer genutzt. Durch langsames Leerlaufen der Kokille erhält man die für den Wechsel benötigte Zeit. In **Bild 9.3** und **Bild 9.4** sind einige Reibkraftverläufe kurz vor und kurz nach einem Verteilerwechsel dargestellt. Dieser Vorgang ist prinzipiell mit den Ereignissen *Gießende* bzw. *Gießbeginn* gleichzusetzen.

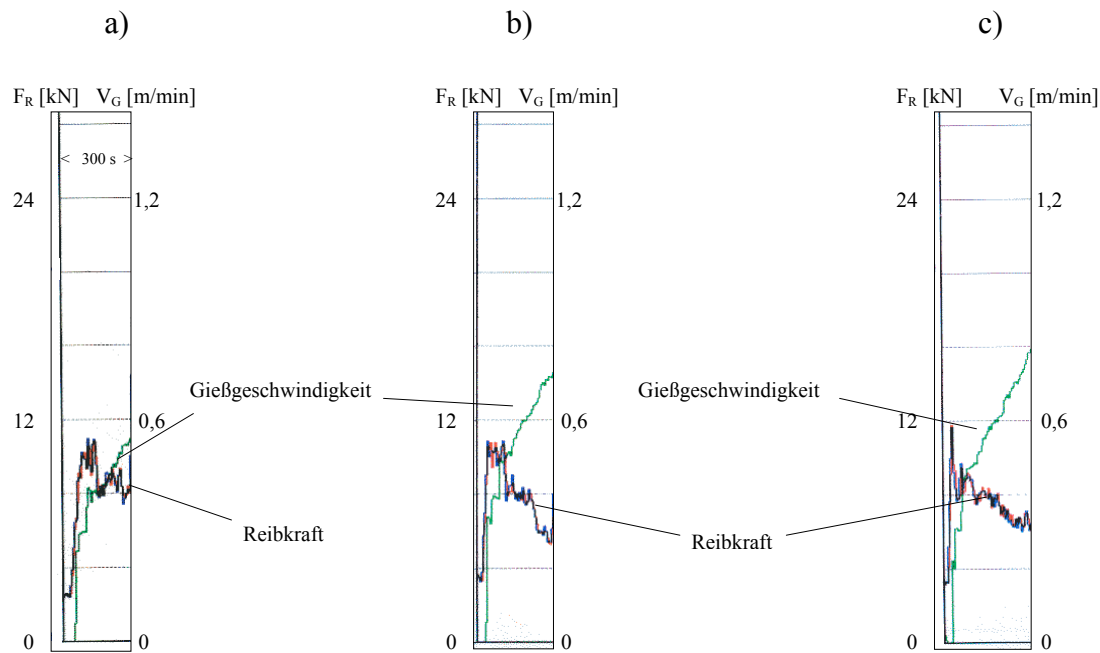


Bild 9.4: Reibkraftverläufe nach einem Verteilerwechsel: a) Stahlgüte: ST 15 MD-S; Gießpulver: FS; b) ST 52-3 SG-ZN; FS, c) S 235 JO / SZW68-P; FS

Das Gießereignis *Verteilerwechsel* ist im Hinblick auf die Reibkraft in zwei Bereiche einzuteilen. Dabei sind die Zeiträume kurz vor und kurz nach einem Verteilerwechsel von Interesse. Diese Bereiche besitzen eine große Ähnlichkeit mit den Gießereignissen *Gießbeginn* und *Gießende*.

So ist kurz nach einem Verteilerwechsel ähnlich wie bei einem Gießbeginn ein Ansteigen der Reibkraft festzustellen. Allerdings hält der Reibkraftanstieg länger an, bevor die Reibkraft bei dem Erreichen der Gießgeschwindigkeit von 0,4 - 0,5 m/min zum Teil langsam auf das normale Reibkraftniveau sinkt. Das Reibkraftmaximum liegt kurz nach einem Verteilerwechsel zwischen 9 und 15 kN.

Kurz vor einem Verteilerwechsel wird die Gießgeschwindigkeit heruntergefahren. Ist die Gießgeschwindigkeit von 0,4 m/min erreicht, kann ein deutlicher Anstieg der Reibkraft bei der Verwendung des Gießpulvers FS beobachtet werden. Bei dem Gießpulver PM ist keine oder nur eine sehr leichte Steigung der Reibkraft zu sehen. Aus den vorliegenden Reibkraftverläufen geht hervor, dass die maximale Reibkraft zwischen 10 und 13 kN liegt. Im Gegensatz zum Gießende wird kurz vor einem Verteilerwechsel nicht abgeschlackt. Falls ein Gießpulverwechsel ansteht, wird einige Zeit (ca. 10-20 Minuten) vor dem Verteilerwechsel abgeschlackt.

9.1.4 Breitenverstellung

Um den Sequenzguß ausführen zu können, muß die Möglichkeit bestehen, während des Gießbetriebes die Strangbreite zu verändern. Diese Breitenverstellung der Brammenkokille wird durch das automatische Verstellen der Schmalseiten vorgenommen. Dabei werden die Schmalseiten kontinuierlich mit einer Verstellhydraulik bewegt. Zunächst wird die Konizität geändert. Anschließend werden bei dieser geänderten Konizität die Schmalseiten nach außen bzw. innen (positive bzw. negative Breitenverstellung) bewegt, bis die gewünschte Strangbreite erreicht ist. Daraufhin wird die normale Konizität wieder eingestellt. In den folgenden **Bildern 9.5 – 9.7** wird anhand einiger Beispiele der Zusammenhang zwischen Reibkraft und Breitenverstellung dargestellt. Dabei wird zwischen positiver und negativer Breitenverstellung unterschieden. Zusätzlich wird berücksichtigt, ob die Breitenverstellung bei konstanter oder sich ändernder Gießgeschwindigkeit vorgenommen wurde. Die Bereiche, in denen die Strangbreite verstellt wurde, sind in den Bildern besonders gekennzeichnet. Es ist zu erwähnen, dass in **Bild 9.5c** die Gesamtreibung abgebildet ist.

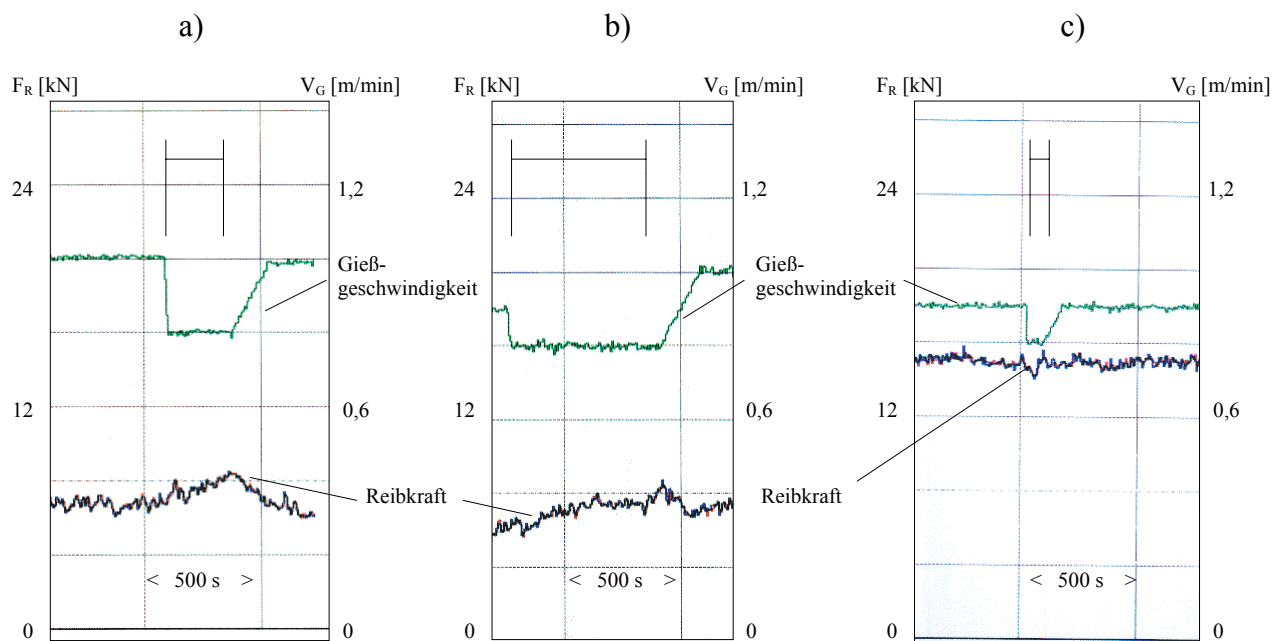


Bild 9.5: Reibkraftverläufe bei positiver Breitenverstellung und konstanter Gießgeschwindigkeit: a) Stahlgüte: ST 15; Gießpulver: FS, b) PSK 34/-ZN; FS, c) QST 44-3 WB Z; PM

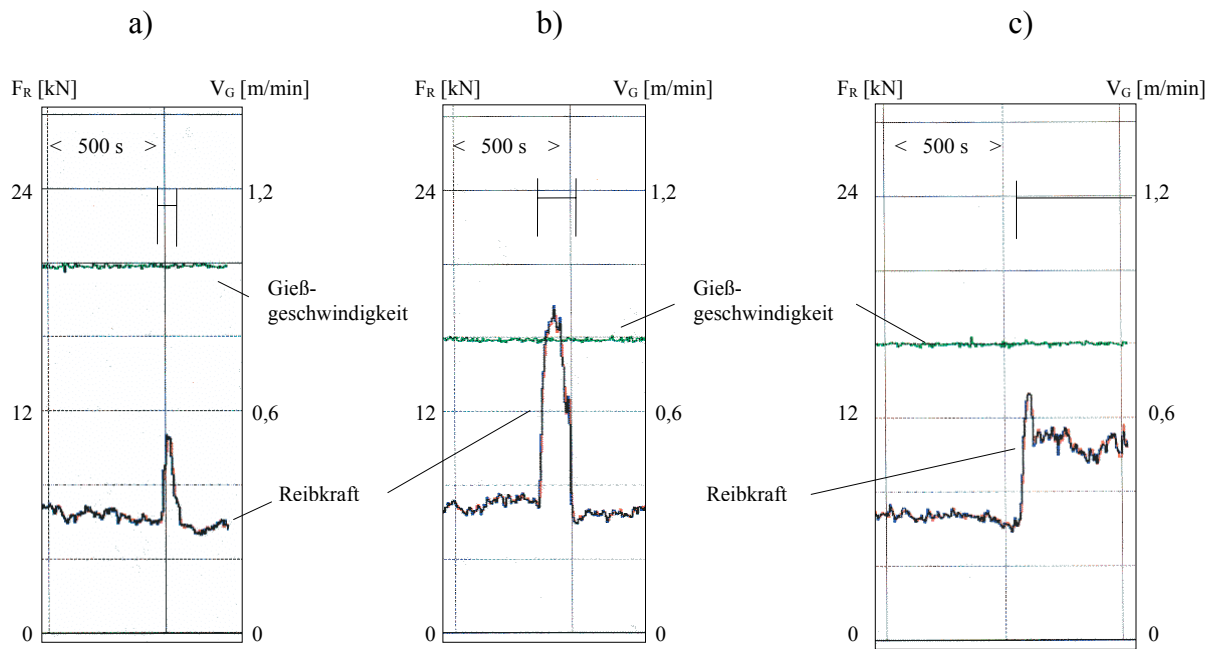


Bild 9.6: Reibkraftverläufe bei negativer Breitenverstellung und konstanter Gießgeschwindigkeit: a) Stahlgüte: ST 15; Gießpulver: FS, b) ST 15 MD; FS, c) ST 37-2 RA; FS

Da bei dem Absenken der Gießgeschwindigkeit keine Breitenverstellung vorgenommen wird, ist ausschließlich die Breitenverstellung bei ansteigender Gießgeschwindigkeit von Interesse. Aufgrund der Ergebnisse bei positiver Breitenverstellung wird hierbei nur die negative Breitenverstellung berücksichtigt (**Bild 9.7**).

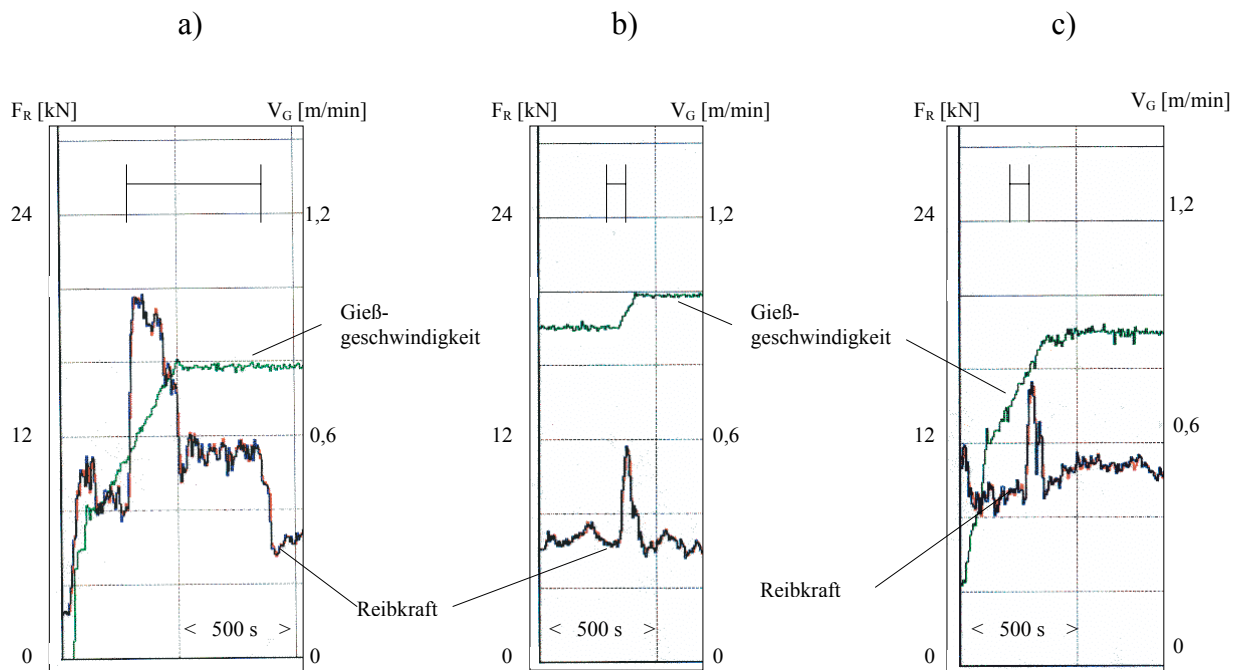


Bild 9.7: Reibkraftverläufe bei negativer Breitenverstellung und ansteigender Gießgeschwindigkeit: a) Stahlgüte: ST 15 MD-S; Gießpulver: FS, b) ST 15; FS, c) SB 36F NB-CE T; PM

Die Breitenverstellung wird in folgende Bereiche unterteilt:

- a) Positive Breitenverstellung bei konstanter Gießgeschwindigkeit
- b) Negative Breitenverstellung bei konstanter Gießgeschwindigkeit
- c) Negative Breitenverstellung bei steigender Gießgeschwindigkeit

a) Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die positive Breitenverstellung bei konstanter Gießgeschwindigkeit kaum einen Einfluß auf die Reibkraft ausübt. So ist bei der Verwendung des Gießpulvers FS nach einer positiven Breitenverstellung teilweise eine leichte Steigung der Reibkraft zu sehen. Kommt das Gießpulver PM zum Einsatz, kann hingegen zum Teil ein leichter Abfall der Reibkraft beobachtet werden. Es ist aber keine eindeutige Reibkraftänderung als Reaktion auf die positive Breitenverstellung zu erkennen.

b) Dagegen bewirkt die negative Breitenverstellung bei konstanter Gießgeschwindigkeit einen starken Anstieg der Reibkraft. Dabei kann das Reibkraftmaximum zwischen 8 und 18 kN liegen. Dies ist wiederum abhängig von der Stahlsorte und dem verwendeten Gießpulver. Es konnte nicht eindeutig belegt werden, ob das Reibkraftmaximum von der Strangbreite und/oder von der Dauer beziehungsweise der Größe der negativen Breitenverstellung abhängig ist.

c) Die negative Breitenverstellung bei ansteigender Gießgeschwindigkeit hat ebenfalls einen deutlichen Reibkraftanstieg zur Folge. Hierbei kann das Reibkraftmaximum je nach Stahlsorte und Gießpulver zwischen 9 und 20 kN variieren. Während der Auswertung fiel auf, dass eine mögliche Abhängigkeit zwischen dem Reibkraftmaximum und der Höhe der Gießgeschwindigkeit zum Anfangszeitpunkt der Breitenverstellung besteht. Jedoch müssen zur Bestätigung dieser Annahme noch weitere Reibkraftverläufe erfaßt und ausgewertet werden.

9.1.5 Änderungen der Gießgeschwindigkeit

Während des Gießbetriebes wird aus verschiedenen Gründen die Gießgeschwindigkeit variiert. So wird bei einem Gießbeginn beziehungsweise kurz nach einem Verteilerwechsel und kurz nach einer Klebererkennung die Gießgeschwindigkeit auf ihren Sollwert hochgefahren. Beim Auftreten von Problemen im Gießbetrieb wird die Gießgeschwindigkeit je nach Dringlichkeit in Schritten von 0,1 – 0,2 m/min direkt heruntergefahren. Dadurch erhält man die nötige Zeit, Probleme zu beheben. Beispielsweise ist es möglich, dass sich nach einem Pfannenwechsel die neue Pfanne nicht öffnet. Sie muß dann mit Hilfe eines

Manipulators aufgebrannt werden. Ein weiteres Problem ist das Zusetzen des Tauchausgusses. Mit zunehmender Gießdauer kann sich sowohl die Ausgussöffnung des Verteilers als auch das Tauchrohr aufgrund von Ablagerungen zusetzen.

Für eine bevorstehende Breitenverstellung muß die Gießgeschwindigkeit je nach Stahlgüte und aktueller Gießgeschwindigkeit aus Sicherheitsgründen ein wenig heruntergefahren werden. Beim Abschlacken wird ähnlich verfahren.

Bei den oben beschriebenen Gießereignissen - *Gießbeginn* und *Verteilerwechsel* – sind Beispiele von Reibkraftverläufen während eines längeren Anstieges der Gießgeschwindigkeit abgebildet. In **Bild 9.8** sind einige Reibkraftverläufe bei Änderungen der Gießgeschwindigkeit dargestellt.

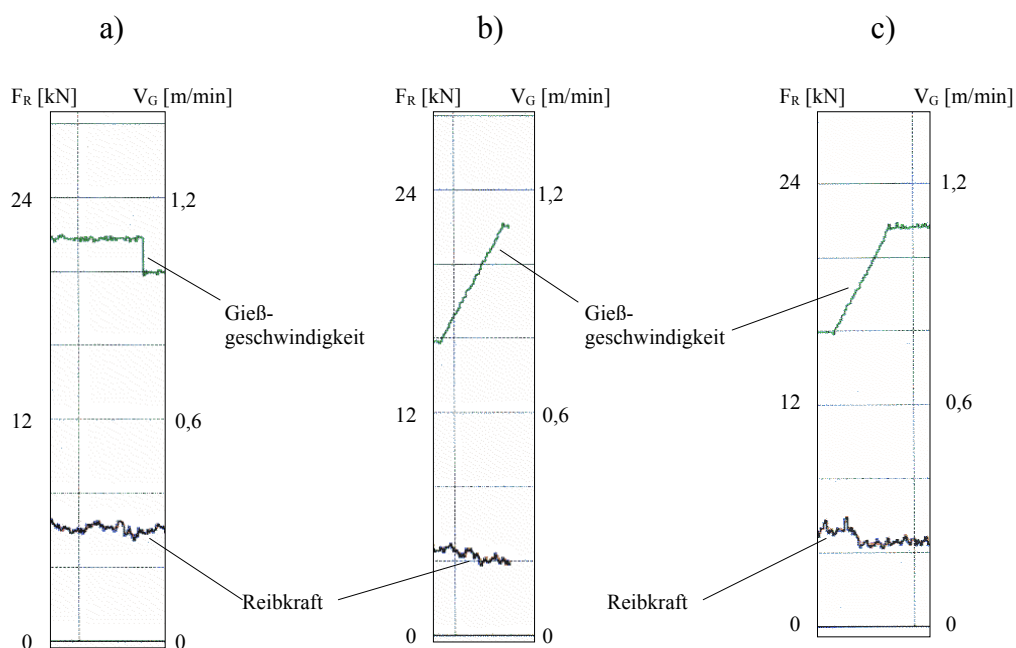


Bild 9.8: Reibkraftverläufe bei Änderung der Gießgeschwindigkeit: a) Stahlgüte: ST 14; Gießpulver: FS, b) ST 14; FS, c) ST 14; FS

Wird die Gießgeschwindigkeit oberhalb von etwa 0,6 m/min in kleinen Schritten erhöht oder gesenkt, hat diese Veränderung keinen besonderen Einfluß auf die Reibkraft. Allerdings wird bei einem längeren Hochfahren der Gießgeschwindigkeit unterhalb von 0,6 m/min ein zum Teil deutlicher Anstieg der Reibkraft festgestellt (siehe *Gießbeginn*, *Verteilerwechsel* und *Kleber*). Außerdem ist bei einem Herunterfahren der Gießgeschwindigkeit unterhalb von 0,6 m/min ein Reibkraftanstieg zu beobachten (siehe *Verteilerwechsel*).

9.1.6 Gießpulverzugabe

Das Gießpulver wird manuell auf den Stahlbadspiegel der Kokille gegeben. Der Gießer verteilt mit Hilfe einer Schaufel das Gießpulver auf den flüssigen Stahl. Dabei bestimmt allein der Gießer die Zeitpunkte der Gießpulverzugabe.

Das Gießpulver hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Schutz des Metalls vor der Oxidation durch die Umgebungsluft
- Schmierung des Kontaktes zwischen Strangschale und Kokillenwand
- Unterstützung eines gleichmäßigen, an die Gießbedingungen angepaßten Wärmeüberganges von der Schmelze auf die Kokillenwand
- Wärmeisolation zur Verhinderung einer Teilerstarrung an der Stahlbadoberfläche
- Absorption von Einschlüssen, die im flüssigen Stahl an die Oberfläche aufsteigen

Um eine mögliche Abhängigkeit der Reibkraft von der Gießpulverzugabe feststellen zu können, wurden während sechs hintereinander vergossenen Schmelzen die Zeitpunkte der Gießpulverzugabe erfaßt. Anschließend wurden diese Zeitpunkte in die jeweiligen Reibkraftverläufe übertragen und wie in **Bild 9.9** dargestellt, gekennzeichnet. Da die Gießpulverzugabe manuell erfolgt, wurde die Zugabe durch unterschiedliche Gießer bei den Reibkraftverläufen berücksichtigt.

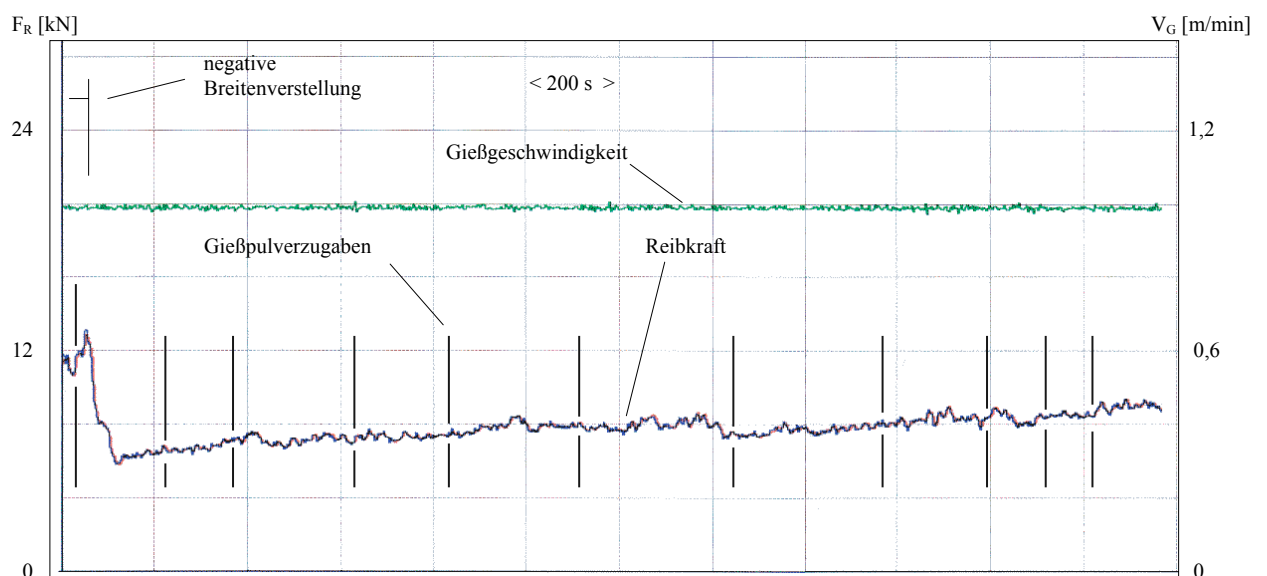


Bild 9.9: Reibkraftverlauf während der Gießpulverzugabe: Stahlgüte: PSK 30; Gießpulver: FM; Gießer: C

Für diese Untersuchung wurden die genauen Zeitpunkte der Gießpulverzugabe bei sechs aufeinander folgenden Schmelzen erfaßt und in die Reibkraftverläufe eingetragen. Bei der Auswertung dieser Reibkraftverläufe konnte jedoch keine Abhängigkeit der Reibkraft von der Gießpulverzugabe erkannt werden.

9.1.7 Abschlacken

Beim Abschlacken wird das Gießpulver von der Oberfläche des Badspiegels in der Kokille mit Hilfe einer fahnenförmigen Metallschaufel manuell abgeschöpft. Das Abschlacken wird stets bei einem Gießende und teilweise bei einem Gießpulverwechsel während des Gießbetriebes durchgeführt.

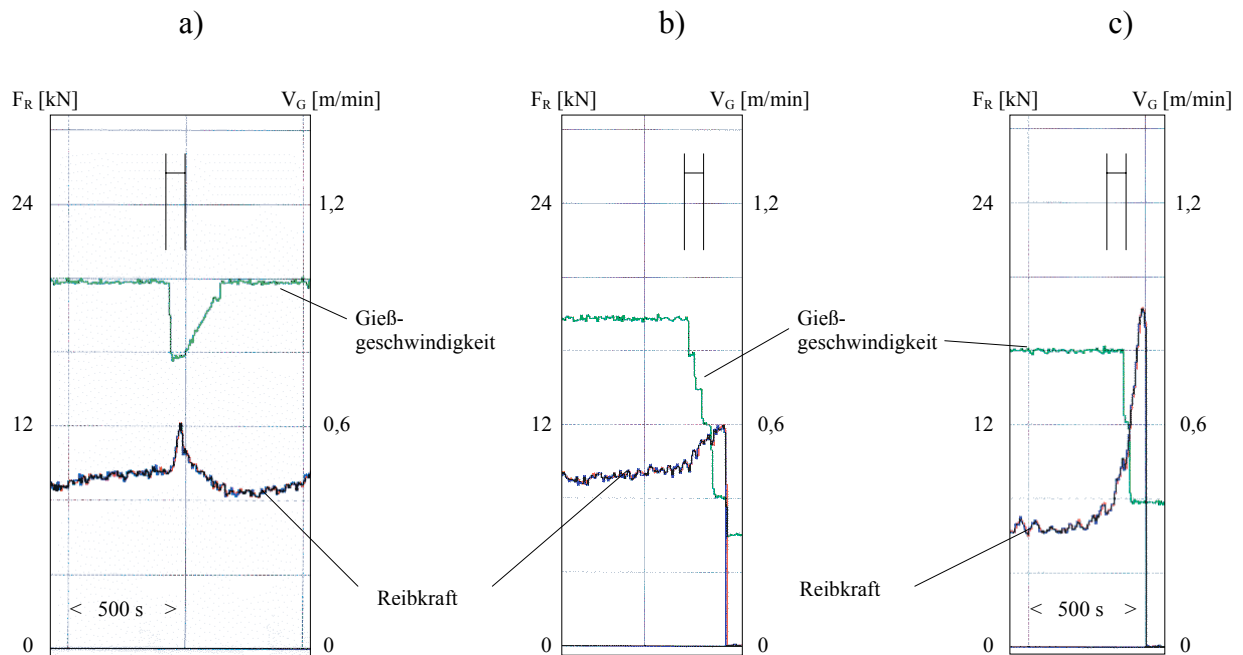


Bild 9.10: Reibkraftverläufe beim Abschlacken: a) Stahlgüte: S 235 JO / SZW68-P; Gießpulverwechsel von FS auf PM, b) S 235 JO / SZWT68-PE; FS, c) Güte s VAK07Z*62; V1

Muß aufgrund einer anderen Stahlgüte das Gießpulver gewechselt werden, wird bei einer Unverträglichkeit der beiden Gießpulver abgeschlackt. Dies geschieht kurz vor Beginn der neuen Schmelze mit dem neuen Gießpulver. Dafür wird die Gießgeschwindigkeit aus Sicherheitsgründen auf 0,8 m/min heruntergefahren (*Bild 9.10 a*). In *Bild 9.10 b/c* sind die Reibkraftverläufe vom Abschlacken bei Gießende abgebildet. Während in *Bild 9.10 a* die Strangreibung dargestellt wird, ist in *Bild 9.10 b/c* die Gesamtreibung zu sehen.

Bei einem Gießpulverwechsel muß teilweise während des Gießbetriebes abgeschlackt werden. Dazu wird aus Sicherheitsgründen die Gießgeschwindigkeit auf 0,8 m/min heruntergefahren. Während des Abschlackens kann je nach Stahlsorte und Gießpulver ein Anstieg der Reibkraft festgestellt werden. Allerdings konnten nur wenige Messdaten über

diesen Vorgang erfaßt werden, da der genaue Zeitpunkt des Abschlackens in den Reibkraftverläufen nicht erkennbar war.

Im Gegensatz zum Gießpulverwechsel wird bei einem Gießende immer abgeschlackt. Dabei ist zum Teil ein sehr starkes Ansteigen der Reibkraft zu verzeichnen. So kann beispielsweise das Reibkraftmaximum bei Verwendung des Gießpulvers V1 zwischen 10 und 20 kN liegen. Werden die Gießpulver FS, FM oder PM verwendet, liegt das Reibkraftmaximum bei den vorliegenden Messdaten zwischen 8 und 10 kN.

9.2 Störfälle

Für die Entwicklung der Zustandsüberwachung ist die genaue Kenntnis der Reibkraftverläufe beim Auftreten von Störfällen besonders wichtig. In der Regel ist es jedoch kaum möglich, von bestimmten Störfällen im Gießbetrieb, wie z.B. einem Durchbruch, die jeweiligen Reibkraftverläufe zu ermitteln. In diesen Fällen muß man auf die Simulation an einer Versuchsanlage zurückgreifen oder durch eine geeignete Abschätzung auf mögliche Erkennungsmerkmale schließen. Allerdings ist eine Validierung der simulierten beziehungsweise theoretischen Ergebnisse im realen Gießprozess aus den oben genannten Gründen nur selten möglich. Im folgenden Kapitel wird ausschließlich die Wechselwirkung des Störfalles *Kleber* mit den Reibkraftverläufen beschrieben und auf typische Erkennungsmerkmale untersucht, da dieser Störfall relativ häufig auftritt und durch ein vorhandenes Kleberfrüherkennungssystem analysiert wird.

9.2.1 Kleber

Eine häufige Ursache für Durchbrüche sind Kleber, die durch lokales Anhaften der Strangschale an der Kokillenwand entstehen. Reißt die Strangschale an dieser Stelle auf, tritt flüssiger Stahl aus und kommt mit der Kokillenwand in Kontakt. Durch eine Reduzierung der Gießgeschwindigkeit wird die defekte Stelle länger in der Kokille gehalten. Auf diese Weise wird das beschädigte Teilstück der Strangschale eine längere Zeit gekühlt und kann wieder ausheilen. Somit können Kleber als frühzeitiges Merkmal für mögliche Durchbrüche genutzt werden.

Das in der untersuchten Anlage eingesetzte Kleberfrüherkennungssystem basiert auf dem Thermoelementeverfahren. Das System erkennt durch Temperaturmessung an bestimmten Stellen der Kokillenwände Kleber anhand von Temperaturspitzen. Dadurch ist man in der Lage, Reibkraftverläufe von dem Störfall *Kleber* zu erhalten. Allerdings berücksichtigt man nur die Kleber, die von dem installierten System erkannt worden sind. Die nachfolgenden Darstellungen beinhalten ausgewählte Temperaturverläufe, die zu Kleberwarnungen mit unterschiedlichen Kleberwertungen führten.

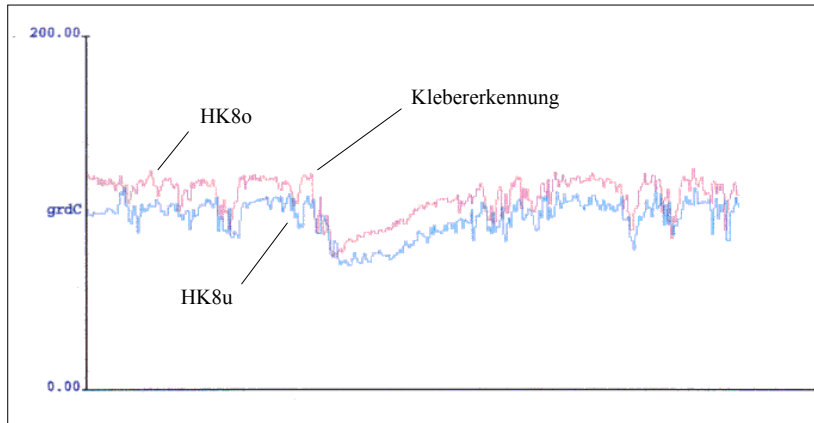


Bild 9.11: Temperaturverläufe des auslösenden und des in Gießrichtung darunter- bzw. darüberliegenden Thermoelementes: Schmelz-Nr.: 30898-1

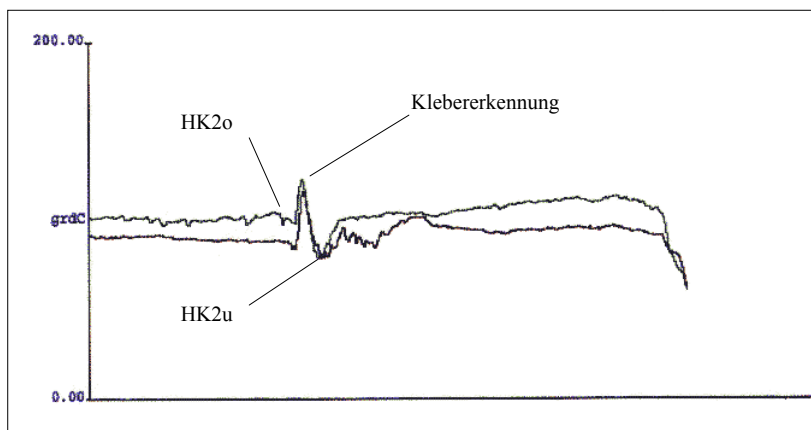


Bild 9.12: Temperaturverläufe des auslösenden und des in Gießrichtung darunter- bzw. darüberliegenden Thermoelementes: Schmelz-Nr.: 12678-1, auslös. Thermoelement: HK2u

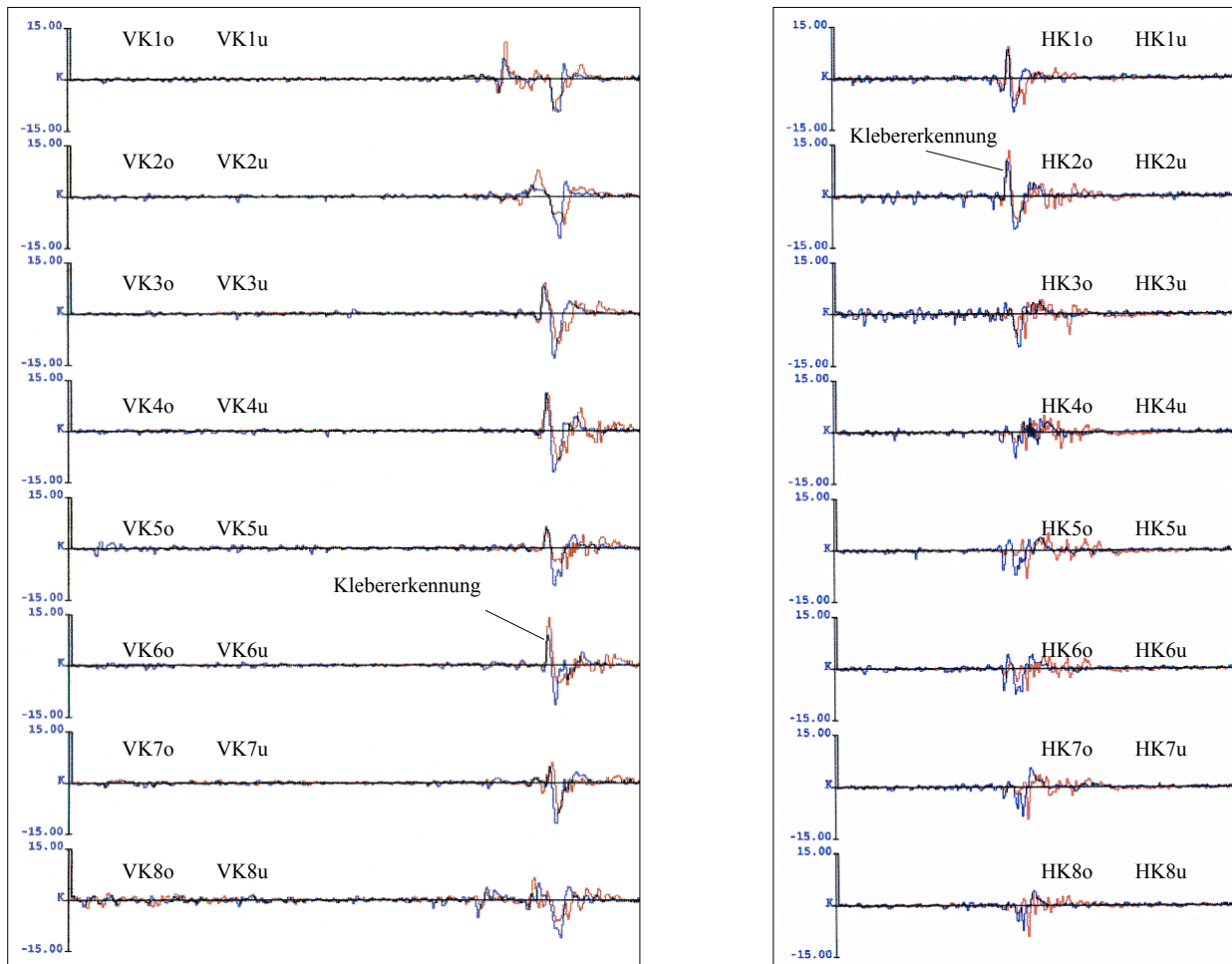


Bild 9.13: Temperaturabweichungen der Thermoelmente bei einer Klebererkennung:

- a) Schmelz-Nr.: 12655-1; Stahlgüte: ST 52-3 SG-ZN; Gießpulver: FS; auslös. Thermoelement: VK6u, b) 12678-1; S275J2 / S; FS; HK2u

Zeigt der vorhergehende Temperaturverlauf des auslösenden Thermoelmentes starke Temperaturschwankungen (*Bild 9.11*), wurde der vom System erkannte Kleber als sog. „Minikleber“ interpretiert und bekam die Kleberwertung 1. Dagegen wurde der deutliche Temperaturanstieg bei einer Klebererkennung mit vorhergehenden niedrigen Temperaturschwankungen (*Bild 9.12*) als Kleber der Wertung 2 charakterisiert. Die in *Bild 9.11 und 9.12* verwendeten Bezeichnungen für die Thermoelmente sind Abkürzungen für die genaue Position des Thermoelmentes. So steht die Abkürzung HK8o für das Thermoelement, das sich in der hinteren Kokillenbreite an der Position 8 oben befindet.

Von den 23 Klebern, die ausgewertet wurden, sind 8 mit der Wertung 2 bewertet worden. Nach Untersuchung der zu diesen Klebern gehörenden Reibkraftverläufe wurde bei fast allen

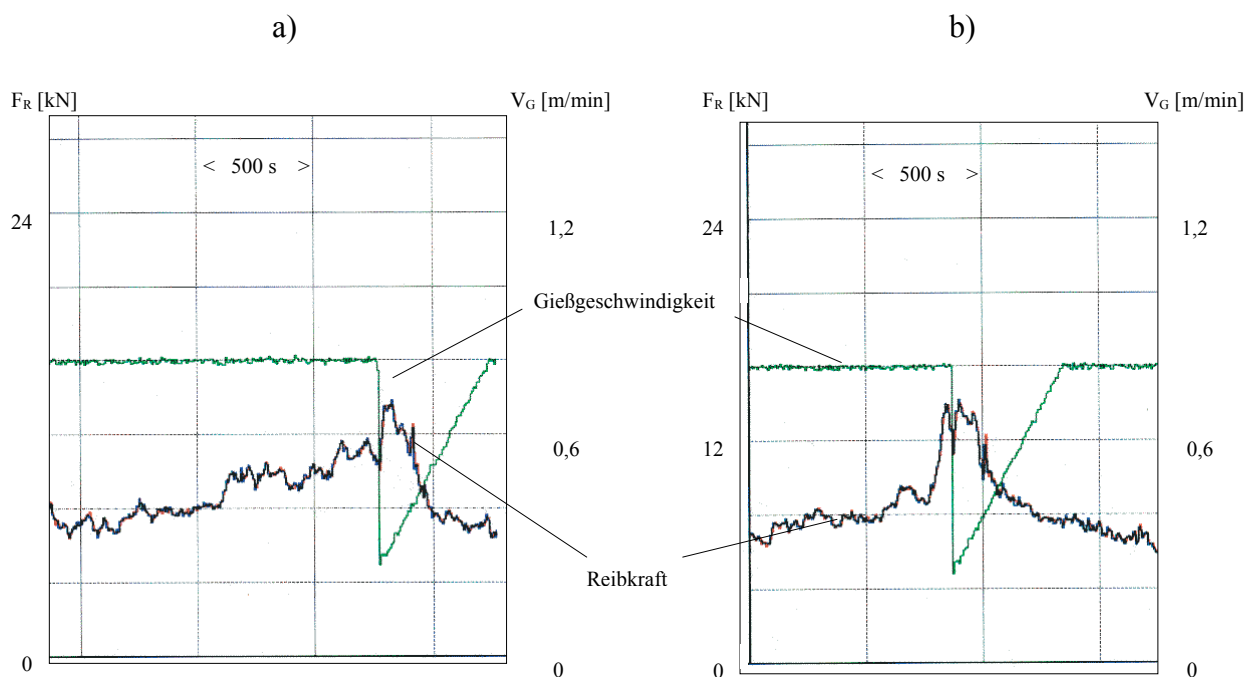
ein Anstieg der Reibkraft festgestellt. Dabei sind zwei Arten des Reibkraftanstieges zu erkennen:

- a) Ein langsames Ansteigen des Reibkraftniveaus innerhalb der letzten 10 – 15 Minuten vor der Kleberfrüherkennung
- b) Ein zum Teil starkes Ansteigen der Reibkraft innerhalb der letzten 2 – 3 Minuten vor der Kleberfrüherkennung

Eine anschließende Überprüfung der entsprechenden Brammenoberflächen konnte den Reibkraftanstieg bei Klebern (Wertung 2) mit der Quantität der Oberflächenfehler nicht in Zusammenhang bringen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Strangoberfläche durch die längere Kühldauer infolge des Herabsenkens der Gießgeschwindigkeit vollkommen ausheilen konnte.

Weiterhin wurde nach einem möglichen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Kleber und dem Anstieg der Reibkraft gesucht.

In **Bild 9.14** sind einige Reibkraftverläufe mit Klebererkennungen zusammengestellt. Die Klebererkennung ist durch den Abfall der Gießgeschwindigkeit deutlich sichtbar. Hier fährt das installierte System automatisch die Gießgeschwindigkeit auf 0,3 m/min herunter. In **Bild 9.14d** wurde die Systemreibung nicht von der Gesamtreibung abgezogen. Somit stellt die Reibkraft nicht die reine Strangreibung wie in **Bild 9.14 a/b/c** dar.



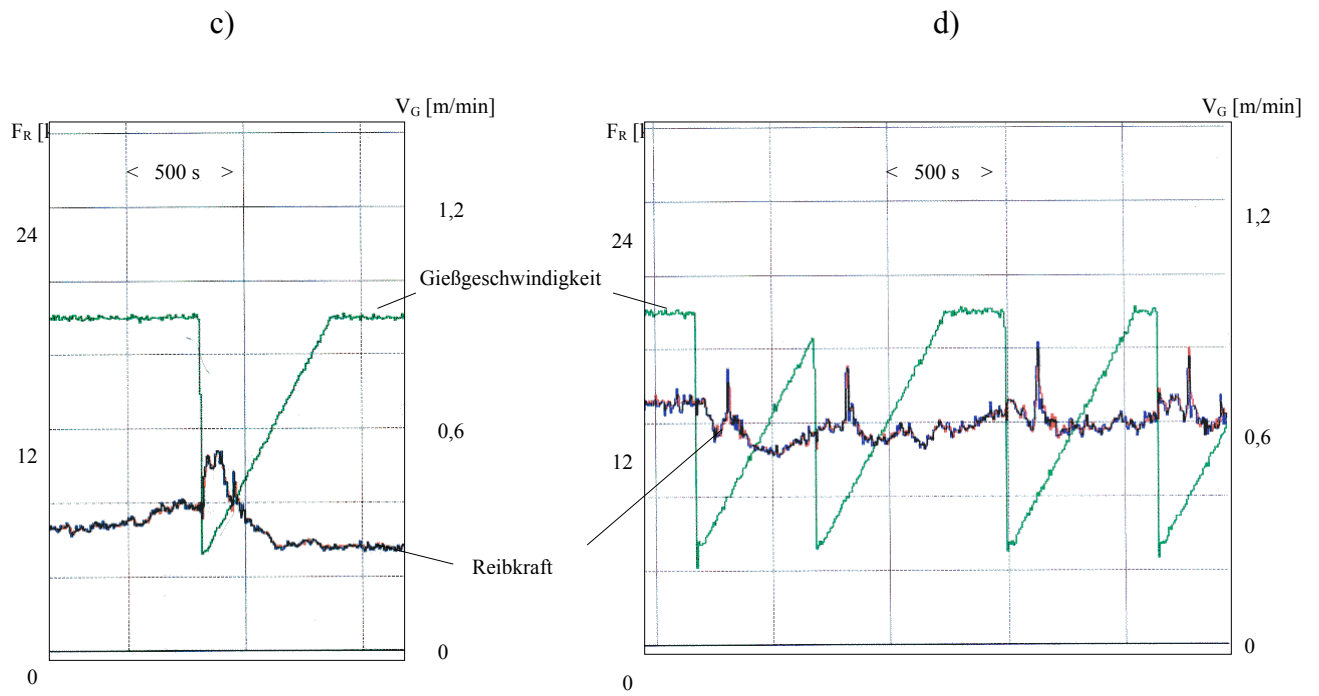


Bild 9.14: Reibkraftverläufe bei einer Klebererkennung: a) Stahlgüte: S275J2 / S; Gießpulver: FS, b) S275J2 / S; FS, c) STE 320-3Z S; FS, d) QST 44-3 WB Z; PM

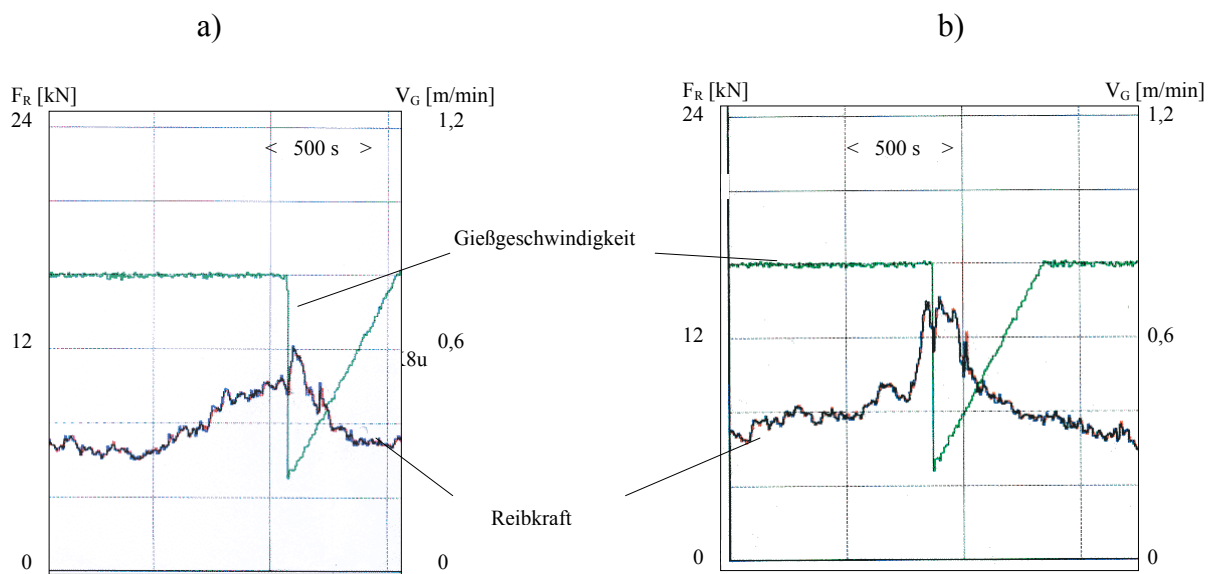


Bild 9.15: Unterschiedlicher Reibkraftanstieg bei einer Klebererkennung: a) Schmelz-Nr.: 12655-1; Stahlgüte: ST 52-3 SG-ZN; Gießpulver: FS, b) 12678-1; S275J2 / S; FS

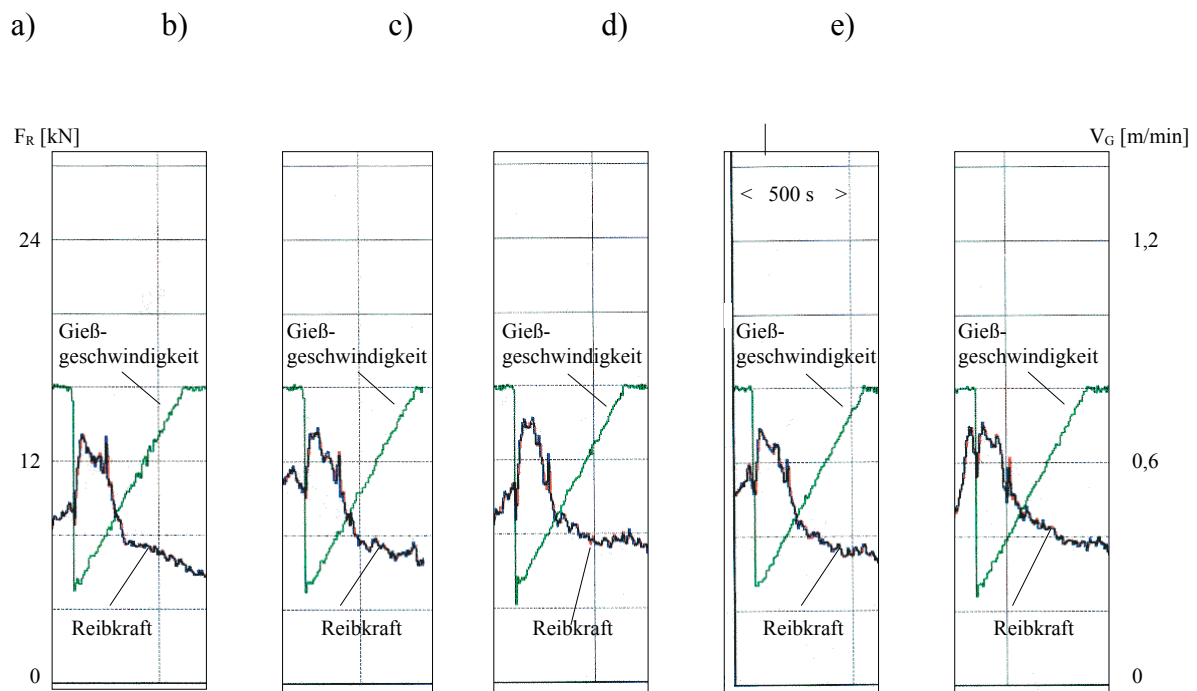


Bild 9.16: Reibkraftverläufe kurz nach der Klebererkennung bei gleicher Stahlsorte (S275J2 / S) und gleichem Gießpulver (FS): a) Schmelz-Nr.: 12668-1, b) 12670-1, c) 62869-1, d) 12677-1, e) 12678-1

Zusätzlich ist das Reibkraftmaximum bei allen fünf Reibkraftverläufen annähernd gleich. Nach dem Durchlauf von 0,4 m/min beim Hochfahren der Gießgeschwindigkeit ist bei den Reibkraftverläufen aller Kleber ein Herabsinken der Reibkraft auf normales Reibkraftniveau zu verzeichnen. Grundsätzlich ist beim Auftreten eines Klebers der Wertung 2 (s. Seite 56) ein Reibkraftanstieg zu beobachten. Allerdings wurde das Vorhandensein eines Klebers durch Oberflächenfehler auf den entsprechenden Brammen nicht bestätigt. Zusätzlich muß berücksichtigt werden, dass bei dieser Auswertung ausschließlich Messdaten über Kleber zur Verfügung standen, die von dem eingesetzten Kleberfrüherkennungssystem auch als solche erkannt worden waren. Folglich ist keine Aussage über mögliche, von dem System unerkannte Kleber zu machen.

9.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, wird die Reibkraft bzw. Reibung zwischen Strangschale und Kokille durch eine Vielzahl von Ereignissen während des störungsfreien Gießbetriebes sowie bei Auftreten von Gießstörungen beeinflusst. Hierbei ist besonders zwischen Ereignissen zu differenzieren, die jederzeit determinierbar sind, wie beispielsweise die Breitenverstellung oder Gießgeschwindigkeitsänderungen und vom Operator abhängige

Ereignisse, wie die Gießpulverzugabe oder das Abschlacken, die jedoch in ihrem Einfluss entweder zu vernachlässigen sind oder mit anderen deterministischen Ereignissen (z.B. Abschlacken mit Gießende oder Gießpulverwechsel) verknüpft sind.

Da jedes deterministische Ereignis als kritischer Betriebszustand zu charakterisieren ist, ist für jedes Ereignis eine individuell angepasste Überwachungsstrategie erforderlich. Um hierbei die notwendige Diagnosesicherheit zu erzielen, wird man auf redundante Informationen aus der Temperaturüberwachung zurück greifen müssen.

Wie in Kapitel 9.2 dargestellt, steht das Auftreten von Klebern im Zusammenhang mit Änderungen der Reibkraft. Vor der Auslösung eines Kleberalarms, der eine automatisierte Reduktion der Strangabzugsgeschwindigkeit zur Folge hat, zeigen sich zwei charakteristische Reibkraftverläufe:

1. Ein langsames Ansteigen des Reibkraftniveaus innerhalb der letzten 10 – 15 Minuten vor der Kleberfrüherkennung
2. Ein starker Anstieg der Reibkraft innerhalb der letzten 2 – 3 Minuten vor der Kleberfrüherkennung

Wie in den Ergebnissen dargestellt, können Ereignisse wie Verteilerwechsel, Gießbeginn und Gießende hinreichend genau auf die Änderungen der Gießgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Dies bedeutet, dass diese Ereignisse nicht explizit in das Überwachungssystem z.B. als digitale Größen implementiert werden müssen, sondern durch die Berücksichtigung der Gießgeschwindigkeit, die bei diesen Ereignissen reduziert wird, erfasst werden.

Ein wesentlicher Aspekt, bezogen auf die Realisierung einer Überwachung, stellt der Einfluß des Gießpulvers sowohl auf das mittlere Reibkraftniveau als auch den Gradienten der Reibkraft bei Auftreten von Gießereignissen dar. Diese Abhängigkeit erfordert zwingend die Implementierung des Parameters *Gießpulversorte* in das Überwachungssystem.

9.4 Datenfernakkquisition

Nach Beendigung der Vorort - Untersuchungen in einer Stranggießanlage wurde für diese Anlage ein Datenlogger programmiert und installiert, der speziell Messdaten zur Reibkraftermittlung erfasst, speichert und auf Anforderung via Datenleitung transferiert. Das PC basierte System besteht aus Trennverstärkern zum Abgriff der Messdaten, einem 16 Kanal A/D – Wandler sowie einem ISDN – Interface zur Datenübertragung, vgl. [Wei98]. Das System verfügt über einen 20 GB großen Datenringspeicher, aus dem Messdaten – Files via Datenfernübertragung abgerufen werden können. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer online Datenvisualisierung.

Neben weiteren Erkenntnissen bzgl. des Reibkraftverhaltens konnte durch den Datenlogger ein Datenstamm generiert werden, der zur Konfiguration und Validierung des Prototypen einer Überwachung benutzt werden konnte. **Bild 9.17** zeigt das Systemsetup des Datenloggers.

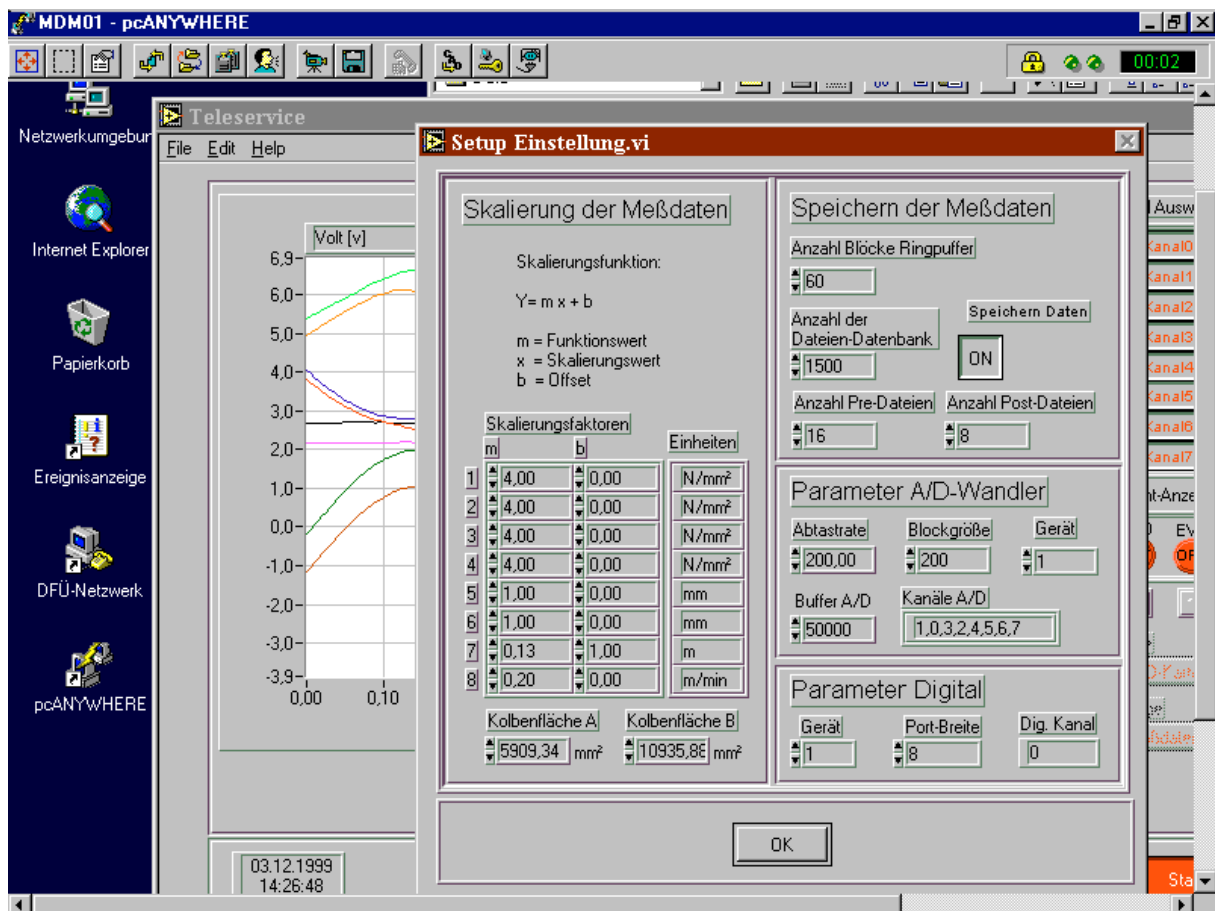


Bild 9.17: Systemsetup des Datenloggers

Um die Wechselwirkung zwischen der Reibkraftänderung und der Erkennung von Klebern zu erfassen, wurde das System mit dem Temperaturüberwachungssystem digital gekoppelt. Durch die Verwendung von sog. Pre- und Postdateien konnte die Signalhistorie bei einer Klebererkennung lückenlos analysiert werden. Neben der kontinuierlichen Datenerfassung während der störungsfreien Produktion erfolgte eine Filemarkierung bei der Detektion eines Klebers. Wie im Setup zu erkennen, wurden die hydraulischen Drücke beider Zylinder jeweils im Ring- und Druckraum, die Wege der Hydraulikzylinder sowie die Brammenbreite (Schmalseitenverstellung) und die Stranggeschwindigkeit gemessen.

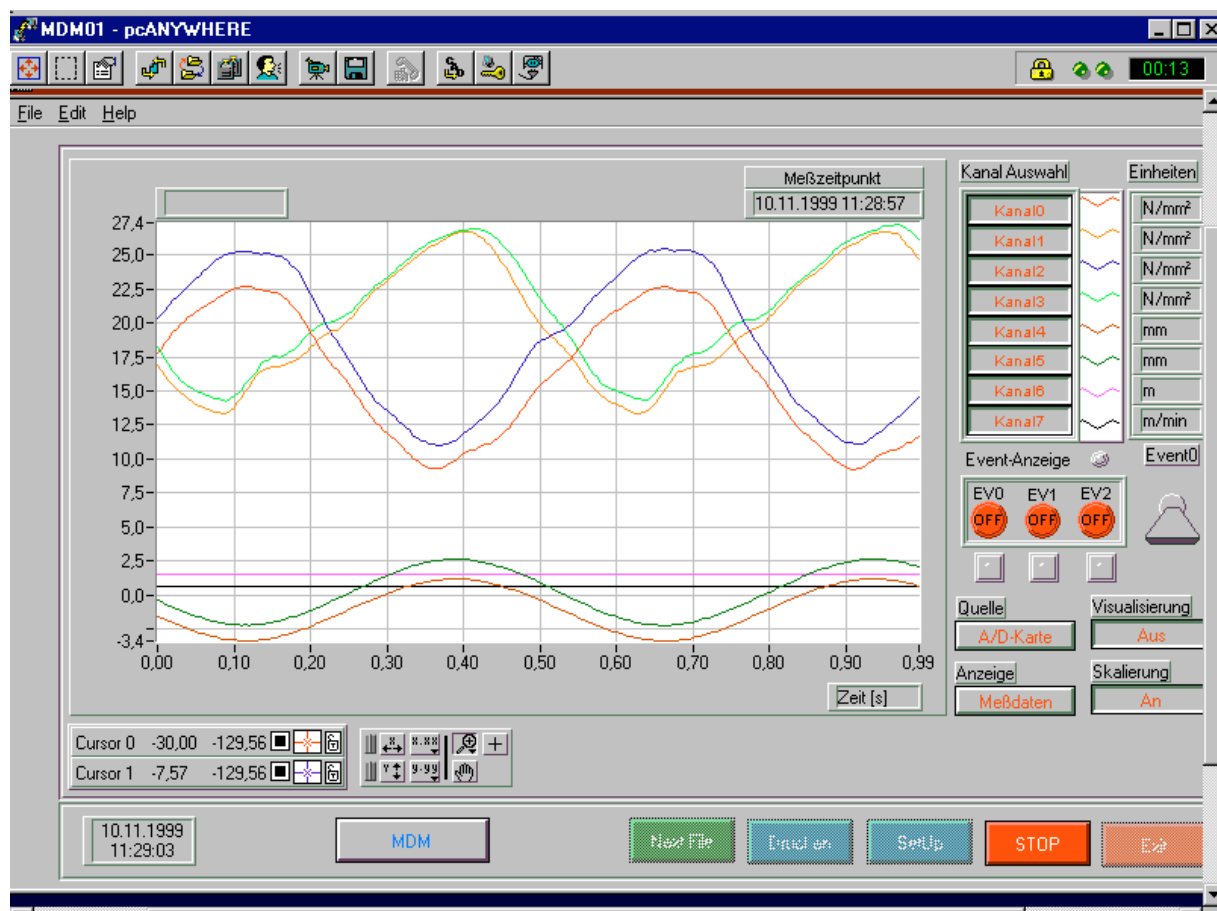


Bild 9.18: Unskalierte Online Visualisierung der Messdaten mit *Kanal0*: Hydraulischer Druck im Ringraum des linken Zylinders, *Kanal1*: Hydraulischer Druck im Druckraum des linken Zylinders, *Kanal2*: Hydraulischer Druck im Ringraum des rechten Zylinders, *Kanal3*: Hydraulischer Druck im Druckraum des rechten Zylinders, *Kanal4*: Hub rechter Zylinder, *Kanal5*: Hub linker Zylinder, *Kanal6*: Strangbreite, *Kanal7*: Strangabzugsgeschwindigkeit.

Zur Vervollständigung der Datenstämme wurden die durch das System generierten Messdaten durch anlageninterne Datenprotokolle komplettiert. Hierdurch wurden Trainingsdatensätze geschaffen, die eine gezielte Vorab – Konfiguration eines Überwachungssystems gestatten.

Während dieser Datenakquisitionsphase wurden keine prinzipiellen Abweichungen bzw. Veränderungen der kausalen Zusammenhänge zur vorangegangenen Vorort - Untersuchung festgestellt. Der entscheidende Nutzen der Datenakquisitionsphase liegt in der Erfassung und Abgrenzung etwaiger Streubreiten einzelner Messgrößen sowie in der Erfassung ihrer zeitlichen Zusammenhänge.

10 Konzept einer Zustandsüberwachung

10.1 Globale Aufgaben und Ziele eines Überwachungssystems

Die Aufgabe eines Überwachungssystems besteht allgemein darin, den gegenwärtigen Zustand des zu überwachenden Prozesses zu erkennen oder zu prognostizieren. Das globale Ziel der Überwachung besteht darin, durch eine rechtzeitige Identifizierung von Zwischenfällen Möglichkeiten für eine Korrektur dieser Zwischenfälle durch geeignete Maßnahmen zu schaffen, um den weiteren Betrieb zu erhalten und/oder Schäden zu verhindern [Ise96], [Pet96].

Nach Mitchel [Mit93] werden prinzipiell folgende Ziele bei der Überwachung produktionstechnischer Anlagen verfolgt:

- Rechtzeitige Anzeige von Veränderungen oder sich verschlechternden Bedingungen, um einen Ausfall der Anlage oder teure Folgeschäden zu verhindern
- Im Falle eines Ausfalls die Einleitung von Aktionen, um Folgeschäden und Gefahren für Personen, für benachbarte Anlagen sowie für die Umwelt zu minimieren
- Verbesserungen der Anlagenverfügbarkeit, Reduzierung der Kosten für Wartung und Produktion
- Bereitstellung von Informationen über den Prozesszustand, um sicher zu stellen, dass sich der Prozess in einem gewünschten Betriebsbereich befindet

Die globale Überwachung eines Prozesses erfolgt über die Kontrolle der messbaren Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses. Tritt ein Fehler im Prozess auf, so wirken sich die Fehler zunächst auf die internen Parameter und Zustandsgrößen aus und rufen dort Veränderungen hervor. Erst dann wird der Fehler durch Veränderungen der Ausgangsgrößen erkennbar [Ise94b]. Dies macht deutlich, dass die Wahl der Eingangsgrößen eines Überwachungssystems von entscheidender Bedeutung ist.

Bei der Konzeptionierung eines Überwachungssystems muss geprüft werden, ob es für das jeweilige Überwachungsproblem ausreichend ist, nur die Ausgangsgrößen des Prozesses zu überwachen. Dabei ist abzuwägen, ob sich zusätzliche Informationen aus den zur Verfügung

stehenden Ausgangsgrößen ableiten lassen oder eine adäquate Fehlerdetektion oder –diagnose von unerlaubten Prozesszuständen erst durch die Integration weiterer Messsysteme zur Erfassung weiterer Eingangsgrößen erfolgen kann, die Rückschlüsse auf die internen Parameter oder Zustandsgrößen zulassen. Diese Entscheidung ist stark prozessabhängig und wird zusätzlich durch die Forderung beeinflusst, dass die zu verwendenden Messsysteme keinen Einfluss auf den laufenden Prozess und dessen Sicherheit haben dürfen [Sto99].

Bei der Überwachung von Eingangsgrößen unterscheidet man zwei Klassen von Überwachungsstrategien, die kontinuierliche Überwachung und die diskontinuierliche Überwachung [Kol86]:

Bei der kontinuierlichen Überwachung erfolgt die Erfassung der Eingangsgrößen und deren Beurteilung ohne zeitliche Unterbrechung. Die Anwendung dieser Überwachungsstrategie ist sehr aufwendig, da die Kosten und der hardwaretechnische Aufwand hoch sind. Der Einsatz einer kontinuierlichen Überwachung ist meist dann notwendig, wenn der zu überwachende Teilprozess ein hohes Sicherheitsrisiko darstellt, ein auftretender Fehler einen hohen Kostenaufwand nach sich zieht oder die Fehlerwahrscheinlichkeit über den betrachteten Zeitraum konstant ist. Bei der Realisierung einer kontinuierlichen Überwachung unterscheidet man die kontinuierliche Überwachung eines Teilprozesses bei der Erfassung einer Eingangsgröße durch ein Überwachungsteilsystem und die kontinuierliche Überwachung eines Teilprozesses bei der Erfassung mehrerer Eingangsgrößen durch ein Überwachungssystem. [Ban92], [Kol86].

Die Erfassung der Eingangsgrößen und deren Beurteilung wird bei der diskontinuierlichen Überwachung nur von Zeit zu Zeit durchgeführt. Diese Überwachungsstrategie eignet sich nicht zur Detektion von plötzlich auftretenden Verschlechterungen des Prozesses, deren Auftreten ein Sicherheitsrisiko darstellt, sondern ihr Einsatz dient in Verbindung mit einer anschließenden detaillierten Analyse der Schadensfrüherkennung in einem Stadium, in dem das Ausmaß des entstehenden Fehlers einen weiteren Betrieb durchaus zulässt. Ihr Einsatz kann entweder in festen Zeitintervallen oder nach Bedarf erfolgen. So werden z.B. für die Bestimmung der Verschleißerscheinungen einzelner Komponenten technischer Anlagen in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit ihres Ausfalls feste Diagnoseintervalle festgelegt. Bei einem Einsatz nach Bedarf kann die Bestimmung des Bedarfs z.B. über einen definierten Prozesszustand oder durch Alarmierung einer kontinuierlichen Überwachungskomponente

erfolgen. An die Dauer der Mess- und Auswertezeiten diskontinuierlicher Überwachungssysteme werden im Vergleich zu kontinuierlichen Überwachungssystemen geringere Anforderungen gestellt.

Nach den Arbeiten von Sturm und Förster [Stu90] werden die Arbeitsschritte des Fehlerdiagnoseprozesses wie folgt beschrieben:

1. Auswahl der geeigneten Diagnoseparameter, d.h. Bestimmung der notwendigen Parameter aus den Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen des Prozesses und / oder aus notwendigen zusätzlichen aufzunehmenden Eingangsgrößen für das Überwachungssystem
2. Messwerterfassung und eventuelle Signalkonditionierung
3. Messwertaufbereitung mit dem Ziel der Gewinnung von Kenngrößen und –funktionen sowie Verknüpfungen, die für die Beschreibung des zulässigen Prozesszustandes und der Fehler relevant sind
4. Messwertinterpretation zur Entscheidungsfindung für die einzuleitenden Gegenmaßnahmen

Eine wesentliche Aufgabe der Fehlerdiagnose ist es, aus den aufgenommenen Diagnoseparametern die Information zu extrahieren, die eine Aussagekraft bezüglich des möglichen Zustands des zu überwachenden Prozesses beinhaltet [Stu90]. Verfahren, die zur Gewinnung dieser Informationen angewandt werden, können generell in mehrere Klassen eingeteilt werden, von denen folgende betrachtet werden:

- Signalgestützte oder signalorientierte Diagnoseverfahren
- Verfahren, die ein Prozeßmodell verwenden

Bei den signalgestützten Verfahren werden aus den aufgenommenen Signalen geeignete Merkmale extrahiert, aus denen man Rückschlüsse auf die einzelnen Fehler zieht. Solche Merkmale können z.B. Mittelwerte, Grenzwerte, Korrelationskoeffizienten etc. sein. [Fra94]. Hinzu kommen betriebliche und strukturgebundene Merkmale. Diese Ansammlung von Merkmalen muss sinnvoll strukturiert werden, um unterschiedliche Zustände und Fehler zu erkennen. Die Strukturierung von Merkmalen erfolgt in der Regel durch Zustandsvektoren. Der Begriff Zustandsvektor entstammt der Systemtheorie. Ein Zustandsvektor ist kein Vektor im streng mathematischen Sinn, da er unterschiedliche physikalische Größen beinhaltet. Diese können unterschiedliche Dimensionen aufweisen. Der Zustandsvektor kann jedoch als geordnete Spaltenmatrix in einem Überwachungssystem definiert werden. Mit diesem Zustandsvektor erreicht man die angestrebte strukturierte Darstellung aller prozessrelevanten Merkmale. [Kle98]. **Bild 10.1** zeigt den allgemeinen Aufbau eines strukturierten Zustandsvektors.

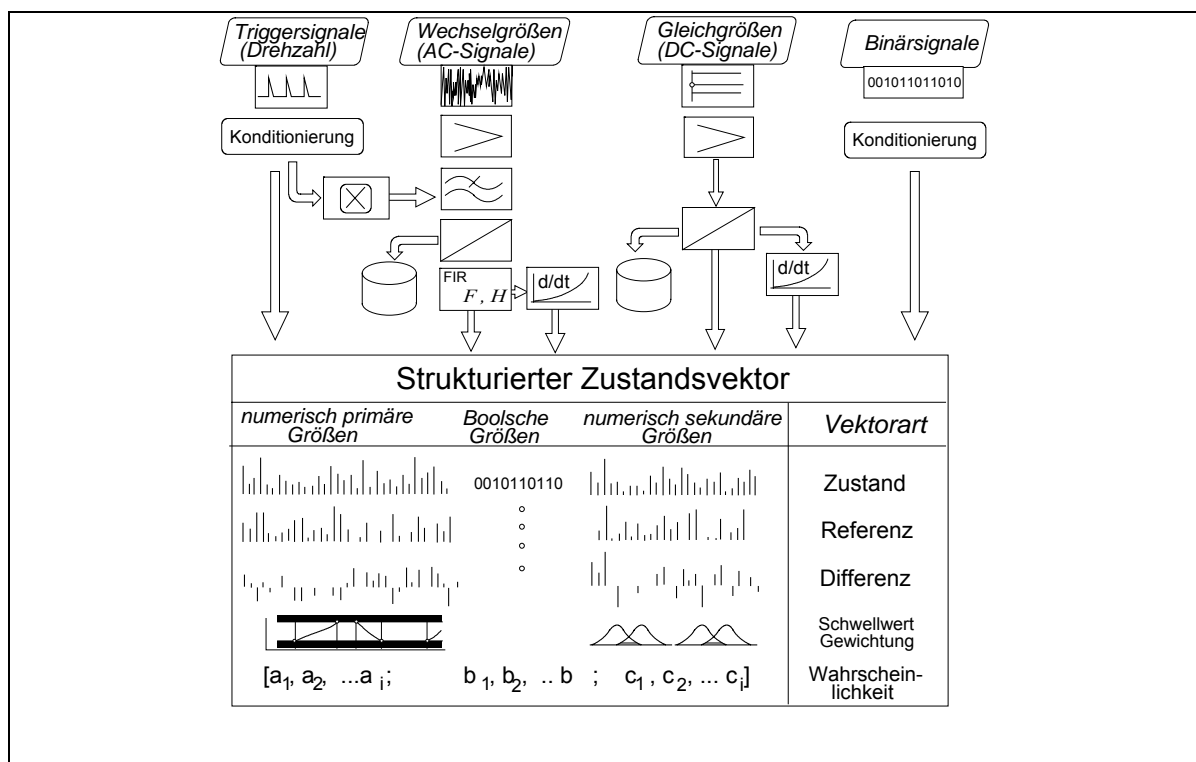


Bild 10.1: Strukturierter Zustandsvektor [Kle98]

Bei den modellorientierten Verfahren wird ein Modell des Prozesses generiert, das eine Schätzung der Ausgangsgröße des Prozesses bzw. der Eingangsgrößen für das Überwachungssystem für den gesamten Prozessverlauf ermöglicht. Über einen Ist-Wert / Schätz-Wert Vergleich wird der aufgetretene Fehler bestimmt. Zur Modellierung eines

Prozesses steht eine Vielzahl von Ansätzen zur Verfügung, die sich folgendermaßen kategorisieren lassen:

Signalorientierte Methoden	Klassische Methoden	Neuere Methoden
Einfache autoprojektive Signal - Modelle	Physikalisch begründete, analytische Modelle	Klassifikatorische Modelle
Auf der Basis von Signal-Transformationen aufbauende Modelle	Experimentelle bzw. statistische Modelle	Regelbasierte Modelle
Auf der Basis heuristischer Signalmerkmale aufbauende Modelle	Heuristische Modelle	Konnektionistische Modelle

Tabelle 10.1: Modellansätze und deren Klassifizierung nach [Pet96]

Im Hinblick auf die vorliegende Überwachungsaufgabe sei ein weiteres entscheidendes Kriterium zur Auswahl geeigneter Klassifikationsverfahren aufgeführt. Das Kriterium berücksichtigt die Modellierbarkeit des zu überwachenden Prozesses bzw. der zu überwachenden Anlage und läßt sich in drei Gruppen differenzieren:

1. Das Prozess- / Anlagenmodell läßt sich vollständig mathematisch und physikalisch beschreiben
2. Das Prozess- / Anlagenmodell ist hinreichend durch heuristisches Wissen, das z.b. in Form eines Regelwerkes linguistischer Variablen vorliegt, beschreibbar
3. Das Prozess- / Anlagenmodell ist weder mathematisch / physikalisch zu beschreiben noch liegt ausreichendes gesichertes heuristisches Wissen zur Modellbeschreibung vor.

Bei der ersten Gruppe handelt es sich in der Regel um einfache Prozesse oder Anlagen mit geringer Parameteranzahl deren Zusammenhänge sich mathematisch beschreiben lassen. Diese Modelle stellen Approximationen des realen Prozesses dar. Aufgrund der

Beschreibbarkeit des Prozesses können Sollwerte berechnet werden und durch Soll- / Istwert-Vergleiche eine Prozess-/Anlagenüberwachung realisiert werden.

Bei der zweiten Gruppe von Prozessen / Anlagen lassen sich die Beziehungen zwischen den Eingangsgrößen des Systems und den Ausgangsgrößen durch sog. linguistische Variablen und Regeln definieren. Die Wissensträger sind hierbei meist Operatoren und Experten die auf langjährige Erfahrungen mit dem jeweiligen Prozess oder der jeweiligen Anlage zurückgreifen können ohne meist eine genauere Kenntnis der inneren Systemzusammenhänge zu besitzen.

Die dritte Gruppe wird durch Anlagen / Prozesse repräsentiert, über die entweder noch kein ausreichendes Wissen vorliegt oder deren Systemverhalten durch eine Vielzahl von Parametern beschrieben wird, deren Wechselwirkungen untereinander nicht hinreichend genau bekannt sind.

10.2 Erster Entwurf eines Überwachungssystems

Gemäß der o.g. Definition der Modellierbarkeit von Anlagen und Prozessen wurde das System Stranggusskokille der zweiten Gruppe, der durch hinreichendes heuristisches Wissen beschreibbaren Anlagen, zugeordnet. Getragen wurde diese Klassifizierung durch die langjährige Erfahrung des Anlagenbetreibers mit der Temperaturüberwachung der Anlage und dem daraus entstandenen Regelgerüst zur Handhabung etwaiger Störungen. Der Entwurf des Überwachungssystems sollte daher die Übernahme des vorhandenen Regelgerüsts zur Temperaturüberwachung sowie die Implementierung der Reibkraftüberwachung unter den in Kapitel 9 dargestellten Einflussparametern beinhalten. Durch die Anforderungen an das System war der Einsatz konfigurierbarer Überwachungssysteme wie in [Wei94] und [Wei95] beschrieben, nicht möglich.

Bild 10.2 zeigt den schematischen Entwurf des Überwachungssystems.

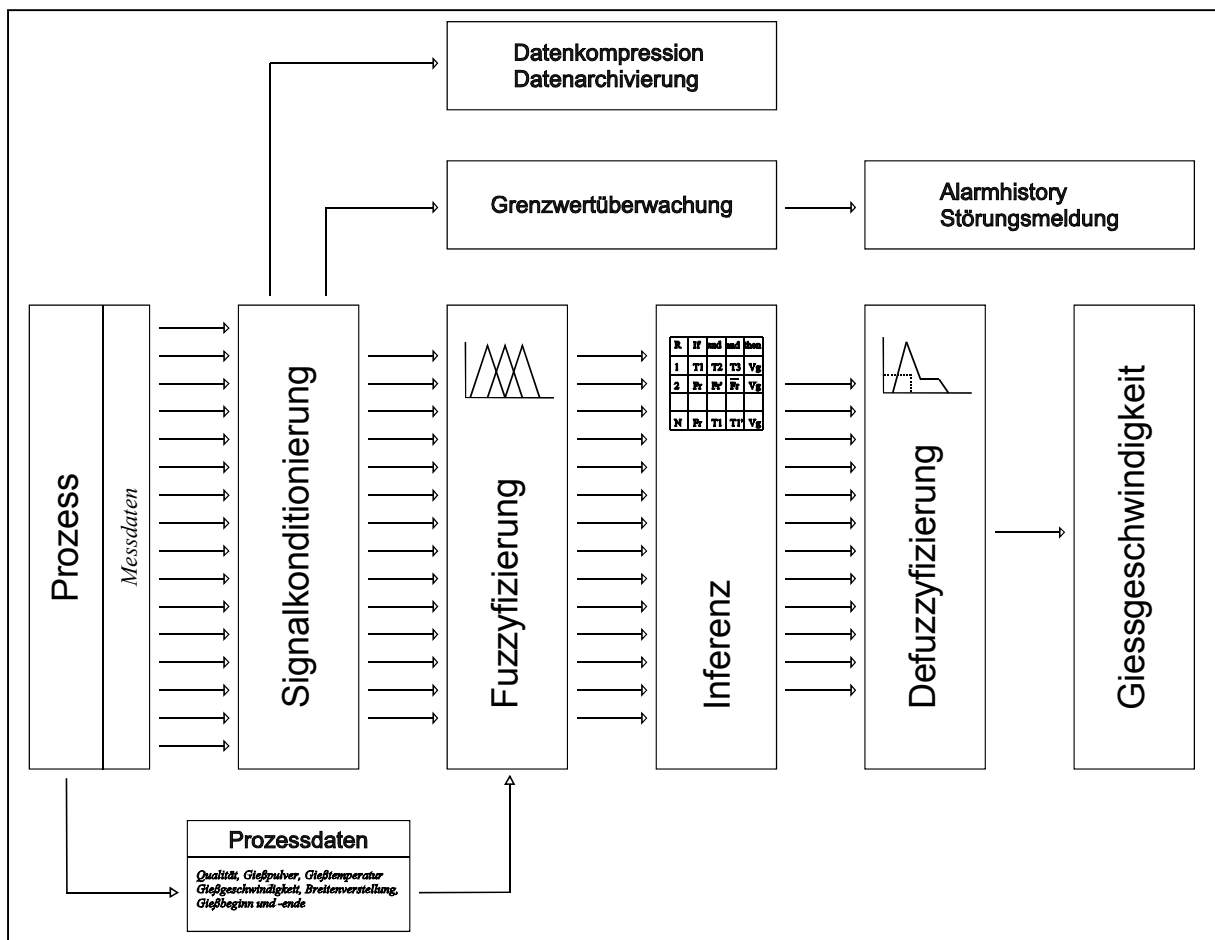


Bild 10.2: Schematischer Entwurf des Überwachungssystems

Beginnend mit dem *Prozess* werden alle benötigten Mess- und Prozessdaten teilweise durch Trennverstärker entkoppelt dem Überwachungssystem übermittelt. Bei den übermittelten Größen handelt es sich um Kombinationen von analogen (Temperaturen der Thermoelemente, hydraulische Drücke und Wege der Antriebszylinder, Gießgeschwindigkeit, etc.) und digitalen (Gießbeginn und –ende, Breitenverstellung, Qualitäten, Gießpulver etc.) Größen. Die Erfassung der Daten erfolgt durch zwei zeitsynchronisierte Analog/Digital - sowie eine Digital/Digital – Datenerfassungskarten mit vorgeschalteten Tiefpassfiltern.

Der mit *Signalkonditionierung* umschriebene Verarbeitungsblock umfaßt sämtliche Skalierungen zur Generierung physikalischer Größen, Berechnungen wie beispielsweise die der Reibkraft aus den Hysteresekurven sowie die Berechnung der Gradienten und Mittelwerte. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die Synchronisierung der Signalverläufe dar. Durch die Kombination der Analog/Digital - Wandlerkarten spezifischen *Sample & Hold* - Funktionalität und dem blockweisen Einlesen der Daten konnte die zeitliche Zuordnung der Messdaten gewährleistet werden.

Die der *Signalkonditionierung* nachgeschaltete *Datenkompression* und –*archivierung* dient der Dokumentation etwaiger Systementscheidungen und als Datenbasis für Optimierungen und Änderungen der Systemparameter. Der Verarbeitungsblock *Grenzwertüberwachung* beschreibt eine dem Fuzzy – System parallel geschaltete Maximalwertüberwachung der Größen Reibkraft, Reibkraftgradient, Temperatur, Temperaturgradient sowie einen Vergleich der Bahnkurven beider Hydraulikzylinder. Durch den Vergleich der Bahnkurven können frühzeitig Informationen über den mechanischen Zustand der Kokille wie z.B. Lose im Antriebsstrang der Kokille, Bruch einzelner Blattfedern sowie Schäden an den Hydraulikzylindern gewonnen werden. Die durch die Grenzwertüberwachung generierten *Störungsmeldungen* werden in der sog. *Alarmhistory* festgehalten und müssen durch autorisierte Personen bestätigt werden.

Zur *Fuzzyifizierung* der Eingangsgrößen werden Dreiecks- und Trapez - Zugehörigkeitsfunktionen genutzt. In der Regel werden pro Variable zwischen zwei und vier Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Die Fuzzyifizierung ist hierbei nicht ausschließlich eine Funktion der zu fuzzyifizierenden Größe, sondern hängt ebenfalls von den momentanen *Prozessdaten* und –*ereignissen* ab.

$$\mu_n(x) = f(x, \text{Prozessdaten}) \quad (10.1)$$

Für die Regelauswertung im Verarbeitungsblock *Inferenz* wird hier das gebräuchliche MAX-MIN-Schema benutzt. Dabei wird zunächst der Erfüllungsgrad jeder aktiven Regel mit dem MIN-Operator bestimmt.

$$\mu_{Eh}(x) = \min\{\mu_T(x), \mu_{T/dt}(x), \mu_{GÜ}(x)\} \quad (10.2)$$

Anschließend werden die Inferenzergebnisse der einzelnen Regeln zum Gesamtergebnis überlagert. Die Einzelergebnisse werden über den MAX-Operator miteinander zum Gesamtergebnis verknüpft.

$$\mu_E(x) = \max\{\mu_{E1}(x), \mu_{E2}(x), \dots, \mu_{En}(x)\} \quad (10.3)$$

Um nach der Anwendung des MAX-Operators erneut einen skalaren Ausgangswert zu erhalten, wird die Flächenschwerpunktmethode (kurz: cog / center of gravity) eingesetzt. Diese Operation erfolgt in dem Verarbeitungsblock *Defuzzifizierung* und liefert als Ausgangsgröße die *Gießgeschwindigkeit* der Stranggussanlage.

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt der verwendeten Regelbasis.

Regel	Temperatur T	Gradient dT/dt	Zeitdauer t (3 Sekunden)	Reibkraft F _R	Gradient dF _R /dt	Mittelwert F _{RM}	Gieß- geschwindigkeit t v _G
1	niedrig	positiv	positiv	groß	null	groß	mittel
2	niedrig	positiv	positiv	groß	positiv	klein	mittel
3	niedrig	positiv	positiv	groß	positiv	mittel	niedrig
4	niedrig	positiv	positiv	groß	positiv	groß	niedrig
5	mittel	positiv	positiv	groß	null	groß	mittel
6	mittel	positiv	positiv	groß	positiv	klein	mittel
7	mittel	positiv	positiv	groß	positiv	mittel	niedrig
8	mittel	positiv	positiv	groß	positiv	groß	niedrig
9	hoch	positiv	positiv	groß	null	groß	mittel
10	hoch	positiv	positiv	groß	positiv	klein	niedrig
11	hoch	positiv	positiv	groß	positiv	mittel	niedrig
12	hoch	positiv	positiv	groß	positiv	groß	niedrig

Tabelle 10.2: Ausschnitt aus der Regelbasis

Dieser relativ kleine Ausschnitt aus der Regelbasis verdeutlicht die Problematik der regelbasierten Abarbeitung der Eingangsgrößen. Ohne eine effektive Vorselektion, speziell der Temperaturdaten, wäre eine Regelbasis kaum noch zu handhaben, da sich nach der Konfigurierung ein Regelgerüst von 25920 Regeln ergibt. Der erste Entwurf einer Vorselektion der insgesamt 40 Temperaturdaten nutzt das Maximum des Produktes aus dem Maximalwert der normierten Temperatur und dem Gradienten der normierten Temperatur. Damit werden sowohl Temperaturen mit hohem Temperaturniveau und kleinen Temperaturgradienten als auch Temperaturen mit geringem Temperaturniveau und großen Temperaturgradienten berücksichtigt. Der Regelbasis werden daher folgende Temperaturdaten zugeführt:

$$T_{N,Max} = \max [T_N \times \frac{dT_N}{dt}]_{N \in [1, 40]} \quad (10.4)$$

Die nachfolgenden Darstellungen zeigen beispielhaft die Zugehörigkeitsfunktionen der Temperatur und des Gradienten der Temperatur sowie die normierte Gießgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Parametern normierte Temperatur und normierter Temperaturgradient bei konstanten Parametern Reibkraft, Reibkraftgradient sowie Reibkraftmittelwert.

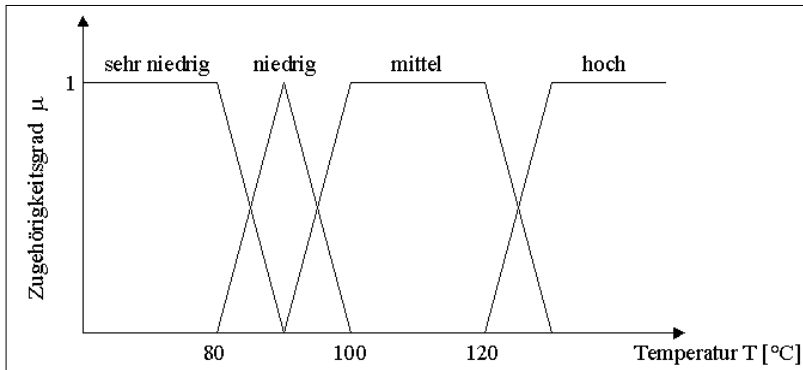


Bild 10.3: Zugehörigkeitsfunktion der Temperatur für eine Konstellation der Prozessdaten

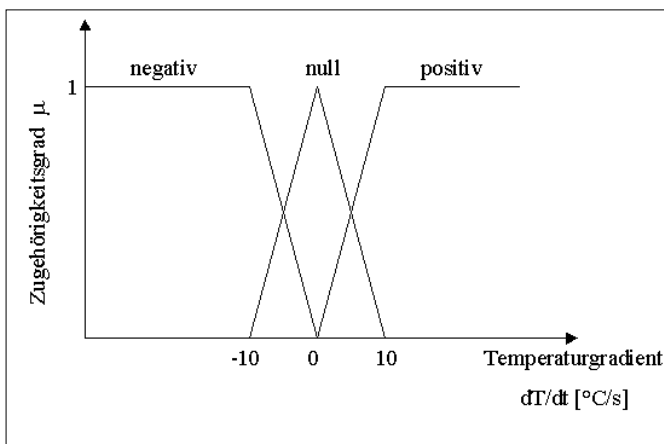


Bild 10.4: Zugehörigkeitsfunktion des Temperaturgradienten für eine Konstellation der Prozessdaten

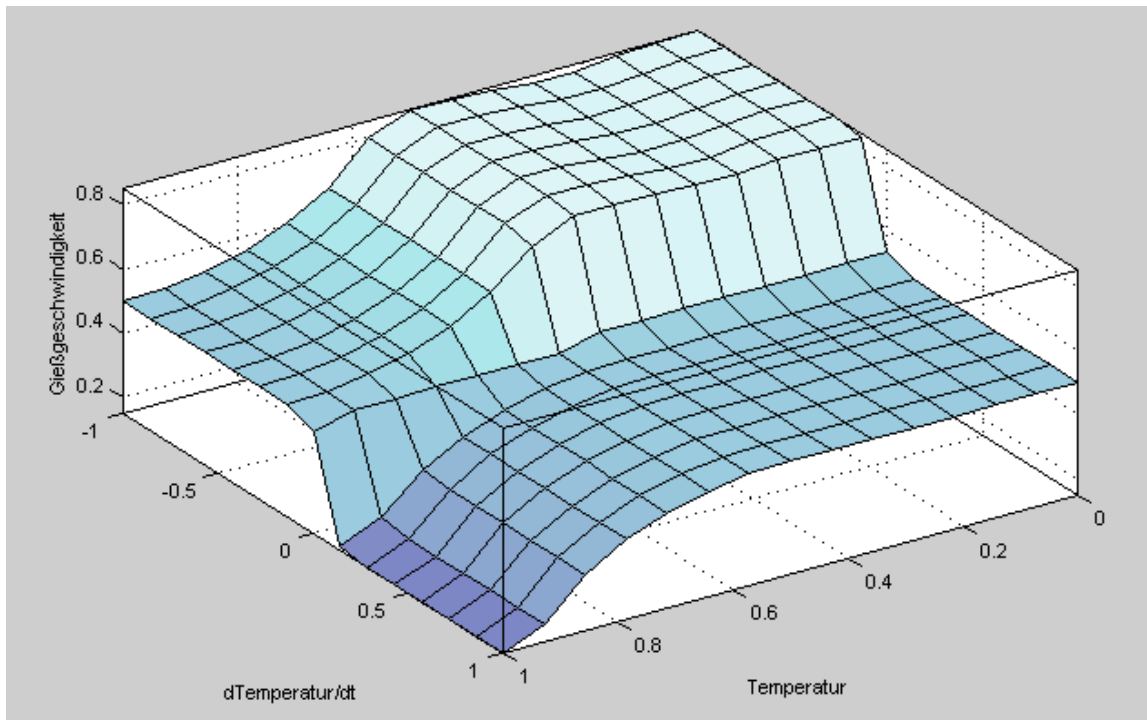


Bild 10.5: Normierte Gießgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Parametern normierte Temperatur und normierter Temperaturgradient für eine Konstellation der Prozessdaten

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Parameter Reibkraft, Reibkraftgradienten und Mittelwert weisen ähnliche Funktionsverläufe auf. Der Parameter *Zeitdauer der Grenzwertüberschreitung* wurde lediglich unter dem Aspekt der konsistenten Formulierung in die Regelbasis mit aufgenommen, obwohl es sich um eine bool'sche Größe handelt. Die nachfolgenden Darstellungen zeigen die grafischen Benutzerschnittstellen des Überwachungssystems.

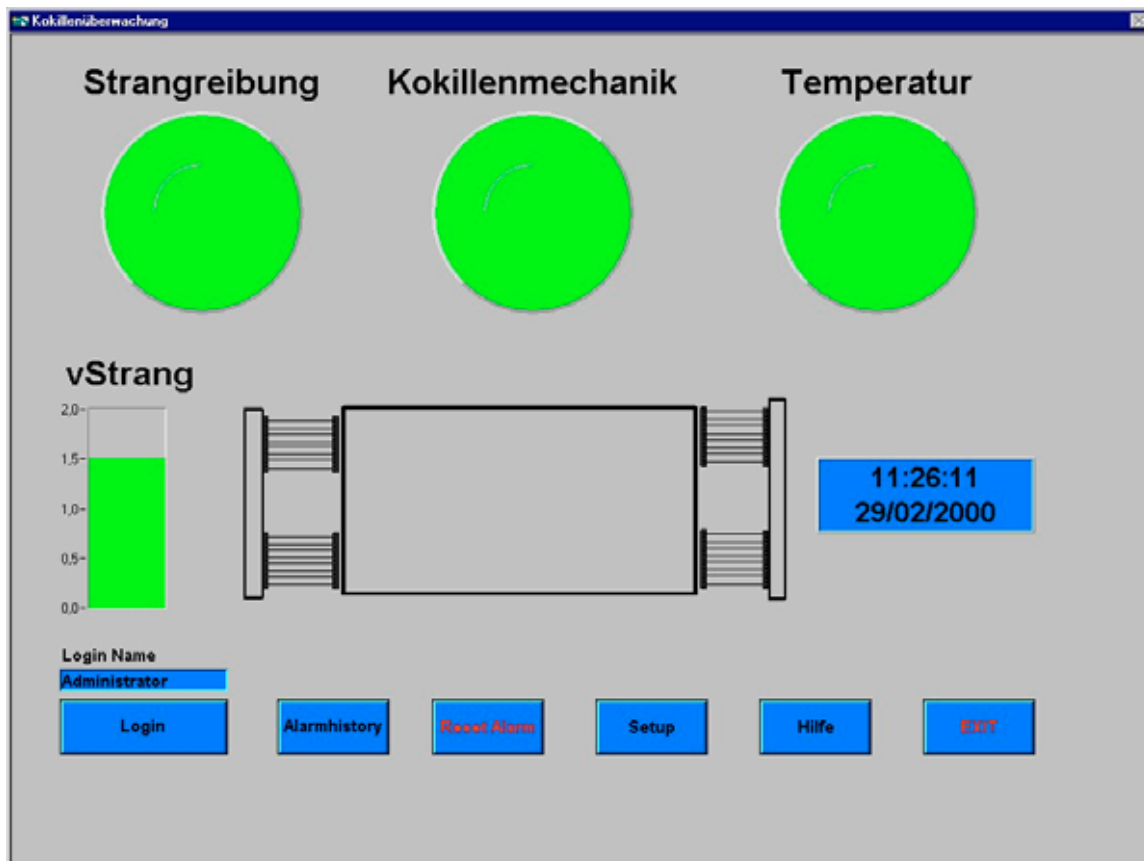


Bild 10.6: Grafische Benutzeroberfläche des Überwachungssystems

Bild 10.6 zeigt die grafische Benutzeroberfläche der Kokillenüberwachung. Die Statusanzeigen der *Strangreibung*, *Kokillenmechanik* und *Temperatur* visualisieren durch ihre Farbdarstellung den aktuellen Anlagenzustand und gestatten die Detaildarstellung der einzelnen Komponenten durch die Betätigung der Statusanzeigen. Die Stranggeschwindigkeit *Vstrang* wird in m/min dargestellt und zeigt die durch das hinterlegte Fuzzy – System berechnete Sollgröße *Vstrang*. Das *Login* - Feld gestattet eine Differenzierung der Systemoperatoren bzgl. deren Eingriffsmöglichkeiten in das System. Beispielsweise können Bestätigungen von Alarmmeldungen sowie Änderungen des Setups nur von Operatoren mit Administrator – Rechten durchgeführt werden. In der sog. *Alarmhistory* werden sämtliche aufgelaufenen Systemalarme gespeichert und dokumentiert. Der *Alarm – Reset* bestätigt aufgelaufene Störungsmeldungen. Unter dem Punkt *Setup* erfolgt, wie nachfolgend noch dargestellt, die Anpassung des Überwachungssystems an die aktuelle Stranggussanlage bzw. Kokille.

Die nachfolgenden Bilder 10.7 und 10.8 zeigen die Darstellung der Hysteresen beider Antriebszylinder sowie die aus den Hysteresen berechnete und um die Leerlaufreibung bereinigte Reibkraft.

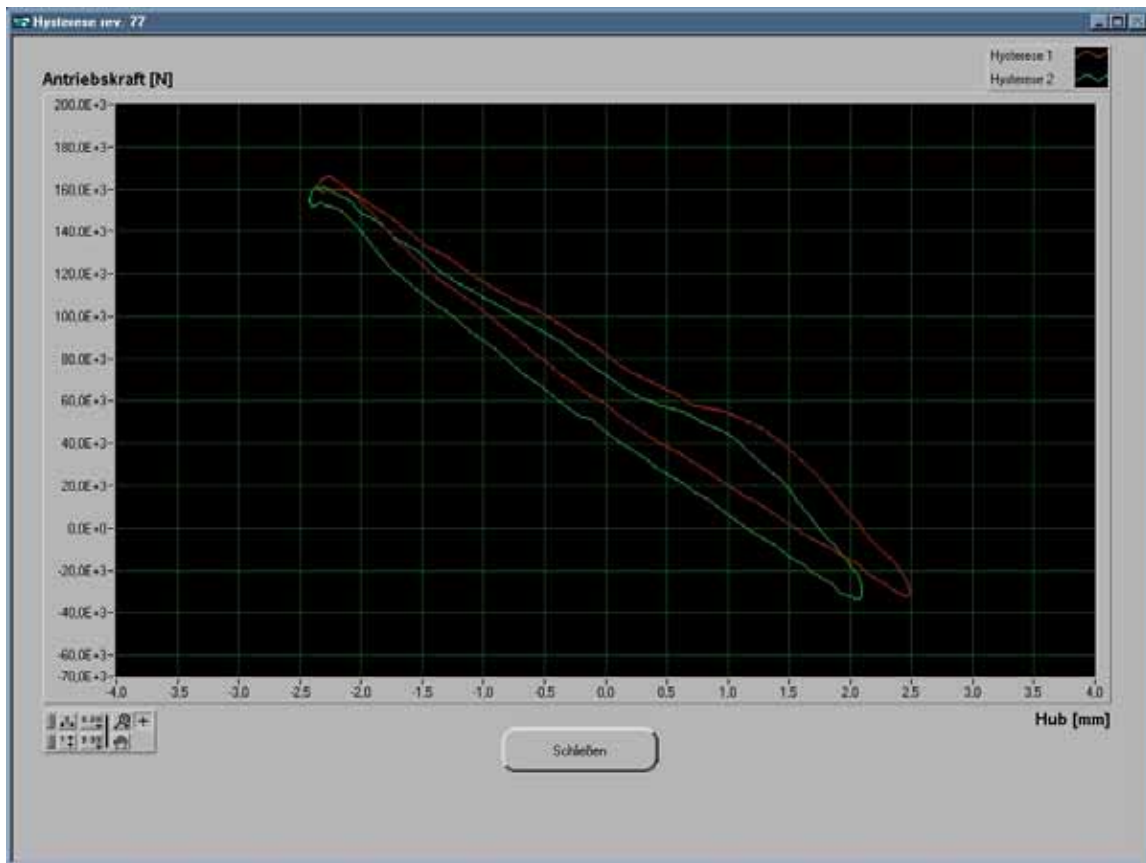


Bild 10.7: Hysterese beider Antriebszylinder

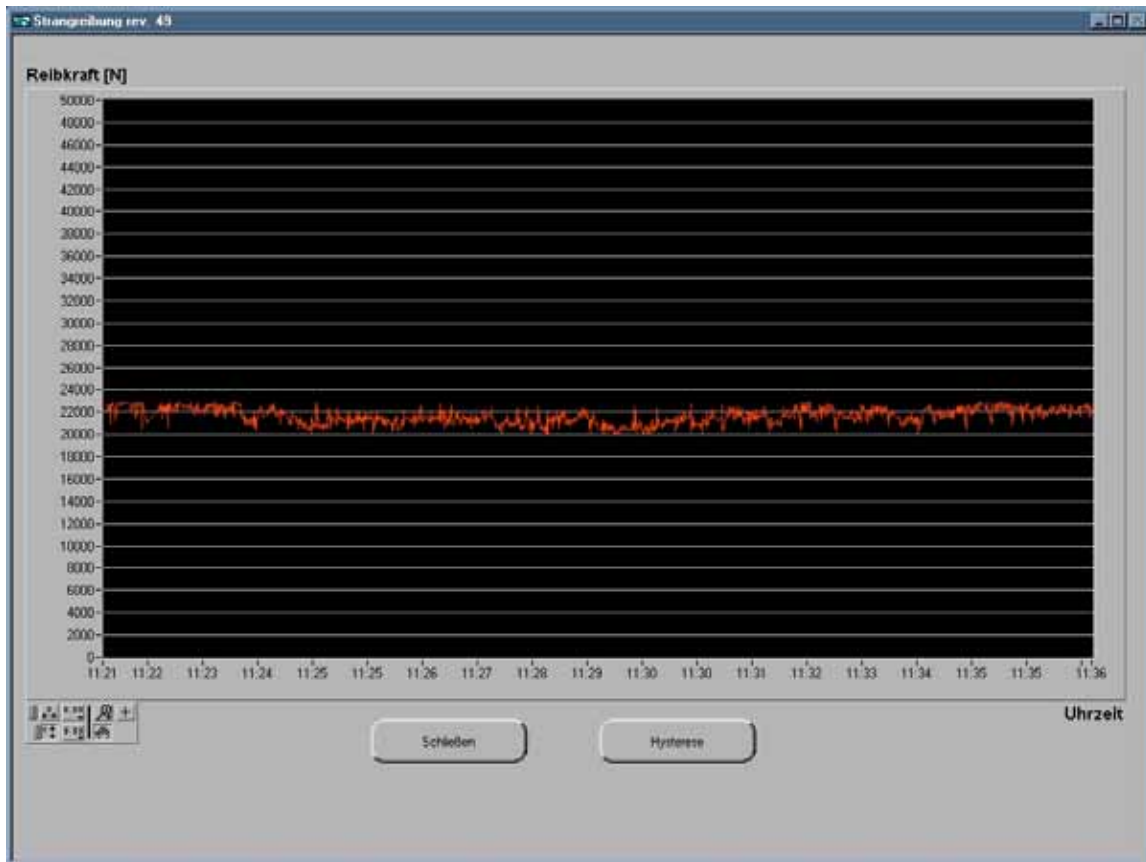


Bild 10.8: Aus den Hysterese berechnete Reibkraft

Die in Bild 10.7 und 10.8 dargestellten Visualisierungen sind von der in Bild 10.6 dargestellten Benutzeroberfläche über den Menüpunkt *Strangreibung* zugänglich.

Wie schon diskutiert, beruht die Überwachung der *Kokillenmechanik* auf dem Vergleich der Antriebskräfte beider Hydraulikzylinder und auf der Annahme, dass sich ein Schaden wie beispielsweise Lose im Antriebsstrang oder Bruch von Blattfedern unterschiedlich in beiden Bahnkurven darstellt. Bild 10.9 zeigt in der oberen Darstellung die Antriebskräfte beider Zylinder und in der unteren Darstellung deren Differenz, die einer Grenzwertüberwachung unterliegt.

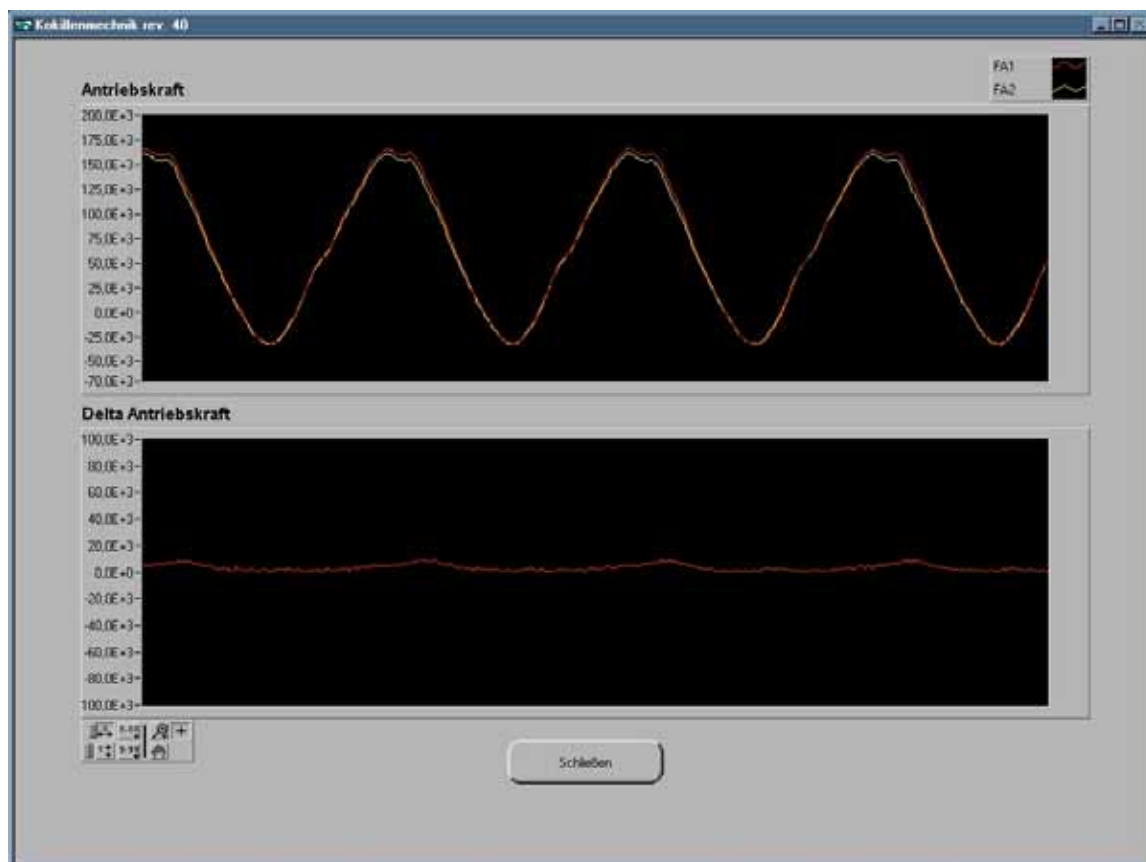


Bild 10.9: Antriebskräfte beider Zylinder (oben) und deren Differenz (unten)

Die nachfolgend dargestellte Visualisierung, die über die Statusanzeige *Temperatur* zugänglich ist, zeigt die prinzipielle Anordnung der Thermoelemente in den Kokillenwandungen. Die West- bzw. Ostseite bezeichnet die sog. Schmalseiten der Kokille, in denen je 4 Thermoelemente untergebracht sind. Die Breitseiten sind jeweils mit 16 Thermoelementen bestückt. Diese Darstellung ermöglicht die selektive Anzeige einzelner oder mehrerer Temperaturverläufe und erlaubt eine differenzierte Aussage über die Ursache eventueller temperaturbedingter Störungsmeldungen.

Bild 10.11 zeigt die sog. *Alarmhistory*, in der alle aufgelaufenen Alarmmeldungen tabellarisch aufgeführt sind.

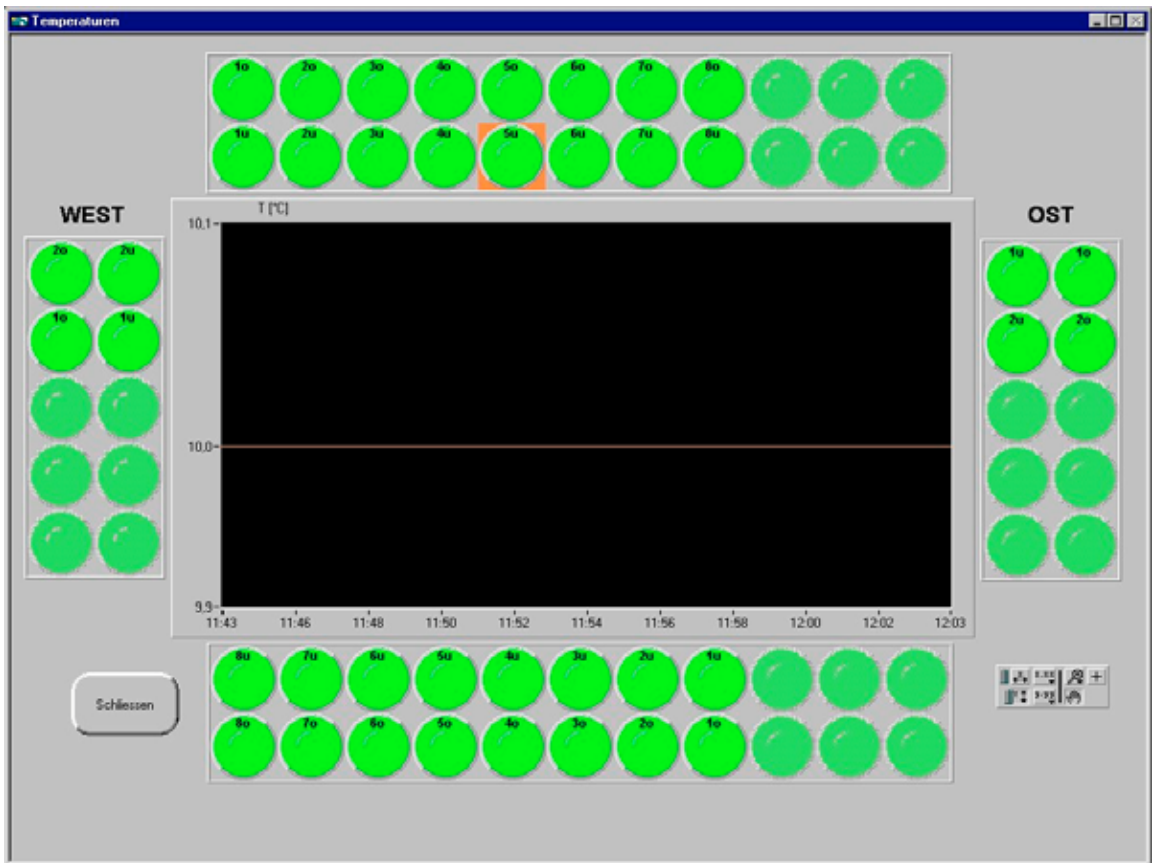


Bild 10.10: Temperaturen der Thermoelemente

The screenshot shows an "Alarmhistory" window containing a table of alarm records. The table has the following structure:

Date	Time	Tag	Event	Alarm State	Alarm Message
29/02/2000	11:48:13	TemperaturStatus07	ALARM	NORMAL	80 Nord
29/02/2000	11:46:20	TemperaturStatus07	ALARM	DISCRETE	80 Nord

At the bottom of the window, there is a "Schließen" button.

Bild 10.11: Alarmhistory

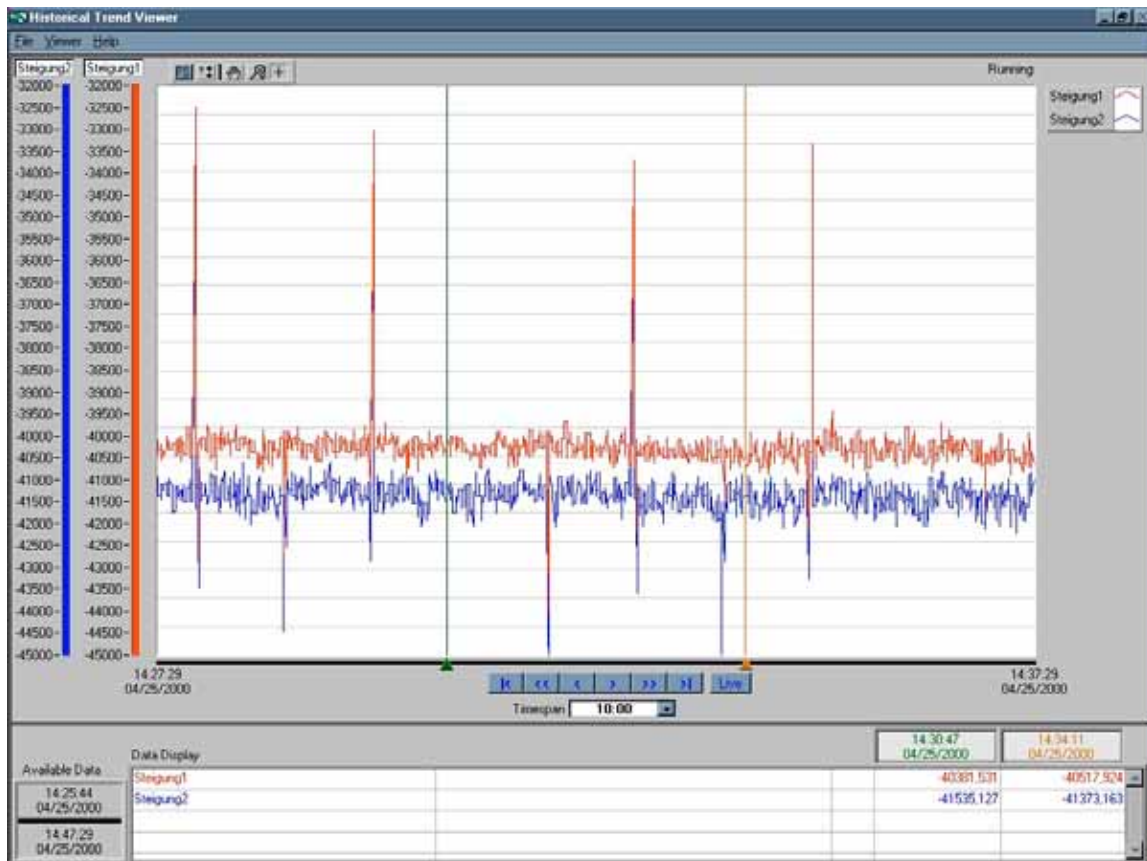


Bild 10.12: Datenarchivierung am Beispiel der Reibkraftgradienten beider Antriebszylinder

Die in Bild 10.12 dargestellten Reibkraftgradienten, die aus den Hysteresekurven der Hydraulikzylinder berechnet wurden, entstammen einer dem Überwachungssystem unterlagerten Datenbank. Die Archivierung der Datenbestände, die je nach Konfiguration über einen relativ langen Zeitraum erfolgen kann, eröffnet zusätzliche Möglichkeiten der Trendüberwachung und Diagnostik.

Wie schon im Kapitel 9.4 erwähnt, erfolgten die Systemkonfigurationen und die Systemtests auf der Grundlage der durch die Datenfernakkquisition gewonnenen Daten.

Bei der Systemkonfiguration zeigte sich, dass eine manuelle Konfiguration der Zugehörigkeitsfunktionen anhand der umfangreichen Testdatensätze praktisch nicht realisierbar ist. Abgesehen von den relevanten Prozessparametern wie z.B. Gießgeschwindigkeit, Qualitäten, Gießpulver, etc. unterliegen die Messgrößen mehr oder weniger großen Schwankungen, die nicht grundsätzlich zu einer Änderung der Ausgangsgröße, der Gießgeschwindigkeit, führen. Aus der dargestellten Problematik ergab

sich die Forderung nach einem geeigneten Lernalgorithmus, der anhand der vorhandenen Testdatensätze eine automatisierte Systemkonfiguration durchführt.

Hierbei fiel die Wahl auf die sogenannte *neuro – adaptiv learning technique*, deren Anwendung nachfolgend erläutert wird.

Das neuro – adaptive Lernen ist eine Methode, die die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen aus den Trainingsdatensätzen, die aus den Eingangs- und Ausgangsgrößen bestehen, berechnet. Diese Lernmethode ist vergleichbar mit der neuronaler Netze. Anhand der vorgegebenen Trainingsdaten wird ein Fuzzy - Inferenz - System generiert, dessen Zugehörigkeitsfunktionen bzw. die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen durch den Backpropagation - Algorithmus an die Trainingsdatensätze adaptiert werden.

Ziel des Backpropagation-Lernalgorithmus ist es, das globale Minimum einer Funktion mittels eines Gradientenabstiegsverfahrens zu finden. Wie bei jeder Gradientenmethode steht die Wahl des Startpunktes zur Diskussion. In den meisten Fällen genügt es, die Gewichte W des Netzwerkes mit zufälligen Werten aus einem Intervall $[-e, e]$ zu initialisieren, um Symmetrien zwischen verschiedenen Gewichtsvektoren aufzuheben.

Die Fehlerfunktion

$$E(W) = E(w_1, \dots, w_n) \quad (10.5)$$

gibt den Fehler an, den das Netzwerk bei gegebenen Gewichten w_1, \dots, w_n über alle Trainingsmuster aufsummiert besitzt. Mit einem Gradientenverfahren, d.h. der Methode des steilsten Abstiegs, wird nun versucht, möglichst schnell ein globales Minimum der Fehlerfunktion zu finden, d.h. eine Konfiguration der Gewichte, bei der die Fehlersumme über alle Trainingsmuster minimal ist. Für ein einzelnes Argument gilt somit

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E(W)}{\partial w_{ij}} \quad (10.6)$$

wobei η als Lernfaktor bzw. Schrittweite bezeichnet wird [Zel94].

Die generelle Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung besteht in der Repräsentation des Systems durch die Trainingsdatensätze. Dies ist nicht immer der Fall. Daher ist eine

Modellvalidierung erforderlich. Eine Modellvalidierung kann durch Datensätze erfolgen, die nicht für das Training benutzt wurden. Durch den Vergleich der geforderten Ausgangsgrößen mit den generierten Ausgangsgrößen können Aussagen zu der Systemgüte gewonnen werden.

Die prinzipielle Vorgehensweise besteht daher anfänglich in der Auswahl der Trainingsdatensätze und der Validierungsdatensätze. Die Trainingsdatensätze werden in die hier verwendete ANFIS (**adaptive neuro fuzzy inference systems**) – Umgebung geladen. In Bild 10.13 sind beispielhaft 25 Trainingsdatensätze bzw. deren Ausgangsgröße, die normierte Gießgeschwindigkeit, dargestellt. Die Generierung des Fuzzy - Inferenz - Systems besteht in der Auswahl der Zugehörigkeitsfunktionen sowie in der Festlegung der Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen je Eingangsvariable.

Unter Angabe der sog. Epochs (Anzahl der Iterationen) und der Fehlertoleranz erfolgt das Training mit dem vorab diskutierten Backpropagation – Verfahren. Das Training endet jeweils mit der Erfüllung einer der beiden Forderungen, d.h. entweder mit dem Erreichen der Fehlertoleranz oder der Anzahl der Iterationen.

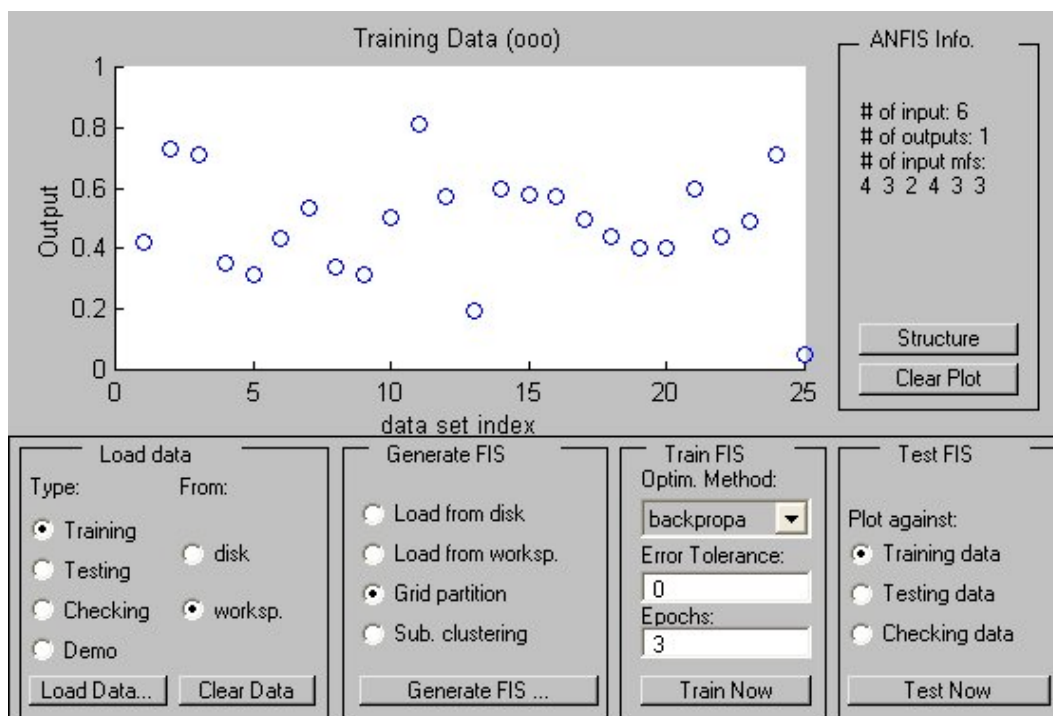


Bild 10.13: Darstellung von 25 ausgewählten Trainingsdatensätzen

Bild 10.14 zeigt den Verlauf der Fehlerfunktion als Funktion der Iterationen. Wird die geforderte Fehlertoleranz unterschritten oder erreichen vorher die Iterationen ihre maximale Anzahl, so ist das Training mit den vorhandenen Datensätzen abgeschlossen und das System

konfiguriert. In Bild 10.15 wird durch die Gegenüberstellung der gemessenen Ausgangsdaten und der durch das System berechneten Ausgangsdaten ein visueller Eindruck von der Qualität der Systemapproximation vermittelt.

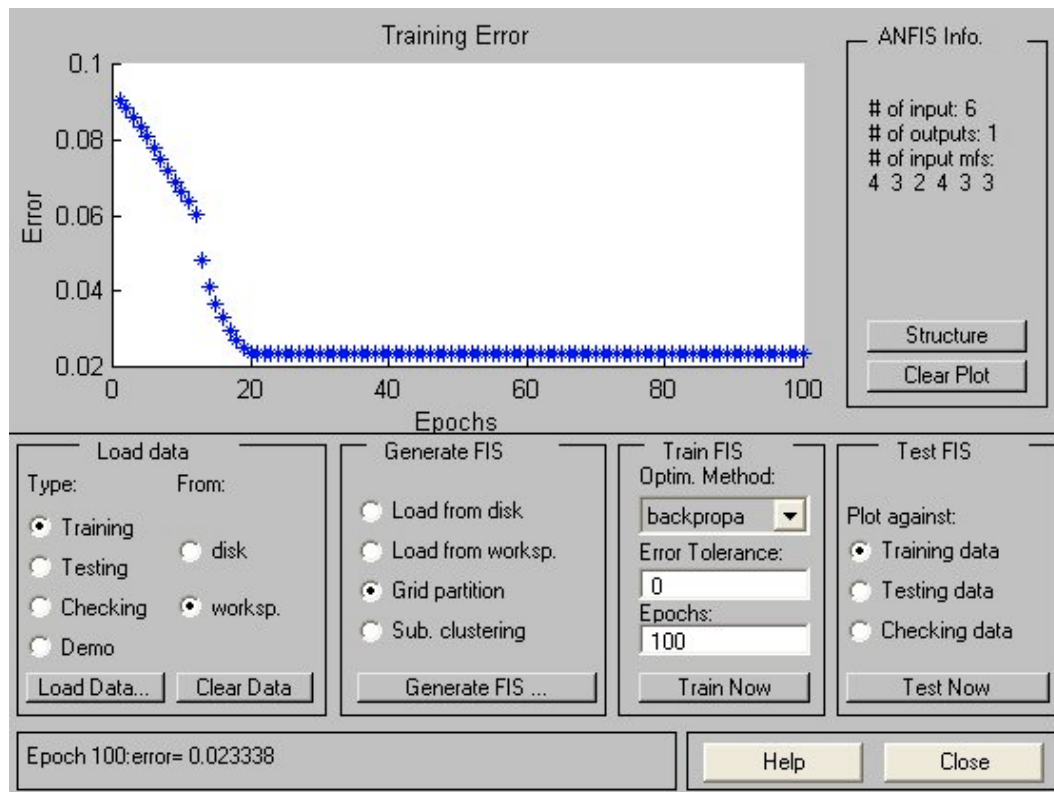


Bild 10.14: Fehlerfunktion als Funktion der Iterationen

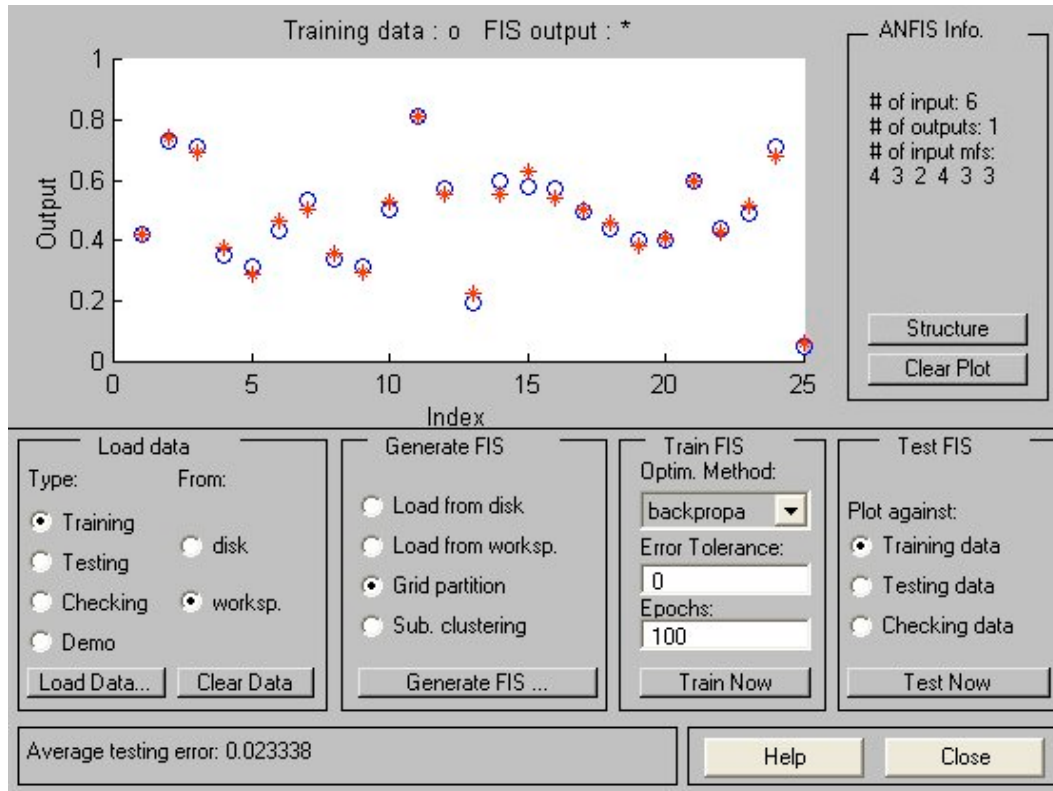


Bild 10.15: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Ausgangsgrößen der Trainingsdaten

Die hier in Bild 10.15 an einer Auswahl von 25 Datensätzen dargestellte Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Ausgangsgrößen zeigt ein zufriedenstellendes Ergebnis mit einem über alle Datensätze gemittelten Fehler von 0.0233.

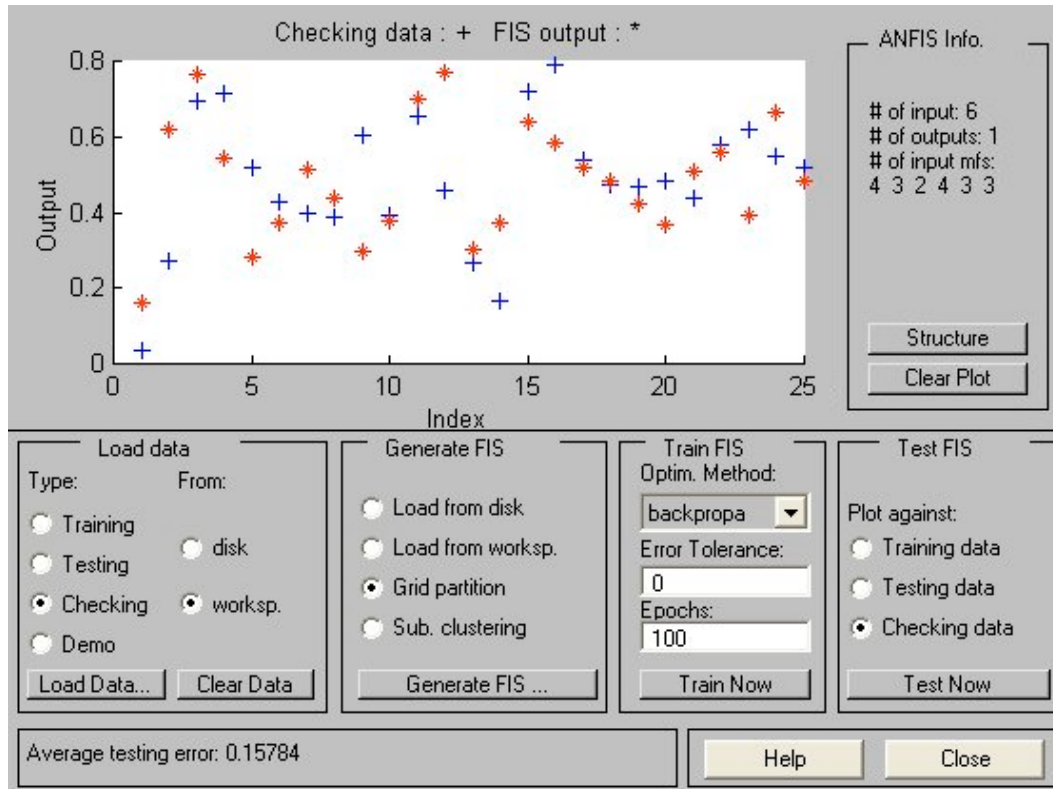


Bild 10.16: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Ausgangsgrößen der Validierungsdaten

Die in Bild 10.16 dargestellte Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Ausgangsgrößen der Validierungsdaten ergab einen gemittelten Fehler von 0.157. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen die prinzipielle Vorgehensweise bei der Generierung des Fuzzy – Inferenz – Systems anhand einer willkürlich ausgewählten Datenuntermenge. Die Adaption an das System *Kokille* erfolgte abhängig von den Prozessparametern mit einer Vielzahl von Datensätzen, die allerdings nicht mehr über die ANFIS – Bedienoberfläche, sondern über die sog. command line eingepflegt wurden. Während beispielsweise für die Parameterkonstellation Gießpulver FS und Gießgeschwindigkeit 1 m/min bei kontinuierlichem Betrieb eine fast unbegrenzte Datenmenge zur Verfügung stand, konnte für den Anlagenzustand *positive Breitenverstellung* auf nur ca. 200 Datensätze zurückgegriffen werden.

Nach der Generierung der Zugehörigkeitsfunktionen – hier Trapezform – für die einzelnen Kombinationen der Prozessparameter wurde der Versuch unternommen, die Zugehörigkeitsfunktionen durch Skalierungen von einem stationären Prozesszustand zu den Gießereignissen zu transferieren.

10.3 Validierung der Systemkonfiguration

Im Gegensatz zu den typischen Klassifikationsaufgaben, wie z.B. der Bildverarbeitung, existieren keine objektiven Kriterien, die eine eindeutige Zuordnung des Zustandsvektors zu dem momentanen Anlagenzustand gestatten. Ein sog. Kleber, der sich deutlich durch lokales Ansteigen der Temperaturen einzelner Thermoelemente darstellt und eine Verletzung der Strangschale bedeutet, läßt sich an dem Endprodukt Bramme nur in den wenigsten Fällen nachweisen. Umgekehrt läßt sich eine Fehlstelle auf der Brammenoberfläche nicht grundsätzlich auf einen Kleber zurückführen. Die Ursache hierfür liegt einerseits in der Reaktion installierter Temperaturüberwachungssysteme auf Kleberdetektionen und ermöglicht dadurch ein Ausheilen der Strangschale innerhalb der Kokille, andererseits unterliegt die Bramme zahlreichen Einflüssen wie Spritzkühlung, Strangführung und ggf. Soft Reduktion innerhalb der metallurgischen Länge der Anlage.

Für die Beurteilung der Strangreibung liegen ebenso keine objektiven Grenzwerte vor. Eine praktikable Vorgehensweise besteht darin, für sämtliche Permutationen der Prozessparameter störungsfreie Normalzustände zu definieren und für die entsprechenden Zustandsvektoren Grenzwerte festzulegen.

Die Validierung der Systemkonfiguration erfolgt dann durch eine Gegenüberstellung der Schlussfolgerungen, die durch das System getroffen wurden und den Schlussfolgerungen die ein 'Experte' anhand der Analyse der Zustandsvektoren trifft. Diese Gegenüberstellung wurde mit neu akquirierten Datensätzen, unabhängig von den bereits verwendeten Trainings- und Validierungsdatsätzen, durchgeführt. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung des Systemverhaltens ist der Vergleich mit dem installierten und in die Prozessregelung integrierten Temperaturüberwachungssystem.

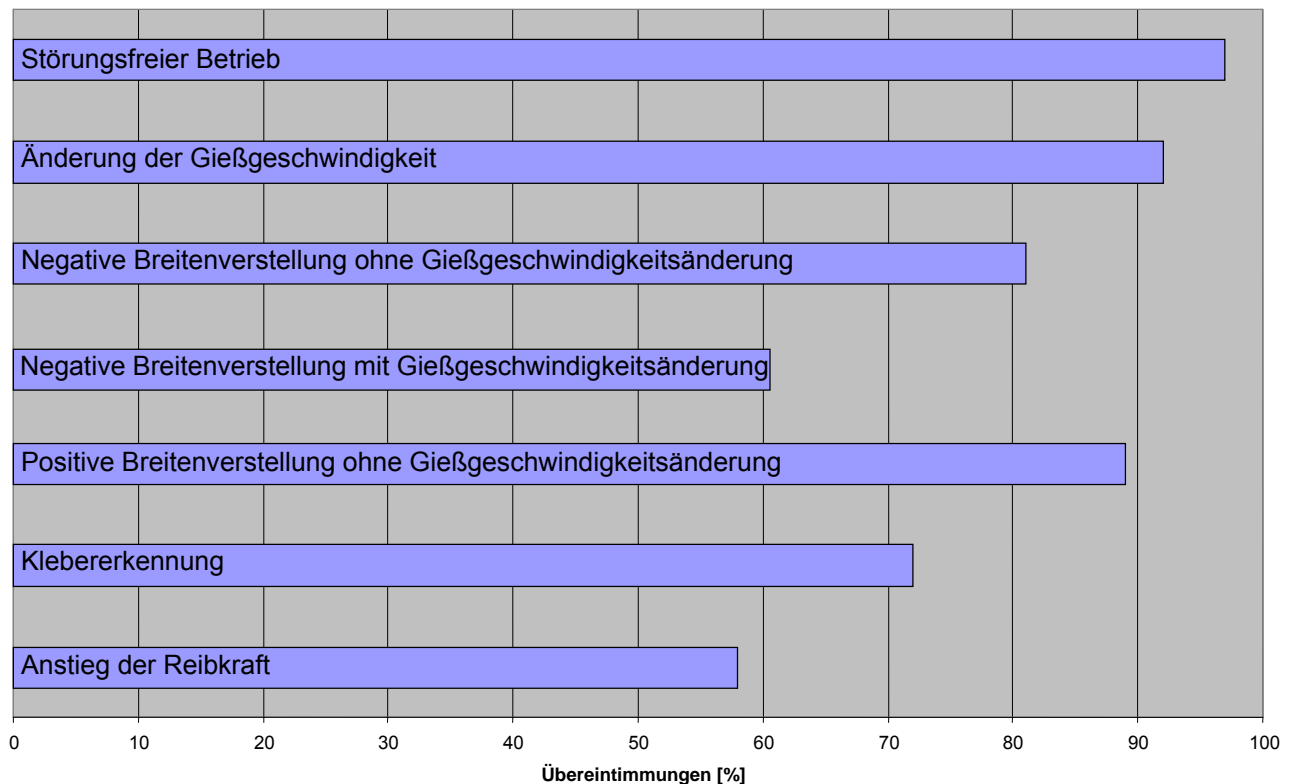


Bild 10.17: Übereinstimmungen der System- und Expertenentscheidung bei verschiedenen Gießereignissen

Die Gegenüberstellung der System- und Expertenentscheidungen weisen fallspezifische Abweichungen auf. Die gute Übereinstimmung im Falle des störungsfreien Anlagenbetriebes ist auf die umfangreichen Datensätze zurückzuführen. Wie schon eingehend diskutiert, verändert sich die Reibkraftamplitude deutlich in dem Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,0 und 0,6 m/min. Speziell in dem Grenzbereich um 0,6 m/min ist eine Zuordnung zu dem entsprechenden Anlagenstatus *Normalbetrieb* oder *Störung* schwierig und äußert sich in einem Übereinstimmungsgrad von 92 %. Ähnlich verhält es sich bei der negativen Breitenverstellung ohne Gießgeschwindigkeitsänderung. Hier stellt sich die Frage nach der maximalen Belastbarkeit der Strangschale unter Berücksichtigung der übrigen Gießparameter, deren Unkenntnis zu einer konservativen Beurteilung der Reibung durch den Experten führt. Im Falle der negativen Breitenverstellung mit Gießgeschwindigkeits-änderung wird diese Problematik zusätzlich durch die Gießgeschwindigkeitsänderungen erschwert. Dies führte zu einer Übereinstimmung von lediglich 58 %. Die positive Breitenverstellung ohne Gießgeschwindigkeitsänderung hat nur geringen Einfluß auf die Reibung zwischen Kokille und Strang und führt daher zu Übereinstimmung von ca. 88 %.

Im Falle der Klebererkennung muß festgestellt werden, dass bei der Beurteilung durch einen Experten in der Regel die Temperaturen benachbarter Thermoelemente berücksichtigt wurden und somit eine gewisse Informationsredundanz bei der Klassifikation vorlag. Es sei hier noch einmal darauf verwiesen, dass in das Überwachungssystem lediglich die Temperaturinformation eines Thermoelementes nach einer Vorselektion eingeht. Ein weiterer Aspekt, der zu einem Übereinstimmungsgrad von lediglich 72 % führte, ist darin begründet, dass das Überwachungssystem, verglichen mit einer Expertenklassifikation, zusätzlich die Reibwerte bzw. deren Gradienten berücksichtigt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass Abweichungen zwischen Experten- und Systemklassifikationen nicht a priori als schlechtes Ergebnis zu bewerten ist, sondern wie z.B. im Falle der Klebererkennung auf eine Verbesserung der Diagnosesicherheit zurückzuführen ist.

Die Abweichung der Übereinstimmungen im Falle der Reibkraftänderung, hier primär der Anstieg der Reibkraft, läßt sich wie bei den vorhergehenden Gießereignissen unter Reibkraftveränderungen durch die fehlende Erfahrung bei der Bewertung der Reibkraftänderungen zurückführen. Durch die Systemkonfiguration wurden Reibkraftanstiege durchweg toleranter bewertet als durch den Experten.

Wie die Systemvalidierung und die Inbetriebnahme des Systems zeigten, besteht noch ein erheblicher Optimierungsbedarf, der primär die Systemparameter umfasst. Weitaus gravierender stellten sich die nachfolgend aufgeführten konzeptionellen Nachteile des Monitoring – Systems dar. Hier ist zunächst der Informationsverlust durch die Vorselektion der Temperaturdaten zu nennen. Wie auch in [Wy198] dargestellt, führt die Analyse der Temperaturdaten benachbarter Thermoelemente zur besseren redundanten Diagnosesicherheit.

Das Einpflegen neuer Datensätze, die durch das System nicht zu zufriedenstellenden Interpretationen führten, ist mit einem erheblichen Aufwand verbunden, da in der Regel die Parameter der Subsets verändert werden müssen, was wiederum zu einer Veränderung des gesamten Systemverhaltens führt.

Ein weiterer Aspekt ist die Integration aller verfügbaren Parameter innerhalb einer Regel. Neben den begrenzten Möglichkeiten der grafischen Darstellung, ist die Interpretation des Zustandvektors, der alle Parameter beinhaltet, äußerst schwierig. Daraus ergibt sich die

Forderung nach einer anfänglichen getrennten Abarbeitung thermischer und mechanischer Parameter, deren Ergebnisse in einem nachfolgenden Verarbeitungsschritt wieder zusammengefasst werden können

Am Beispiel des Gießereignisses *Negative Schmalseitenverstellung* wurde deutlich, dass die Integration der Reibkraft und deren Ableitung zu deutlichen Verschlechterungen der Diagnosesicherheit führt, da die Reibung in diesem Betriebspunkt einen völlig ungeeigneten Überwachungsparameter darstellt.

Wie anfänglich in Kapitel 10.1 beschrieben, stützte sich der erste Entwurf des Überwachungssystems auf das vorhandene Wissen des Anlagenbetreibers im Umgang und in der Interpretation mit den Temperaturdaten. Hierbei wurde jedoch die fehlende Erfahrung bei der Interpretation der Reibungsverläufe unterschätzt. Somit wurde in dem ersten Systementwurf ein bewährtes Regelschema für die Temperaturüberwachung durch ein angenommenes Regelgerüst für die Reibungsüberwachung ergänzt.

Ein generelles Problem bei dieser Überwachungsaufgabe ist die unzureichende Anzahl an Zustandsvektoren, die Störfälle beschreiben. Während Zustandsvektoren, die den störungsfreien Anlagenbetrieb charakterisieren, in nahezu unbegrenzter Anzahl zur Verfügung stehen, konnten in dem begrenzten Beobachtungszeitraum keine Daten zu einem Durchbruch, d.h. Riß der Strangschale mit anschließendem Austritt von flüssigem Stahl, gewonnen werden.

10.4 Zweiter Entwurf eines Überwachungssystems

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten konzeptionellen Nachteile des ersten realisierten Systems führten zu dem Entschluss, ein zweites verbessertes System zu entwerfen, dass den folgenden Anforderungen genügen sollte:

- Einbindung benachbarter Thermoelemente in das Inferenzschema
- Vereinfachte Einbindung neuer Datensätze, speziell der Strangreibung und deren Ableitungen
- Separate Abarbeitung der Eingangsdaten Temperatur und Reibung mit anschließender Zusammenführung der Ergebnisse der Teilsysteme
- Betriebsspezifische alternative Nutzung thermischer oder mechanischer Größen im Gegensatz zur permanenten gemeinsamen Nutzung
- Verbesserung der Regelschemata und Signalvorverarbeitung
- Erweiterung der Überwachungsmethodik der Kokillenmechanik, die, wie vorab dargestellt, in der Grenzwertüberwachung der Differenz der Antriebskräfte beider Hydraulikzylinder besteht.

Bild 10.18 zeigt schematisch den zweiten Systementwurf

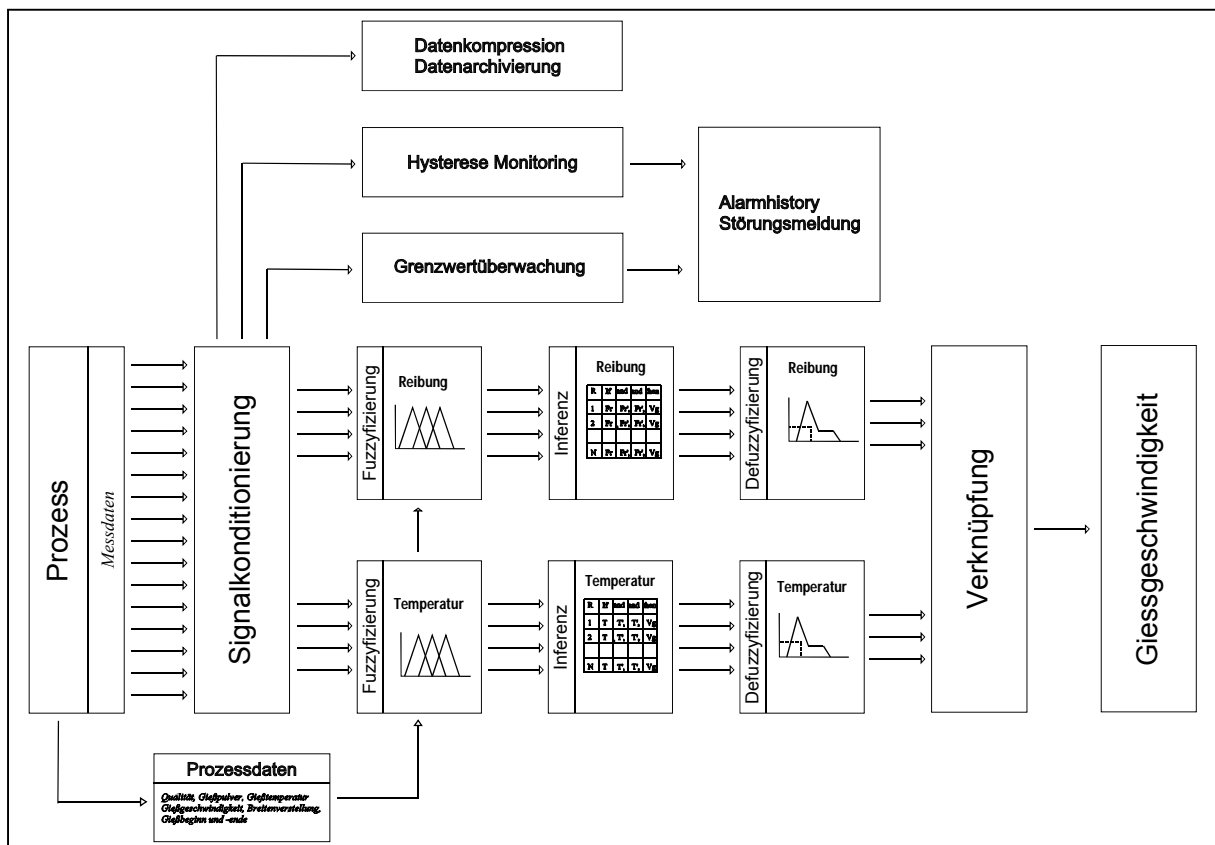


Bild 10.18: Zweiter Entwurf des Überwachungssystems

Wie in Bild 10.18 dargestellt, wurde der Block der *Signalkonditionierung* in seinen wesentlichen Bestandteilen beibehalten. Im Falle der Temperaturüberwachung wurde die Zeitdauer des Ansteigens der Temperaturgradienten durch die Auswertung eines Langzeitgradienten ersetzt. D.h. die wesentlichen Eingangsgrößen der Fuzzy – Subsets sind Temperaturamplitude, Kurzzeit– und Langzeit – Temperaturgradient.

Verglichen mit dem ersten Entwurf werden nun die Daten aller Thermoelemente in die Überwachung mit einbezogen ohne die Daten einer Vorauswahl zu unterziehen. In der nachgeschalteten *Verknüpfung* werden die Thermoelemente, deren Daten zu einer Reduktion der Gießgeschwindigkeit führen, auf ihre geometrische Zusammengehörigkeit überprüft. Befinden sich zwei auslösende Thermoelemente untereinander, so wird die Gießgeschwindigkeit noch weiter reduziert. Hierbei ist der zeitliche Versatz der Temperaturdaten, der mit der Gießgeschwindigkeit korreliert, zu beachten.

Die Anpassung an die aktuellen Betriebsbedingungen erfolgt durch Skalierung der Subsets in Abhängigkeit von den Prozessparametern.

Die Verarbeitung der Strangreibung und deren Gradienten erfolgt prinzipiell nach dem gleichen Schema. Verglichen mit dem ersten Entwurf, der den arithmetischen Mittelwert beider Hysteresen verwendete, werden hier die Daten der Hydraulikzylinder einzeln klassifiziert. Die wesentlichen Parameter sind Reibungsamplitude, Kurzzeit– und Langzeit – Reibgradient. Die Adaption an die Betriebsbedingungen erfolgt durch die Skalierung der Subsets in Abhängigkeit von den Betriebsparametern.

Der Programmblock *Verknüpfung* beinhaltet die Zusammenführung der Stellgrößen Gießgeschwindigkeit aus der Reibungsüberwachung und Gießgeschwindigkeit aus der Temperaturüberwachung. Eine zeitgleiche reibungs- und temperaturinduzierte Reduktion der Gießgeschwindigkeit führt zu einer weiteren Absenkung der Stellgröße Gießgeschwindigkeit und ermöglicht so eine Verlängerung der Verweil- und damit Ausheildauer der Bramme innerhalb der Kokille.

Eine weitere wesentliche Verbesserung der Klassifikation von Gießereignissen wie z.B. der negativen Schmalseitenverstellung besteht in der betriebsspezifischen alternativen Nutzung thermischer oder mechanischer Größen. Wie in Kapitel 9.1.4 angedeutet, besteht ein hohes Fehlalarmpotential bei der Einbindung der Reibkraft in die Überwachung dieser Gießereignisse. Alternativ wurden nun ausschließlich thermische Größen zur Beurteilung

solcher Gießereignisse herangezogen, da sie sich relativ robust gegenüber diesen verfahrensspezifischen Änderungen verhalten.

Mit dem zweiten Entwurf des Überwachungssystems wurde zusätzlich ein weiterer Klassifikator entwickelt und unter dem Programmblock *Hysterese Monitoring* implementiert. Wie in Kapitel 10.2 dargestellt, erfolgte die Überwachung der mechanischen Komponenten einer Brammenkokille durch den Vergleich der Antriebskräfte beider Hydraulikzylinder bzw. durch die Grenzwertüberwachung der Differenz der Antriebskräfte. Diese Methodik beruhte auf der Voraussetzung, dass sich ein Störfall immer unterschiedlich auf die Antriebskräfte beider Hydraulikzylinder auswirkt. Eine weitere Einschränkung besteht in der ausschließlichen Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf Brammenanlagen. Vorblock – Kokillen, die hier als Versuchsträger genutzt wurden, können mit diesem Verfahren nicht mechanisch überwacht werden, da sie nur über einen Antriebszylinder verfügen. Daher wurde ein weiterer Klassifikator entwickelt, der in dem folgenden Abschnitt ausführlicher diskutiert wird.

10.4.1 Hysterese Monitoring

Die Form, Lage und die Fläche der Hysterese hängen von einer Vielzahl von Prozessparametern ab. In dem bisher vorgestellten Überwachungskonzept wurde ausschließlich die Hysteresefläche und deren zeitliche Veränderung genutzt um daraus die Reibkraft bzw. deren Gradient zu ermitteln. Die Änderung der Lage der Hysterese, d.h. die Steigung der Geraden, die durch die Umkehrpunkte der Hysterese definiert wird, konnte durch die geringe Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Federsteifigkeit, wie sie beispielsweise bei einem Bruch einer Blattfeder auftreten, nicht als Fehlerindikator verwendet werden.

Wie in Kapitel 8.3.3 dargestellt wurde, verändert sich die Form der Hysterese bei Auftreten von Lose im Antriebsstrang. Die dadurch bedingten Abweichungen der Druck- und Wegsignale von ihren Sollwerten sowie die Änderung der Phasenlage zwischen den Druck- und Wegsignalen führen zu Veränderungen der Hystereseform gegenüber der Hystereseform bei Abwesenheit von Lose im Antriebsstrang. Hierbei zeigte sich, dass die Hysteresefläche beim Auftreten einer Lose teilweise unbeeinflusst blieb und damit nicht als Fehlerindikator genutzt werden konnte.

Im ersten Ansatz, der von der Zielstellung "Brammenanlage", d.h. zwei Antriebszylinder, ausging, wurde die Kokillenmechanik durch den Vergleich der Antriebskräfte beider Hydraulikzylinder überwacht. Diesem Konzept lag die Annahme zugrunde, dass jeweils nur eine Antriebsseite Fehler aufweist und sich dadurch in dem Verlauf ihrer Antriebskraft über eine Oszillationsperiode von der fehlerfreien Seite unterscheidet. Die Forderung nach der Überwachbarkeit von Vorblock - Kokillen, d.h. nur durch einen Hydraulikzylinder angetriebene Kokille, machte einen völlig neuen Ansatz erforderlich. Der Ansatz besteht darin, die den aktuellen Zustand beschreibende Hysterese mit einer Referenzhysterese zu vergleichen, die den fehlerfreien Zustand unter Berücksichtigung der aktuellen Prozessparameter repräsentiert.

Diese Aufgabenstellung legt die Verwendung von Musterklassifikatoren wie den künstlichen neuronalen Netzen nahe. Bedingt durch die Anwendung sind einige spezielle Anforderungen an diese Klassifikatoren zu stellen. So kann beispielsweise nicht davon ausgegangen werden, dass die Trainingsmuster Anspruch auf Vollständigkeit besitzen und dem System im laufenden Betrieb Muster präsentiert werden, die von den Trainingsmustern abweichen. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass die Klassifikation deterministisch erfolgt und nicht wie z.B. bei Netzen mit sigmoiden Aktivierungsfunktionen bei Mustern, die außerhalb des Bereiches der Trainingsmuster liegen, unvorhersehbare Ausgaben liefern. Weiterhin wird die Trainingsmenge, die den fehlerbehafteten Zustand beschreibt, klein sein verglichen mit der Trainingsmenge, die den fehlerfreien Zustand beschreibt. Ein neues Muster, das von den Trainingsmustern abweicht, muss während des Online - Betriebes ohne aufwendige Lernverfahren in das bestehende System eingepflegt werden können.

Die dargestellten Anforderungen an einen Musterklassifikator führten zur Verwendung sog. Radialer - Basisfunktionen - Netze (RBF - Netze), die die gestellten Anforderungen erfüllen und nachfolgend genauer beschrieben werden.

10.4.2 Radiale - Basisfunktionen - Netze

Radiale - Basisfunktionen - Netze sind spezielle vorwärtsgerichtete neuronale Netze, die nur eine Schicht verdeckter Neuronen besitzen. Diese Neuronen haben spezielle, radialsymmetrische (radiale) Aktivierungsfunktionen. Diese Aktivierungsfunktionen sind mathematisch gesehen die Basisfunktionen eines Funktionensystems zur Approximation von mehrdimensionalen Funktionen anhand von Werten der Stützstellen. Die Stützstellen sind im

einfachsten Fall durch die Trainingsmuster des Netzes vorgegeben. RBF – Netze haben gegenüber anderen Netzmodellen zwei wesentliche Vorteile:

- Die Aktivierungsfunktion der Neuronen liefert nur dann große Werte, wenn sich das Eingabemuster in der Nähe einer Stützstelle befindet. Für Testmuster außerhalb des Bereiches, der durch die Trainingsmuster abgedeckt wurde, liefert das Netz nur geringe Aktivierungen.
- Die einfache Struktur der RBF – Netze mit nur einer verdeckten Schicht Neuronen erlaubt eine direkte (nichtiterative) Berechnung der Gewichte des Netzwerkes. Dies steht im Gegensatz zu den meist langwierigen iterativen Trainingsverfahren anderer Netzwerktypen. Es ist auch möglich, RBF – Netze mit der direkten Gewichts Berechnung, die sich aus den Trainingsmustern ergibt, zu initialisieren und mit Verfahren wie Backpropagation nachzutrainieren [Zel94].

Bild 10.19 zeigt ein RBF – Netz mit einem Eingangsvektor P der Dimension R.

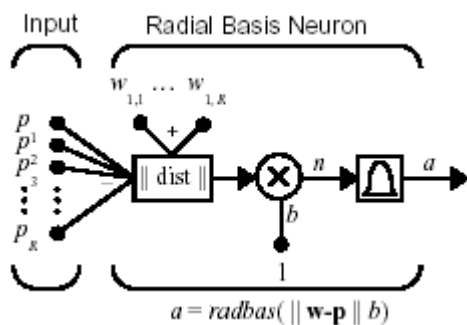


Bild 10.19: Radial - Basisfunktionen – Netzwerk mit einem Eingangsvektor P, Gewichtsvektoren W und Bias b [Dem98]

Das Bias b gestattet die Einstellung der Empfindlichkeit des Radial Basis Neurons. Die Transfer Funktion eines Radial Basis Neuron lautet:

$$\text{radbas}(n) = e^{-n^2} \quad (10.7)$$

Bild 10.20 zeigt eine Abbildung der Radial Basis Funktion.

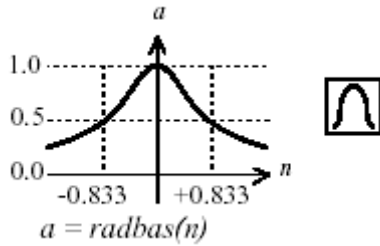


Bild 10.20: Radial Basis Funktion

Die Radial Basis Funktion besitzt ihr Maximum bei dem Wert 0, d.h., bezogen auf das Radial Basis Funktionen Netzwerk, bei einer Übereinstimmung von Eingangs- und Gewichtsvektor (vgl. Bild 10.19 $\|w - p\|$).

In vielen Klassifikationsanwendungen werden häufig sog. PNN's (Probabilistic Neural Networks) genutzt. Diese bestehen aus zwei Layern. Das erste Layer ist ein Radial Basis Layer. Bei dem zweiten Layer handelt es sich um ein Competitive Layer, der die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit eines Eingangsmusters zu einem Referenzmuster ermittelt und dem Referenzvektor mit der höchsten Wahrscheinlichkeit eine 1 und allen anderen eine 0 zuweist. Bild 10.21 zeigt ein Netzwerk mit einer PNN – Netzarchitektur.

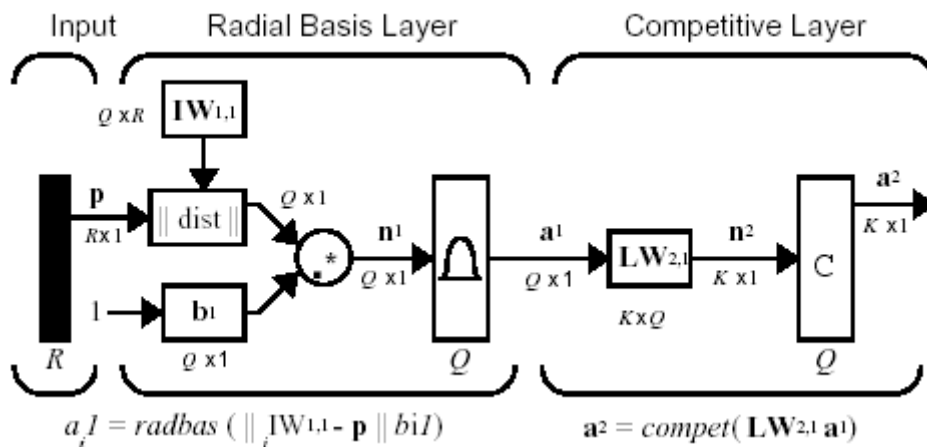


Bild 10.21: Netzwerk Architektur eines PNN (Probabilistic Neural Network) [Dem98]

Die Implementierung eines PNN's in ein Hysterese Monitoring erfordert eine Aufbereitung der Hysteresedaten. So müssen alle Stützstellen einer geschlossenen Hysterese normiert werden, um Veränderungen der Reibkraft zu eliminieren. Weiterhin muss die Lage der Hysterese derartig korrigiert werden, dass die Verbindungsgerade zwischen Maximum und

Minimum der Hysterese durch den Koordinatenursprung führt. Hierdurch wird erreicht, dass Lageänderungen der Hysterese, wie sie beispielsweise durch Offsets der Druck- bzw. Wegaufnehmer entstehen, kompensiert werden.

Der Einsatz des Hysterese Monitorings macht eine Setup – Phase erforderlich. Während dieser Phase werden Trainingsmuster gesammelt, die in der Regel den störungsfreien Anlagenbetrieb beschreiben.

Diese Trainingsmuster werden nach einer Überprüfung auf Redundanzen in das System als Gewichtsvektoren eingestellt. Durch die Biasfunktion besteht die Möglichkeit die Empfindlichkeit des Klassifikators innerhalb des ersten Layers zu verändern. Die Veränderung der Empfindlichkeit kann durchaus in Abhängigkeit von den Prozessparametern d.h. adaptiv erfolgen. In diesem ersten Entwurf wird mit einem konstanten Bias gearbeitet.

Bei einem im Einsatz befindlichen System wird in Abhängigkeit von der Performance des eingesetzten Rechners dem Klassifikator entweder jede Hysterese oder jede n-te Hysterese präsentiert. Erkennt das System eine Abweichung von den Trainingsmustern, wird eine Alarmmeldung generiert. Nach der Begutachtung durch einen Operator wird das Muster als weiteres Trainingsmuster übernommen, das entweder den fehlerfreien oder fehlerbehafteten Zustand repräsentiert.

10.4.3 Validierung des zweiten Entwurfes

Die Validierung des zweiten Systementwurfes erfolgt exemplarisch an ausgewählten Datensätzen. Die Eingangsdaten wie beispielsweise Temperaturen, hydraulische Drücke, Prozeßparameter sowie Hübe werden analysiert, und die erforderlichen Sollgrößen werden den durch das System generierten Istgrößen gegenübergestellt. Wie schon bei der Validierung des ersten Systementwurfes besteht die Schwierigkeit der Beurteilung des Systemverhaltens in dem aktiven Eingriff in den Prozeß durch das bestehende Temperaturüberwachungssystem. Wie in den letzten Kapiteln dargestellt, führen entsprechende Grenzwertüberschreitungen von Temperaturamplituden und –gradienten zu einer Reduktion der Gießgeschwindigkeit. Eine Beurteilung der Systemreaktion des entwickelten Systems ist daher ausschließlich bis zu dem Einsetzen der Regelmechanismen des implementierten Systems möglich, da sich ab diesem Zeitpunkt neue Systemparameter einstellen und daher keine Informationen über das Verhalten nach der Aktivierung der bestehenden Regelmechanismen vorliegen. Der dargestellte Einfluß der integrierten Temperaturüberwachung ist jedoch nur bei temperaturinduzierten Gießgeschwindigkeitsänderungen vorhanden. Bei reibungsinduzierten Gießgeschwindigkeitsänderungen fehlt die Rückkopplung durch das System, so dass der Einfluss durch die Reduktion oder Erhöhung der Gießgeschwindigkeit nicht einbezogen werden kann.

Wie erläutert, kann bei einem parallelen Betrieb des Monitoring – Systems und der implementierten Temperaturüberwachung nur eine prinzipielle Abschätzung des Verhaltens erfolgen. Umfassende Aussagen zur Systemgüte können erst bei einer sog. stand alone Applikation des entwickelten Systems getroffen werden.

Nachfolgend sind einige vom Normalbetrieb abweichende Verläufe der Temperatur, Reibkraft und deren Ableitung sowie die daraus resultierende Gießgeschwindigkeit, berechnet mit dem zweiten Entwurf des Monitoring Systems, dargestellt.

Temperaturveränderung / Kleberwarnung

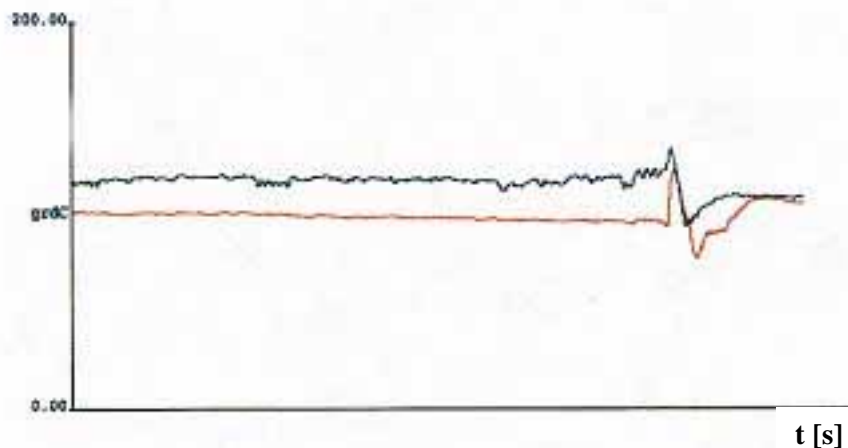


Bild 10.22: Temperaturverlauf zweier Thermoelemente

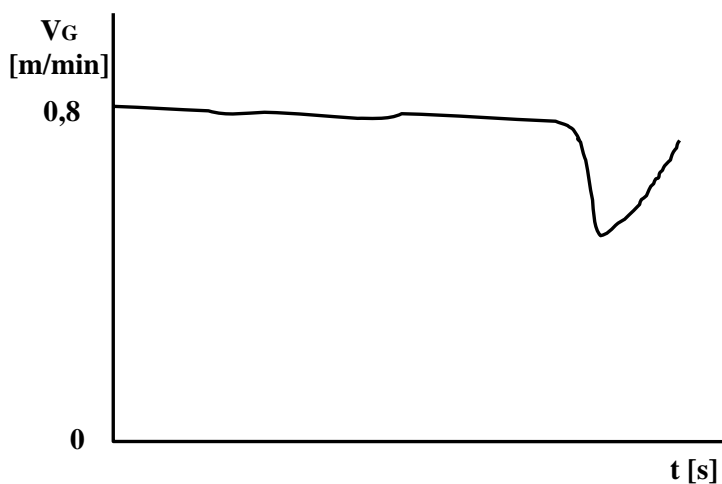


Bild 10.23: Gießgeschwindigkeitsänderung bei Veränderung der Temperaturen zweier Thermoelemente

Bild 10.22 zeigt einen typischen Temperaturverlauf für einen Kleber. Das bestehende Temperatur-überwachungssystem reagierte mit einer rampenförmigen Reduktion der Gießgeschwindigkeit von 0,8 auf 0,3 m/min. Der hier dargestellte Verlauf der Gießgeschwindigkeit entspricht im wesentlichen dem Verlauf des Referenzsystems. Da hierbei keine Veränderung der Reibkraft vorhanden war, kann momentan kein wesentlicher Vorteil gegenüber dem Referenzsystem herausgestellt werden.

Änderung der Reibkraft

In Bild 10.24 ist der Anstieg der Reibkraft ohne Beteiligung der Temperatur dargestellt. Nach dem Erreichen eines Spitzenwertes klingt die Reibkraft relativ schnell auf das Normalniveau

ab. Die Ursache dieses Reibkraftanstieges konnte nicht ermittelt werden. Durch das installierte Temperaturüberwachungssystem wurden keine Gegenmaßnahmen eingeleitet, da die Reibkraftehöhung ohne Temperaturerhöhung erfolgte.

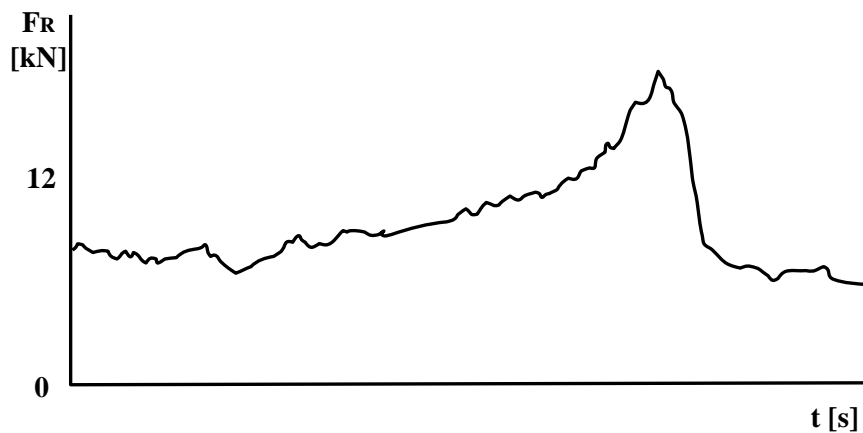


Bild 10.24: Veränderung der Reibkraft ohne Temperaturbeteiligung

Während durch das Temperaturüberwachungssystem infolge fehlender Temperaturänderungen keine korrektiven Massnahmen initiiert wurden, sind in Bild 10.25 die Gegenmassnahmen der Reibkraftüberwachung in Form von Gießgeschwindigkeitsreduktionen bis zum Umkehrpunkt und anschließender Beschleunigung auf die ursprüngliche Gießgeschwindigkeit dargestellt. Obwohl die hier dargestellte Reibkraftehöhung keine prozesstechnischen Folgen wie das Reißen der Strangschale oder einen Durchbruch zur Folge hatte, stellt die Erhöhung der Reibung zwischen Strangschale und Kokille ein erhebliches Gefahrenpotenzial für die Prozesssicherheit dar.



Bild 10.25: Änderung der Gießgeschwindigkeit infolge von Reibkraftänderungen

Kombinierte Temperatur- und Reibkraftänderung

Die Kombination der Änderung von Reibung und Temperatur wurde relativ häufig beobachtet. In der Regel ist anfänglich ein Ansteigen der Reibkraft zu beobachten, wonach anschließend ein Kleberalarm durch das Ansteigen der Temperaturen generiert wird, der zu einer Absenkung der Gießgeschwindigkeit führt. Bild 10.26 zeigt die Reibkraftentwicklung sowie die Gießgeschwindigkeit V_{G1} , die infolge der in Bild 10.27 dargestellten Temperaturentwicklung mit Klebererkennung von 0.8 auf 0.3 m/min heruntergefahren wurde. Eine Reduktion der Gießgeschwindigkeit wird erst nach einem Kleberalarm eingeleitet. Die vorhergehende Veränderung der Reibkraft bleibt unberücksichtigt. Demgegenüber steht das reibungssensitive System, das

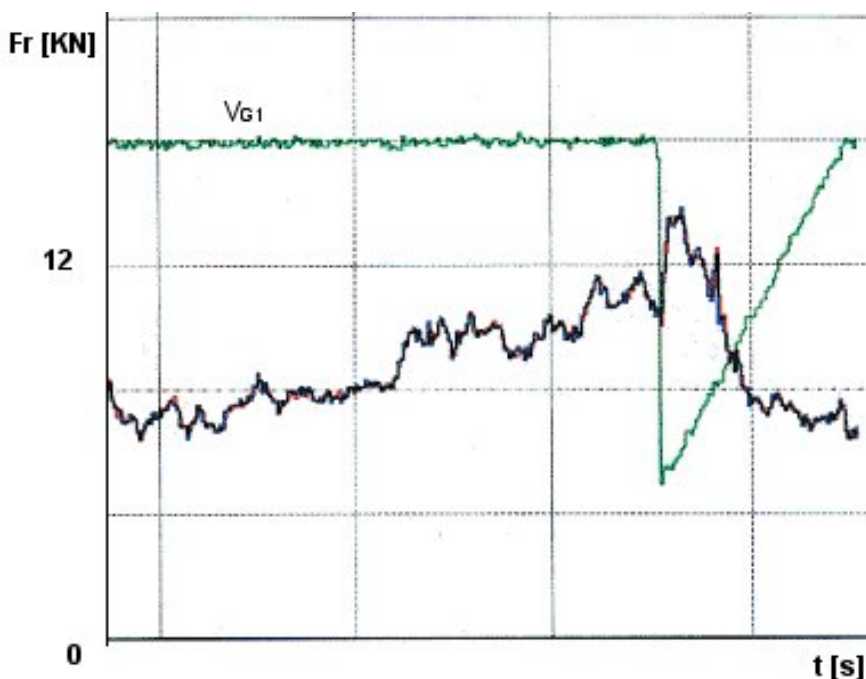


Bild 10.26: Änderung der Reibkraft und Gießgeschwindigkeit

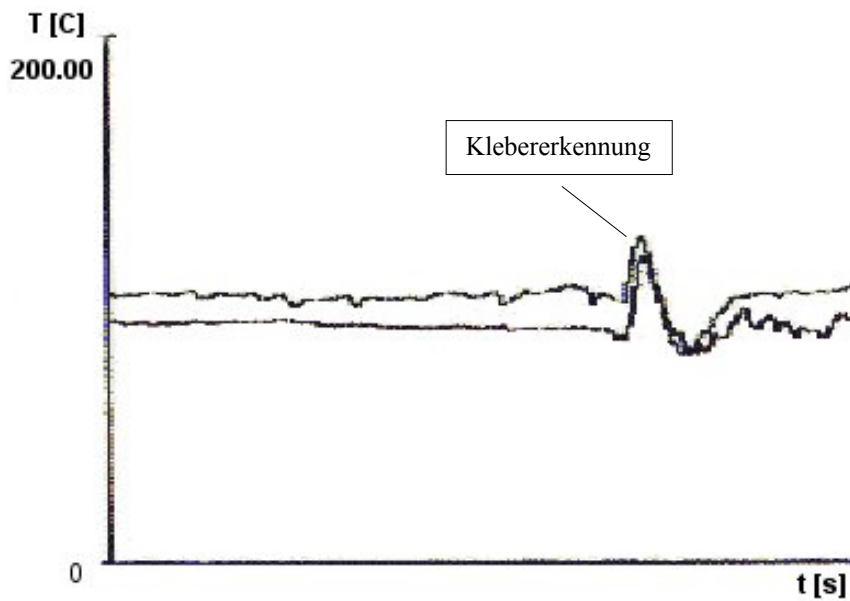


Bild 10.27: Temperaturanstieg mit Klebererkennung

wie in Bild 10.28 dargestellt, deutlich vor der Klebererkennung eine Absenkung der Gießgeschwindigkeit erzwingt und somit ein weiteres Ansteigen der Reibkraft verhindert was wiederum zur Vermeidung des Klebers führt. Bild 10.28 zeigt weiterhin eine drastische Reduktion der Gießgeschwindigkeit nach dem Auftreten eines Klebers. Dies ist durch die Verknüpfung der Reibungs- und Temperaturüberwachung in dem zweiten Systementwurf begründet.

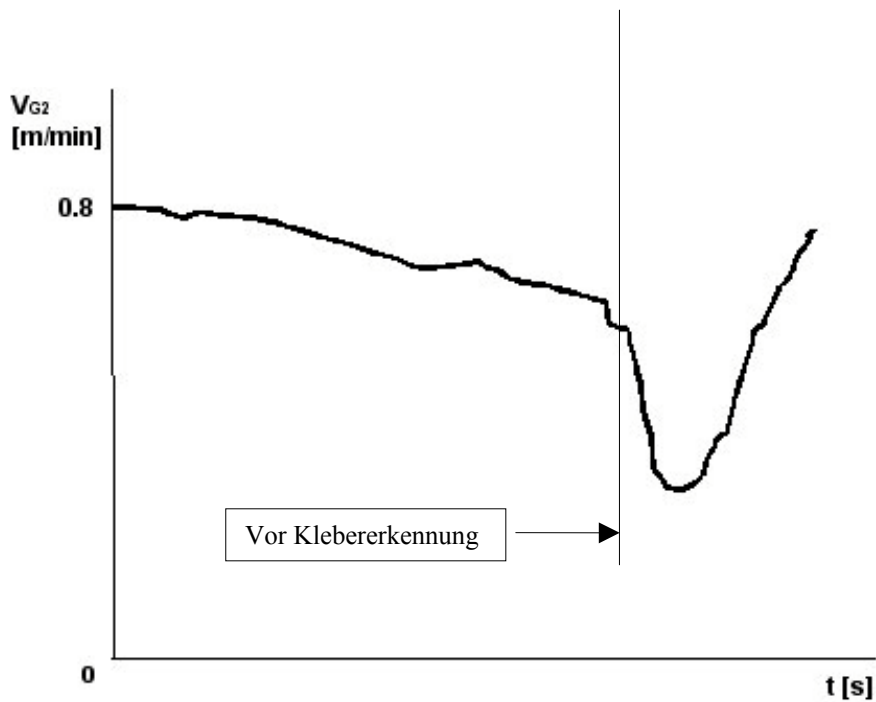


Bild 10.28: Gießgeschwindigkeit bei Reibkraftänderung und Temperaturerhöhung

Die Vermeidung von Klebern mittels Reibkraftüberwachung stellt eines der vordringlichsten Ziele bei der Einführung eines neuen Monitoring Systems dar. Abgesehen von der Vermeidung drastischer Reduktionen der Gießgeschwindigkeit und der damit verbundenen Reduktion des Materialausstosses wird durch die Vermeidung von Klebern die Abqualifizierung des Brammenabschnittes, dem ein Kleber zuzuordnen war, vermieden.

Reibkraftanstieg bei negativer Schmalseitenverstellung

Als Beispiel für die prozessparameterabhängige Überwachung beim Auftreten eines Gießereignisses sei der Reibkraftanstieg bei negativer Schmalseitenverstellung dargestellt. Die linke Seite des Bildes 10.29 zeigt den Reibkraftverlauf infolge der negativen Schmalseitenverstellung und die Gießgeschwindigkeit VG1. Die rechte Seite zeigt die Gießgeschwindigkeit, berechnet durch das Monitoring System, das durch die Prozessparameter ausschliesslich die Temperaturinformationen zur Überwachung des Gießereignisses *Negative Schmalseitenverstellung* verwendet. Aufgrund des unauffälligen Temperaturverlaufes der Thermoelemente (hier exemplarisch an einer Temperaturmessstelle dargestellt) bleibt die Gießgeschwindigkeit folgerichtig unverändert.

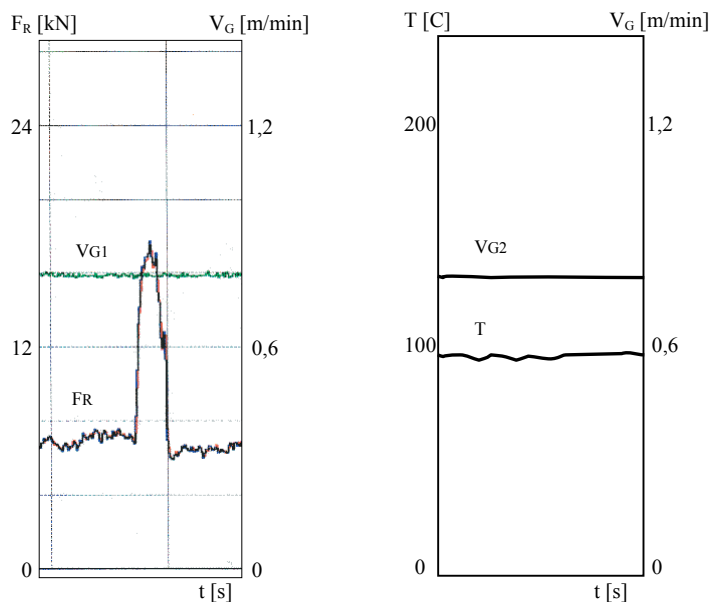


Bild 10.29: Reibkraft- und Temperaturverlauf bei einer negativen Breitenverstellung

Dieses Beispiel zeigt, wie die Reibkraft- und die Temperaturüberwachung in Abhängigkeit vom aktuellen Prozesszustand selektiv genutzt werden können und somit neben der Verbesserung der Prozesssicherheit auch das Risiko von Fehlalarmauslösungen minimieren.

Hysterese Monitoring

Während der Untersuchungen in der Stranggießanlage traten keine nennenswerten Defekte an der Mechanik der Kokille auf. Daher wurde die Funktionalität des Hysterese Monitorings anhand der Daten des Prüfstandes beurteilt. Hierzu wurden Referenzhysteresen unter verschiedenen Betriebsbedingungen wie Kokillenhub, Frequenz sowie Reibungsamplitude (hier durch den hydraulischen Anpressdruck der Bremsscheibe dargestellt), ermittelt. Es wurden ausschliesslich Referenzhysteresen verwendet, die den fehlerfreien Anlagenzustand repräsentieren, da dies den realen Einsatzbedingungen entspricht.

In Bild 10.30 werden exemplarisch drei Hysteresen dargestellt. Ein Beispiel einer Referenzhysterese (blaue Hysterese) repräsentiert folgenden Betriebszustand: Hub = 1 mm, Frequenz = 100 min⁻¹, Anpressdruck 0 bar. Das erste Eingangsmuster (grüne Hysterese) wurde unter den Betriebsbedingungen: Hub = 1 mm, Frequenz = 100 min⁻¹, Anpressdruck 20 bar ermittelt. Aufgrund der Normierung der Antriebskräfte und des Hubes ist der Einfluß der Reibkraftherhöhung auf die Klassifizierung gering. Das zweite Eingangsmuster (rote Hysterese) repräsentiert den Anlagenzustand bei Lose im Antriebsstrang und den Betriebsparametern: Hub = 1 mm, Frequenz = 100 min⁻¹, Anpressdruck 10 bar.

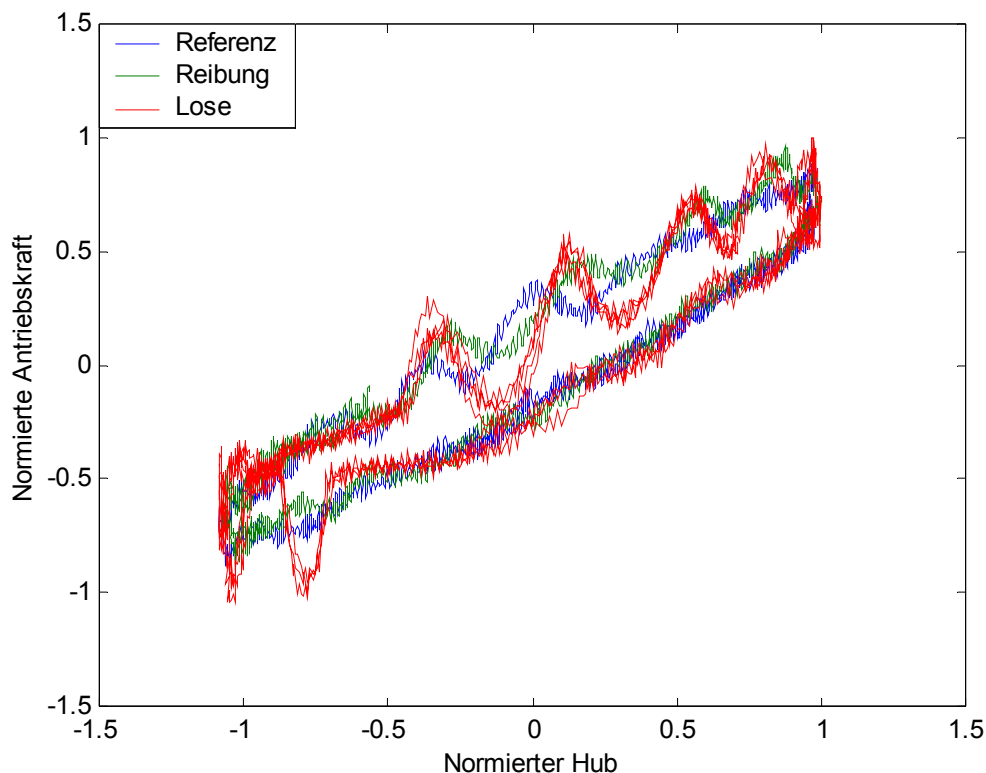


Bild 10.30: Hysteresen

Werden die beiden Eingangsmuster dem trainierten PNN präsentiert, so liefert es folgende Ausgaben:

- | | | |
|-------------------|------------------------------|---|
| 1. Eingangsmuster | outcomp ¹ = (2,1) | 1 |
| 2. Eingangsmuster | outcomp = (6,1) | 1 |

Das erste Eingangsmuster wird somit der Referenzhysterese mit der Referenznummer 2 und das zweite Eingangsmuster der Referenzhysterese mit der Referenznummer 6 zugeordnet. Die Hysterese mit der Referenznummer 6 stellt die Referenzhysterese für einen Betriebspunkt mit den Parametern Hub = 2 mm, Frequenz = 300 min⁻¹, Anpressdruck 10 bar dar und klassifiziert damit das Eingangsmuster 2 als fehlerfreien Anlagenzustand.

Diese Fehlklassifikation ist durch die Funktionalität des PNN, bzw. des zweiten Layers des PNN begründet. Das Eingabemuster wird dem Trainingsmuster zugeordnet, dessen Zugehörigkeit am wahrscheinlichsten ist. Da keine Muster trainiert wurden, die den fehlerbehafteten Zustand darstellen, wird das Eingangsmuster mit einem beliebigen Trainingsmuster in Zusammenhang gebracht, das die höchste Wahrscheinlichkeit aufweist.

Eine Lösung für das Problem kann durch die ausschließliche Verwendung des Ergebnisses des ersten Layers (Radial Basis Layer) des PNN gefunden werden. Die Eingaben der Muster ergeben folgende Ausgabevektoren des Radial Basis Layer:

- | | |
|-------------------|--|
| 1. Eingangsmuster | a = [0.7561, 0.9258 , 0.8286,, n] |
| 2. Eingangsmuster | a = [0.4417, 0.4318, 0.3034, 0.4069, 0.2944, 0.4523,, n] |

mit n = Anzahl der Referenzhysteresen.

Entsprechend der Klassifikation des ersten Eingangsmusters stellt die zweite Referenzhysterese den Klassifikationssieger dar, da es sich bei der zweiten Vektorkomponente des Ausgabevektors um den maximalen Betrag aller Vektorkomponenten handelt.

Vergleicht man den Ausgabevektor des zweiten Eingangsmusters (Fehlerzustand Lose) mit

¹ Notation: outcomp = (Referenzhysterese,Spaltenindex), 1 = (Klassifikationssieger), 0 = Klassifikationsverlierer

dem Ausgabevektor des ersten Musters (fehlerfreier Zustand), so fallen zunächst die betragsmässig kleineren Vektorkomponenten des zweiten Ausgabevektors auf, die durch die fehlende Übereinstimmung zwischen der Hysterese, die den Fehlerzustand *Lose* darstellt, und den Referenzhysteresen, die den fehlerfreien Zustand beschreiben, begründet sind. Durch die Festlegung eines Grenzwertes für die Beträge der Vektorkomponenten, der in Verbindung mit der Einstellung des Bias gewählt wird, können Hysteresen identifiziert werden, die von den Referenzhysteresen, die den fehlerfreien Anlagenzustand beschreiben, abweichen und damit wie im vorliegenden Fall der Systemlose einen fehlerhaften Zustand detektieren.

Es konnte gezeigt werden, dass durch die ausschließliche Verwendung des Radial Basis Layers in Verbindung mit der Definition eines Grenzwertes eine Klassifikation von Eingangsmustern, die von den Referenzmustern abweichen, möglich ist. Muster von Hysteresekurven, die einen fehlerbehafteten Zustand darstellen, können ebenso als Referenzhysteresen in das System eingepflegt werden und so zu einer Verbesserung der Klassifikationssicherheit beitragen.

Durch das in diesem Kapitel vorgestellte Hysterese Monitoring wurde ein Verfahren entwickelt, das zur Überwachung der Mechanik der Kokille genutzt werden kann. Im Betrieb werden nach einer Setup - Phase, die der Erfassung der Referenzhysteresen dient, durch das System Alarmmeldungen generiert, die dem Anlagenbetreiber Hinweise auf Störungen bzw. Defekte in der Kokillenmechanik liefern. Die prinzipielle Übertragbarkeit auf eine Brammenkokille, d.h. auf eine durch zwei Hydraulikzylinder angetriebene Kokille, ist gegeben. Die Erprobung des Verfahrens an einer solchen Kokille ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

11 Zusammenfassung

Das Stranggießen stellt heute das bedeutendste Verfahren zum Abgießen von Stahl dar. Die hierbei realisierten Gießgeschwindigkeiten sowie die hohen Qualitätsanforderungen an das Endprodukt erfordern eine kontinuierliche Überwachung des Gießprozesses. Hierbei steht besonders die Kokille als formgebendes Element einer Stranggießanlage im Vordergrund. Neben dem Temperaturprofil der Schmal- und Breitseiten der Kokille stellen die Reibungsverhältnisse zwischen der Strangschale und der Kokille einen weiteren prozessrelevanten Parameter dar, der einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität des Endproduktes und die Prozesssicherheit darstellt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung einer Kokillenüberwachung die auf der Erfassung der Reibungsverhältnisse zwischen Strang und Kokille basiert. Während der Arbeiten wurde die Zielstellung durch die Forderung nach der Überwachbarkeit weiterer mechanischer und verfahrenstechnischer Parameter wie z.B. Lose im Antriebsstrang erweitert. Einen weiteren wesentlichen Aspekt der Arbeit stellt die Implementierung der Temperaturinformationen in das Überwachungssystem dar. Neben der Nutzung redundanter Informationen aus der Temperaturüberwachung besteht der wesentliche Vorteil in der Zusammenführung beider Systeme und der daraus entstehenden Synergieeffekte.

Durch die Entwicklung einer hydraulisch angetriebenen blattfedergelagerten Kokille mit integrierter Sensorik der Mannesmann Demag AG wurden die Voraussetzungen für die Entwicklung eines Systems geschaffen, das die Reibungsverhältnisse zwischen Strang und Kokille überwacht und keine zusätzliche Sensorik benötigt.

Anhand von Prüfstandversuchen wurden verschiedene Ansätze zur Erfassung der Reibkraft bewertet. Die hierbei durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das Hystereseverfahren, das den Flächeninhalt der durch die Antriebskraft und den Hub aufgespannten Hysterese als Reibungsäquivalent nutzt, die gestellten Anforderungen an die quantitative Darstellung der Reibungsverhältnisse erfüllt und darüber hinaus als Indikator für weitere Anlagenfehler wie z.B. Lose im Antriebsstrang genutzt werden kann. Das Verfahren wurde unter der Bezeichnung *Verfahren zur Ermittlung von Kenndaten eines Oszillationssystems einer oszillierenden Stranggusskokille* unter der Nummer: 02719905.8-2122-EP0201926 zum EU - Patent angemeldet.

In der anschließend durchgeführten Feldstudie in einer Stranggießanlage wurden die Veränderungen der Reibkraft, die mittels Hystereseauswertung gewonnen wurde, unter den unterschiedlichsten Prozessparametern untersucht. Neben den Reibkraftänderungen bei störungsfreiem Gießbetrieb sind besonders die Gießereignisse wie das Angießen, die Schmalseitenverstellung, die Gießgeschwindigkeitsveränderung sowie das Gießende von Interesse. Durch die Integration des installierten Temperaturüberwachungssystem in die Untersuchungen konnte der Reibkraftverlauf vor und während des Auftretens von Klebern, die eine Verletzung der Strangschale mit austretendem Flüssigstahl darstellen, ermittelt werden.

Die nicht zu vernachlässigende Abhängigkeit der Reibkraft von dem verwendeten Gießpulver ist ein weiteres Ergebnis der Feldstudie.

Zur Anlage eines repräsentativen Datenstammes von Reibkraftverläufen wurde ein Datenlogger programmiert und in der Stranggießanlage installiert. Die mittels Trennverstärker erfassten relevanten Messdaten wurden in einem Ringspeicher erfasst und können durch Datenfernübertragung abgerufen werden.

Der auf diese Weise generierte Datenstamm bildet die Grundlage des ersten Systementwurfes für ein kombiniertes Reibkraft / Temperatur - Überwachungssystem für hydraulisch angetriebene blattfedergelagerte Kokillen. Hierbei wurde das vom Anlagenbetreiber verwendete Regelgerüst zur Beurteilung der Kokillenwandtemperaturen in einen durch die Reibkraft und deren zeitlichen Ableitungen ergänzten Fuzzy – Klassifikator eingearbeitet. Neben der Generierung von Alarmmeldungen wird die Gießgeschwindigkeit als korrekativer Prozessparameter durch das System berechnet. Durch den Vergleich ausgewählter Messgrößen der beiden installierten Hydraulikzylinder einer Brammenkokille können Fehler in der Mechanik detektiert werden. Die integrierte Datenbank ermöglicht die Erstellung von Trendanalysen sowie die Optimierung von Prozessparametern.

Die Konfiguration des Fuzzy – Inferenz - Systems bzw. die Berechnung der Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt durch das sog. neuro – adaptive Lernen aus den Trainingsdatensätzen. In einem anschließenden Feldversuch wurde die Funktionalität des Systems beurteilt. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse wurden in einem zweiten verbesserten Systementwurf umgesetzt. Die wesentlichen Optimierungen des ersten Systementwurfes

bestehen in einer getrennten und prozessgesteuerten Abarbeitung der Temperatur- und Reibkraftdaten sowie der anschließenden Zusammenführung der Klassifikationsergebnisse der Teilsysteme.

Die Entwicklung eines Neuro – Klassifikators, der radiale Basisfunktionen als Aktivierungsfunktionen verwendet, ermöglicht die Überwachung der mechanischen Komponenten von Blockkokillen, die nur durch einen Hydraulikzylinder angetrieben werden. Durch den Vergleich von aktuellen Hysteresekurven und gespeicherten Referenzkurven mit Hilfe des Neuro – Klassifikators können Fehler in der Mechanik erkannt werden.

Das in dieser Arbeit entwickelte System zur Überwachung von hydraulisch angetriebenen blattfedergelagerten Kokillen stellt durch die Zusammenführung von Temperatur- und Reibkraftdaten, die durch das Hystereseverfahren gewonnen wurden, eine deutliche Verbesserung der Detektionsempfindlichkeit und –geschwindigkeit gegenüber rein temperaturbasierten Systemen dar. Wie in der Validierungsphase des zweiten Systems dargestellt, können Kleber durch die Einbindung der Reibkraft frühzeitig vor ihrer Entstehung vermieden und somit die Prozesssicherheit erhöht werden. Die quantitative Auswirkung auf die Produktivitätssteigerung einer Stranggießanlage muss in zukünftigen Langzeitstudien ermittelt werden.

12 Nomenklatur

$F_{R, \text{viskos}}$	viskose Reibkraft
η	Viskositätskoeffizient
A	benetzte Fläche
v_{rel}	relative Geschwindigkeit zwischen Strang und Kokille
z	Schmierfilmdicke.
$F_{R, \text{coulomb}}$	Reibkraft durch Festkörperreibung
F_N	Normalkraft
μ	Gleitreibungskoeffizient
sign	Vorzeichenfunktion.
F_{Antrieb}	Antriebskraft
Δp	Differenzdruck der Zylinderkammern
A_{Kolben}	Kolbenfläche
$s(t)$	Wegfunktion
$\ddot{s}(t)$	Beschleunigungsfunktion
C	Federkonstante
G	Erdbeschleunigung
m	oszillierende Masse
$\Delta s_{\text{statisch}}$	statische Durchsenkung der Kokille.
F_{Reibung}	Gesamtreibung
F_S	innere Systemreibung
F_R	äußere Reibung
W_D	Dämpfungsarbeit
\underline{A}	Systemmatrix
\underline{B}	Systemmatrix
\underline{L}	Rückführmatrix
$\hat{\underline{x}}$	Zustandsvektor des Streckenmodells
\underline{x}	Zustandsvektor des Strecke
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Eigenfrequenz
$H(\omega)$	Übertragungsfunktion
ζ	Dämpfungs konstante
ω/ω_0	dimensionsloser Frequenzquotient

γ	hysteretischer Dämpfungsfaktor
Y	vorverarbeiteter Messwert
$d(w, Y)$	euklidischer Abstand
$\mu_{Eh}(x)$	Zugehörigkeitsfunktion
A_v	Asymmetrie der Kokillenbewegung
$V_{asymmax}$	Kokillengeschwindigkeit im Abwärtshub
V_{symmax}	Kokillengeschwindigkeit bei einer Sinusbewegung
T_N	Temperatur des N – ten Thermoelementes
$E(W)$	Fehlerfunktion
Δw_{ij}	Variation der Gewichte
η	Lernfaktor
$radbas(n)$	Transfer Funktion eines Radial Basis Neuron
$outcomp$	Ausgang eines PNN

13 Literaturverzeichnis

- [Ada95] Adamy J.: *Breakout Prediction for Continuous Casting by Fuzzy Mealy Automation*, Eufit 1995, S. 754 – 759
- [Ban92] Bangemann T.: *Beitrag zur Gestaltung der Überwachung, Diagnostizierung und Prozesssicherung automatisierter Fertigungsanlagen*, TU Magdeburg, Dissertation
- [Boe94] Böcher G., Göhler U., Hoffmann U., Schmidt O. A., von Wyl H.: *Operational experience with a resonance mould for continuous casting of slabs*, Metec Congress 1994, 2nd European Continuous Casting Conference, pp 141-147, Düsseldorf, 1994
- [Dae89] Daelen R.M.: *DP-Nr.51217*, 1889
- [Dem98] Demuth H., Beale M.: *Neural Network Toolbox User's Guide*, The MathWorks, Inc.1998
- [Föl92] Föllinger O.: *Regelungstechnik*, Hüthig Verlag, 1992
- [Fra94] Frank P.M.: *Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik*, *Automatisierungstechnik* 42 1994
- [Hac00] Hackstein H.: *Condition Monitoring using neural networks*, <http://www.bkvibro.com/db/files/fileaea7443815d.pdf>
- [Ise94a] Isermann R.: *Überwachung und Fehlerdiagnose. Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen*, VDI 1994
- [Ise94b] Isermann R.: *Moderne Methoden der Überwachung und Fehlerdiagnose: Eine Übersicht*. In [Ise94a]
- [Ise96] Isermann R.: *Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose Technischer Systeme (Teil I)* *Automatisierungstechnische Praxis (ATP)* 38 (5) 1996

- [Jac88] Jackisch W.: *Vorrichtung zur Überwachung der Schwingungen einer Stranggießanlage*, Offenlegungsschrift DE363233 Al Bundesdruckerei 1988
- [Jun 38] Junghans S.: *US – Patent Nr. 2135*, 1938
- [Kem91] Kemper, G.M.: *Beitrag zur Reibung zwischen Strang und Kokille beim Knüppelstrangguß von Stahl*, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, RWTH Aachen, Dissertation 1991
- [Kem93] Kemper G.M., Förster E., Gudenau H.W., Strecken K.: *Reibungskräfte zwischen Strang und Kokille beim Knüppelstranggießen von Stahl mit Kokillenölschmierung*, Stahl und Eisen 113, 1993
- [Kem01] Kempf R., Adamy J.: *Rekurrente Fuzzy – Systeme*, Thema Forschung 2001, Technische Universität Darmstadt, S. 90 – 94
- [Kle98] Klein U.: *Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen*, Stahleisen 1998
- [Kol86] Kolerus J.: *Zustandsüberwachung von Maschinen*, Expert – Verlag 1986
- [Li02] Li Y., Pont M.J., Jones N.B.: *Improving the performance of radial basis function classifiers in condition monitoring and fault diagnosis applications where ‘unknown’ faults may occur*, Pattern Recognition Letters 23, S. 569 - 577
- [Liu96] Liu T.I.; Singonahalli J.H.; Iyer N.R.: *Detection of roller bearing defects using expert system and fuzzy logic*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 10, Number 5, September 1996, pp. 595-614(20)
- [Lül93] Lülfi G.: *Ein Beitrag zur Erfassung und Bewertung von Reibungsvorgängen mit Hilfe von Beschleunigungsmessungen*, Fachbereich Maschinenbau, Universität Duisburg, Dissertation 1993

- [Mai77] Mairy B.: *Verfahren zur Steuerung des Stranggießens von Metallen*, Patentanmeldung vom 28.9.1977, P 27 43 579 C2
- [Mai99] Mairy B., Ramelot D., Dauby P.: *Überwachung der Schmierung in der Kokille beim Stranggießen von Stahl*, Stahl und Eisen 99, Nr. 14, 1979, S. 737 – 745
- [Man94] Mannesmann Demag: *Demag-Resonanzkokillen moderner Bauart*, 1994
- [Man94a] Mannesmann Demag Hüttentechnik: *Reibkraftermittlung in einer Stranggießkokille*, Interner Vortrag, Duisburg 1994
- [Mit93] Mitchell, J.S.: *Introduction to machinery analysis and monitoring*, Penn Well, 1993
- [Pau00] Paul U.: *Klassifikation und Bewertung von Prozeßzuständen in der Kokille von Brammenstranggießanlagen*, 17. Sitzung des Duisburger Arbeitskreises für Mathematik in Praxis und Forschung 2000
- [Pen94] Penman J., Yin C.M.: *Feasibility of using unsupervised learning, artificial neural networks for the condition monitoring of electrical machines*, IEE Proceedings - Electric Power Applications –November 1994 - Volume 141, Issue 6, p. 317-322
- [Per91] Perkuhn M.: *Einsatz fortschrittlicher Verfahren zur Zustandsüberwachung beim Stranggießen von Stahl*, Fachbereich Elektrotechnik, Universität Duisburg, Dissertation 1991
- [Pet96] Peters H.: *Anwendung künstlicher neuronaler Netze in Überwachungssystemen*, Automatisierungstechnische Praxis (ATP) 38 (11) (1996)
- [Pfe02] Pfeiffer B., Jäkel J., Kroll A., Kuhn C., Kuntze H., Lehmann U., Slawinski T., Tews V.: *Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control*, at 10/2002, S. 461 – 471

- [Rig96] Rigoll G.: *Mustererkennung I*, Fachgebiet Technische Informatik, Universität Duisburg, Manuskript zur Vorlesung WS 1995/96
- [Sax05] Saxena A., Saad A.: *Evolving an Artificial Neural Network Classifier for Condition Monitoring of Rotating Mechanical Systems*, International Journal of Applied Soft Computing, Elsevier Publishers, ISSN: 1568-4946
- [Sch87] Schrewe H.: *Stranggießen von Stahl*, Stahleisen, Düsseldorf 1987
- [Sch96] Schubert A., Strackeljan J., Behr D.: *Ein neues Konzept zur vorbeugenden Maschinenüberwachung mittels Fuzzy – Logik*, AFN Berichte 1996, Universität Magdeburg S. 47 - 54
- [Sch92] Schwerdtfeger K.: *Metallurgie des Stranggießens*, Stahleisen, Düsseldorf 1992
- [Sms02] Fest T., Schwarz M., Wyl von H., Weissbuch F.: *Verfahren zur Ermittlung von Kenndaten eines Oszillationssystems einer oszillierenden Stranggießkokille*, Europäische Patentschrift, Anmelde-Nr.: 02719905.8-2122-EP0201926
- [Sto99] Stockmanns G.: *Wavelet-Analyse zur Detektion von Zustandsänderungen*. Dissertation 1999, Gerhard-Mercator-Universität – GH Duisburg, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 17, Nr. 202, Düsseldorf, VDI, 2000
- [Str99] Strackeljan J.: *Wälzlagerdiagnose mit einem Handgerät*, AFN Berichte 1999 Universität Magdeburg
- [Stu90] Sturm A., Förster R.: *Maschinen und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung*, Teubner 1990
- [Ter00] Tervo J., Mustonen M., Korhonen R.: *Intelligent Techniques for Condition Monitoring of Rolling Mill*, ESIT 2000, Proceeding, Aachen
- [Wei94] Weissbuch F., Schwarz M.: *Machine monitoring on No. 4 wire mill at Thyssen Stahl*, Wireworld 4/1994

- [Wei95] Weissbuch F., Schwarz M.: *Maschinenzustandsüberwachung an der Drahtstrasse der Walzdraht Hochfeld GmbH*, Verlag Stahleisen mbH Düsseldorf, Stahl und Eisen 8/95
- [Wei98] Weissbuch F., *Teleservice in der Praxis. Vorteile – Potentiale – Anwendungen*, Thema Wirtschaft, Zeitschrift der Niederrheinischen Industrie und Handelskammer Duisburg, 5/1998
- [Wyl92] Wyl von H.: *Resonanzkokillen für das Stranggießen von Stahl*, Interner Bericht Mannesmann Demag Hüttentechnik-Metallurgie, Duisburg 1992
- [Wyl98] Wyl von H., Schumacher H., *Sticker Detection and Breakout Prevention*, VDEH – Ausschusssitzung, Dünkirchen 1998
- [Zav84] Zaveri K., Phil M., *Modal Analysis of Large Structures*, Bruel & Kjaer 1984
- [Zel94] Zell A.: *Simulation Neuronaler Netze*, Addison – Wesley 1994

14 Lebenslauf

02.07.1965	geboren in Duisburg als Sohn von Heinz und Gisela Weissbuch
08/1971 – 07/1975	Grundschule, Dinslaken Hiesfeld
08/1975 – 05/1984	Theodor Heuss Gymnasium, Dinslaken
05/1984 – 10/1984	Werksstudent bei der Signode GmbH, Dinslaken
10/1984 – 03/1991	Studium an der Universität Duisburg Studiengang: Allgemeiner Maschinenbau Abschluss: Diplom – Ingenieur
03/1989 – 08/1991	Studentische Hilfskraft im Fachgebiet Konstruktionslehre und Antriebstechnik der Universität Duisburg
08/1991 – 04/1998	Entwicklungsingenieur am Institut für Mechatronik, Moers
05/1998 – 12/2000	Leiter des Geschäftsbereiches Mess- und Automatisierungstechnik am Institut für Mechatronik, Moers
01/2001 – 03/2005	Verantwortlicher Entwicklungsingenieur für die Mess- und Systemtechnik bei der T-ZfP GbR, Gladbeck
seit 04/2005	Selbstständiger Ingenieur
04/1983 – 10/1991	Technisches Hilfswerk, Dinslaken
Familienstand	verheiratet, ein Kind