## IV Verfahren zur rechnergestützten Erkennung von Drahtbrüchen in Drahtseilen an Schrägaufzügen von Hochöfen

# IV.1 Derzeitiger Stand der rechnergestützten Drahtbrucherkennung aus magnetinduktiven Streuflußprüfungen

Die magnetinduktive Streuflußprüfung von Drahtseilen wird bereits seit geraumer Zeit zur Erkennung von äußeren und inneren Drahtbrüchen eingesetzt. Dabei zeigt sich aber noch immer eine große Diskrepanz zwischen der theoretischen Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens und den praktischen Erfahrungen mit solchen Prüfungen. Fehlinterpretationen der Meßergebnisse lassen die Skepsis gegenüber der betrieblichen Einsatzfähigkeit dieses Verfahrens nicht abnehmen.

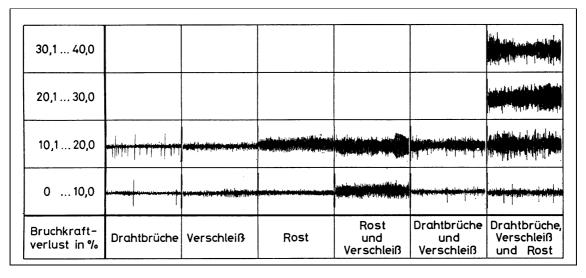


Abbildung IV. 1

Signalformen verschiedener Seilschäden [11]

Magnetinduktive Seilprüfgeräte sind heute in der Regel noch mit analogen Aufzeichnungsgeräten ausgestattet: Die in den Spulen induzierte Spannung wird verstärkt, nach Gl. 12 geschwindigkeitskompensiert und anschließend über einen Schreiber auf Papierstreifen ausgegeben. Der Papiervorschub ist dabei proportional zum Seilweg. Eine weitere Speicherung der Meßergebnisse erfolgt nicht. Die darauf aufbauende Auswertung der Meßergebnisse besteht aus dem Vergleich mit vorangegangenen Messungen und der Untersuchung, ob im Signalverlauf bekannte Signalmuster auftreten, die durch Seilschäden hervorgerufen werden. In der Literatur finden sich

hierzu entsprechende Vergleichsmuster (Abbildung IV. 1). Von einem neu aufgelegten Seil wird daher nach einer definierten Einlaufphase immer eine Nullmessung aufgezeichnet, die den Signalverlauf des noch ungeschädigten, jedoch schon gereckten Seils dokumentiert.

Diese Auswertung bedarf eines erfahrenen Inspekteurs, der in vielen Messungen für sich einen Zusammenhang zwischen auftretenden Signalformen und vorliegenden Seilschadensbildern gebildet hat. Notwendig ist es dazu, nach durchgeführten Messungen bisweilen Seilproben zu öffnen, um die vorliegenden Schäden mit der Messung abgleichen zu können. Für Schachtförderung im Bergbau und Seilbahnen sind diese Erfahrungswerte aufgrund jahrelanger Untersuchungen gesammelt worden. Hierzu lassen sich auch in der Literatur zahlreiche Beschreibungen finden [3, 4, 5, 6, 11].

Aufgrund unterschiedlicher Schadensmechanismen und Seilkonstruktion sind die an einem Seiltrieb gewonnenen Erfahrungswerte allerdings nicht allgemein gültig.

Das am weitesten verbreitetste und einfachste rechnergestützte Verfahren zur Erkennung von drahtbruchverursachten Signalformen wertet ausschließlich die Amplitude des lokalen Minimums nach Abbildung II. 6 aus. Diese ist in den Streufeldmessungen aufgrund ihrer Größe in der Regel deutlich erkennbar, vor allem beim Vorliegen äußerer Drahtbrüche und geringem Rauschen. Das Verfahren ordnet einen Amplitudenpeak des Signalverlaufes bei Überschreitung eines definierten Grenzwertes einem Drahtbruch zu.

Das Verfahren arbeitet zufriedenstellend bei einem ausreichend großem Abstand zwischen Rauschpegel und Pegel der gesuchten Signalmuster. Amplituden in der Größenordnung des Rauschpegels können keinen Drahtbrüchen zugeordnet werden, so daß eine untere Erkennungsgrenze gegeben ist. Mit zunehmender Aufliegezeit der Seile und der damit verbundenen fortschreitenden Schädigung durch Verschleiß, Korrosion und innere Reibung liegen die durch innere Drahtbrüche hervorgerufenen Signalmuster sehr bald unterhalb dieser Grenze und werden durch das Verfahren nicht mehr erkannt.

Signifikante Amplitudenpeaks müssen zudem nicht unbedingt mit einem Drahtbruch in Verbindung gebracht werden. Auch lokal verstärktes Rauschen, Drahtbruchhäufungen in einer eventuell vorhandenen Stahlseele oder elektrische Störungen können zur Ausbildung eines lokalen Extremums mit entsprechender Amplitude im Si-

gnalverlauf führen. Eine Unterscheidung der Ursache für einen Signalpeak ermöglicht das Grenzwertüberschreitungsverfahren nicht.

Feyrer [4] und Briem [5] beschreiben das Grenzwertüberschreitungsverfahren für den Einsatz an Seilbahnen. Briem gibt dazu verschiedene Methoden zur Ermittlung des Grenzwertes an. Darüber hinaus beschreibt er abgewandelte Verfahren, die nach der Registrierung eines Amplitudenpeaks weitere Untersuchungen durchführen, um die Wertung des Peaks als drahtbruchverursacht abzusichern.

Strodl und Waas [6] stellen eine Kombination des Grenzwertüberschreitungsverfahrens mit einer anschließenden Ermittlung des Querschnittverlustes nach Kurz [7] vor. Einsatzgebiet sind auch hier Seilbahnen und Schlepplifte.

In einem 1998 erschienenen Forschungsbericht der Europäischen Kommission [8] wird ein Auswerteverfahren beschrieben, das mittels neuronaler Netze im Signalverlauf drahtbruchverursachte Signalmuster identifiziert. Einsatzgebiet soll eine automatische Zustandsüberwachung von Kranseilen sein.

## IV.2 Verfahren zur rechnergestützten Drahtbrucherkennung aus magnetinduktiven Streuflußmessungen

Das Problem bisheriger rechnergestützter Drahtbrucherkennungsverfahren ist die im Vergleich zur visuellen Beurteilung von Streufeldmessungen ungenügende Treffsicherheit. Grund dafür ist die derzeit geringe Komplexität der Signaluntersuchung zur Identifizierung eines durch einen Drahtbruch hervorgerufenen Streufeldes. Komplexere Verfahren, wie beispielsweise modifizierte Grenzwertüberschreitungsverfahren [5], lassen sich nur bei relativ niedrigem Rauschpegel der induzierten Spannung, also bei Seilen mit geringer Aufliegezeit bzw. bei vollverschlossenen Seilen, anwenden. Auch dürfen Korrosion und Verschleiß nur im geringen Maße vorliegen. Nimmt der Störpegel zu, liefert nur noch das sehr einfache und unzulängliche Grenzwertüberschreitungsverfahren bis zu einem gewissen Abstand zwischen Rauschpegel und Nutzsignal brauchbare Ergebnisse.

Es besteht daher die Notwendigkeit, ein Drahtbrucherkennungsverfahren zu entwikkeln, das in der Lage ist, auch bei zunehmendem Störpegel eine komplexe Untersuchung der durch magnetische Streufelder hervorgerufenen in den Meßspulen induzierten Spannungen durchzuführen. Dabei ist es hilfreich nachzuvollziehen, wie ein Inspekteur drahtbruchverursachte Signalmuster bei der visuellen Auswertung der Meßschriebe erkennt: Zunächst sind für ihn auffällige, d.h. in der Regel aus dem Rauschpegel herausragende Amplitudenpeaks interessant. Daran schließt sich eine Beurteilung der Signalformen im Bereich um diese erhöhten Amplitudenpeaks an. Er vergleicht die vorliegende Aufzeichnung mit ihm bekannten drahtbruchverursachten Signalformen und entscheidet daraufhin, ob ein Drahtbruch vorliegt. Dabei ist er in Grenzen auch in der Lage, anhand der Signalform innere und äußere Drahtbrüche zu unterscheiden sowie sogar eine Aussage über den Bruchendenabstand zu machen.

Eine rechnergestützte Drahtbrucherkennung kann diese Vorgehensweise in Gestalt einer Musterklassifikation nachbilden. Als Muster wird hierbei eine definierte Signalfolge aus dem gesamten Signalverlauf bezeichnet. Entsprechend der Vorgehensweise eines Inspekteurs arbeitet die Musterklassifikation mit vorgegebenen Ergebnisklassen, die durch Referenzmuster repräsentiert werden. Als Ergebnisklassen werden die zu identifizierenden Seilschäden definiert, also beispielsweise äußere oder innere Drahtbrüche einer bestimmten Ausprägung. Daneben ist es aber auch denkbar, andere Seilschäden, die charakteristische magnetische Streufelder erzeugen, als Ergebnisklassen zu definieren. Die zugehörigen Referenzmuster geben die erwartete, charakteristische Signalform der induzierten Spannung wieder.

Die Zuordnung einer Signalfolge zu einer Ergebnisklasse erfolgt durch zahlenmäßigen Vergleich definierter Kennwerte.

Eine Musterklassifikation kann verständlicherweise nur solche Schäden erkennen, die als Ergebnisklasse mit Referenzmuster vorgegeben sind. Daher ist es notwendig, eine entsprechend ausreichende Zahl von Ergebnisklassen und Referenzmustern zu definieren.

#### IV.2.1 Entwicklung der Referenzmuster

Als Ergebnisklassen für eine Musterklassifikation werden in erster Linie Drahtbrucharten definiert. Die Erscheinungsform eines drahtbruchverursachten Signalverlaufs kann nach **II.2** deutlich variieren. Es ist daher notwendig, für jede Erscheinungsform eine eigene Ergebnisklasse mit zugehörigem Referenzmuster festzulegen.

Nach II.2 lassen sich drei verschiedene Erscheinungsformen unterscheiden. Aus diesen sind die benötigten Referenzmuster ableitbar. Aufgrund dessen, daß die bei-

den Teilsignale des Signalmusters 1 (Abbildung II. 10) sich unabhängig von der genauen Größe des Bruchendenabstandes ausbilden, ist eine Trennung in zwei eigenständige Muster sinnvoll.

Man erhält als mögliche Referenzmuster damit die vier Grundmuster (Abbildung II. 10):

- 1. Drahtbruch mit großem Bruchendenabstand linkes Teilsignal Grundmuster 1A
- 2. Drahtbruch mit großem Bruchendenabstand rechtes Teilsignal Grundmuster 1B
- 3. Drahtbruch mit mittlerem Bruchendenabstand Grundmuster 2
- 4. Drahtbruch mit geringem Bruchendenabstand Grundmuster 3

Neben der Unterscheidung nach diesen vier Grundmustern, die sich aufgrund der Größe des Bruchendenabstandes herausbilden, werden die Referenzmuster betragsmäßig durch die Tiefenlage des Bruches (Exzentrizität zur Seillängsachse) und den Drahtquerschnitt bei gegebenem Seilprüfgerät beeinflußt.

Um eine rechnergestützte Verarbeitung der Referenzmuster zu ermöglichen, ist eine Beschreibung jedes Musters durch Kennwerte notwendig. Diese werden aus charakteristischen Punkten jedes Musters und deren Lage zueinander gewonnen. Es bieten sich dazu die lokalen Extrema und Wendepunkte der Signalverläufe an (Tabelle IV. 1, Tabelle IV. 2, Tabelle IV. 3).

Die am zu untersuchenden Seiltrieb am häufigsten auftretenden äußeren Drahtbrüche haben einen Bruchendenabstand *b*<*5mm* (s. **II.2.2**). Somit überwiegt das Grundmusters 3.

Aufgrund der Reibung im Seilverband sind die auftretenden Bruchendenabstände von inneren Brüchen in den meisten Fällen noch geringer als die der äußeren. Da zudem mit zunehmender Tiefenlage der Bruchstelle der Übergang von Grundmuster 2 auf Grundmuster 3 bereits bei größeren Bruchendenabständen erfolgt, verursachen innere Drahtbrüche ausschließlich Signalformen entsprechend Grundmuster 3 [1].

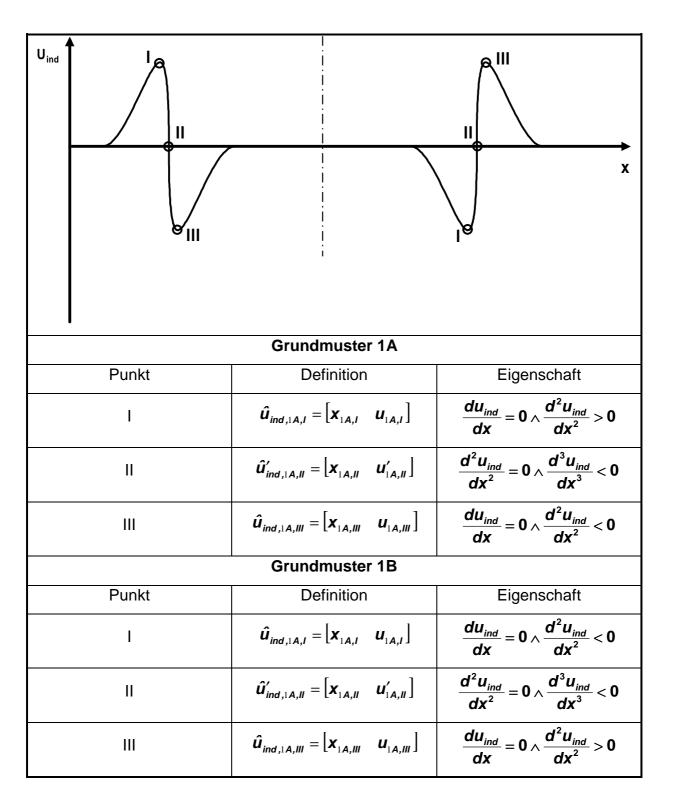


Tabelle IV. 1

Definition der charakteristischen Punkte der Grundmuster 1A und 1B gemäß Abbildung II. 10

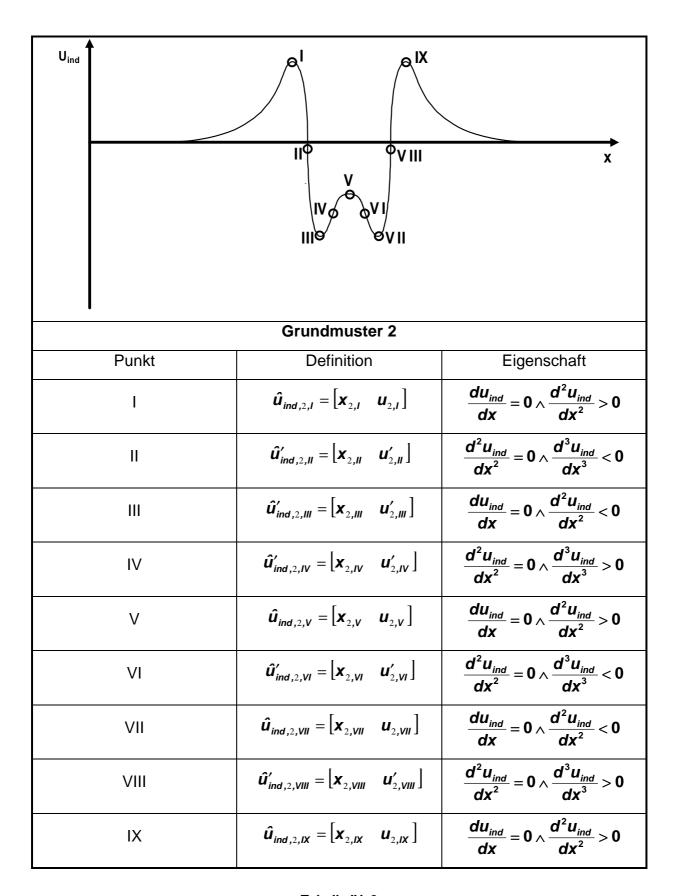


Tabelle IV. 2

Definition der charakteristischen Punkte des Grundmusters 2 gemäß Abbildung II. 10

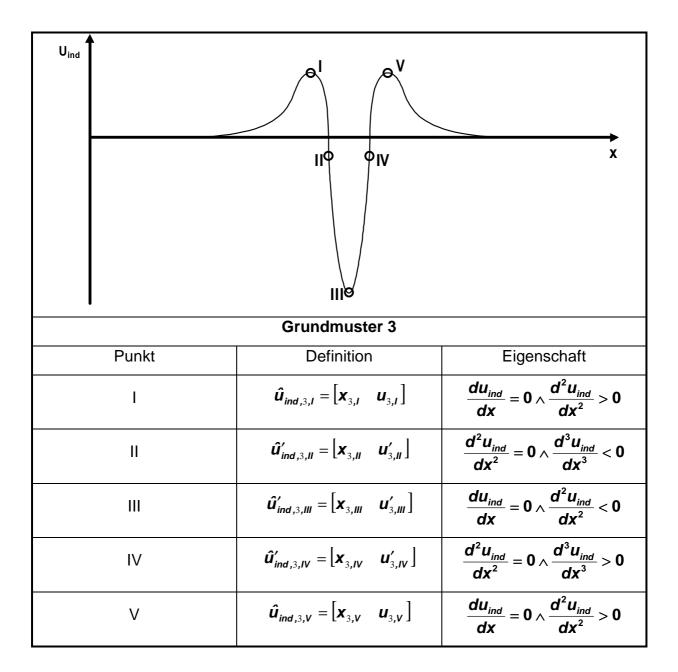


Tabelle IV. 3

Definition der charakteristischen Punkte des Grundmusters 3 gemäß Abbildung II. 10

Aufbauend auf den charakteristischen Punkten des Grundmusters 3 nach Tabelle IV. 3 lassen sich folgende Kennwerte definieren (Tabelle IV. 4):

Kennwert A – maximale Amplitude: Das auffälligste Merkmal eines drahtbruchverursachten Signalmusters des Typs "Grundmuster 3" ist der Betrag des negativen Amplitudenpeaks. Er hebt sich in der Regel deutlich vom Rauschpegel ab und ist daher ein sehr verbreitetes Kriterium zur Erkennung drahtbruchverursachter Signalmuster [5].

- Kennwerte α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub> maximaler Signalabfall, maximaler Signalanstieg: Charakteristisch für eine Signalform des Grundmusters 3 sind neben der Amplitude des negativen Signalpeaks auch die sehr steile Signalflanken. Die Beträge der Extrema der ersten Ableitung der induzierten Spannung vor und nach dem lokalen Minimum beschreiben diese Eigenschaft.
- Kennwert Δx Signalbreite über Maxima: Die Signalbreite ist ein wichtiges Kriterium zur Unterscheidung der Signalverläufe innerer und äußerer Drahtbrüche, aber auch zur Abgrenzung gegenüber dem Rauschen. Dieses Kriterium wird bereits bei einfachen rechnergestützten Drahtbrucherkennungsverfahren verwendet [5].
- Kennwert  $A_z$  bzw.  $A_v$  Amplitude des Maximums: Der Betrag der Amplitude der beiden Maxima unterscheidet sich oftmals nicht signifikant vom Rauschpegel. Er ist daher kein sehr sicheres Kriterium zur Abgrenzung drahtbruchverursachter Signalmuster gegenüber dem Rauschen.
- Kennwerte  $\Delta x_z/\Delta x_v$ ,  $\alpha_1/\alpha_2$ ,  $A_z/A_v Symmetrie$ : Auffälliges Merkmal des Grundmusters 3 ist seine Symmetrie. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Eigenschaft werden zu seiner Beschreibung drei Kennwerte definiert. Sie bilden die Symmetrie des Signalverlaufes zur durch das lokale Minimum gelegten Abzisse ( $\Delta x_z/\Delta x_v$ ), die Symmetrie des negativen Amplitudenpeaks ( $\alpha_1/\alpha_2$ ) und die Symmetrie beider Maxima ( $A_z/A_v$ ) ab.
- Kennwert A<sub>bez</sub> Bezogene maximale Amplitude: Für einen Inspekteur sind in erster Linie negative Signalpeaks, deren Amplitude deutlich aus dem Rauschen herausragen, ein Indiz für drahtbruchverursachte Streufelder. Dieses Kriterium wird durch den absoluten Betrag des Minimums (Kennwert A) jedoch nicht ausreichend beschrieben, da der Rauschpegel unberücksichtigt bleibt. Daher ist es sinnvoll, die auf den Rauschpegel bezogene maximale Amplitude A<sub>bez</sub> einzuführen. Dazu ist die maximale Amplitude A durch einen, das Grundrauschen charakterisierenden Kennwert zu dividieren.

Briem [5] nennt als Kenngröße des Grundrauschens den Effektivwert der aufgezeichneten induzierten Spannung nach:

$$u_{ind,eff} = \sqrt{\frac{1}{n_{MeRpunkte}} \cdot \sum_{i=1}^{n} u_{ind,i}^2}$$
 Gl. 18

Dieser Effektivwert wird seilabschnittsweise berechnet, um Veränderungen im Grundrauschen zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist es notwendig, den Einfluß drahtbruchverursachter Amplituden zu unterdrücken. Dazu muß im betrachteten Seilabschnitt ein gleitender Effektivwert der induzierten Spannung über eine kleinere Seillänge berechnet werden. Der Minimalwert dieses gleitenden Effektivwertes wird als Größe des Rauschpegels des gesamten betrachteten Seilabschnitts gesetzt (Gl. 19).

$$u_{ind,eff,min} = min \left( \sqrt{\frac{1}{n_{j+1} - n_{j}} \cdot \sum_{i=1+n_{j}}^{n_{j+1}} u_{ind,i}^{2}} \right), j = 1,...,I$$
 Gl. 19

mit: 
$$n_{j+1} - n_j = const.$$

Mit der Definition von  $A_{bez}$  wird nicht die Signalform an sich beschrieben, sondern der Tatsache Rechnung getragen, daß die Erkennungsquote von Drahtbrüchen auch bei komplexen Analyseverfahren mit  $A_{bez} \rightarrow 1$  abnimmt. Ein reales Signalmuster des Typs Grundmuster 3 muß somit einen Mindestbetrag an  $A_{bez}$  aufweisen, um als drahtbruchverursacht erkannt werden zu können.

Bei einfachen rechnergestützten Drahtbrucherkennungsverfahren nimmt dieser Mindestbetrag Werte >3 an [5].

Mit den aufgeführten Kennwerten läßt sich eine ausreichende Beschreibung des Grundmusters 3 vornehmen. Da jedoch die Eignung zur Erkennung drahtbruchverursachter Signalmuster für jeden einzelnen Kennwert abhängig vom konkreten Schädigungsproblem und ihren Einfluß auf die Ausbildung der Signalmuster ist, muß für einen konkreten Einsatzfall eine sinnvolle Auswahl aus diesen neun Kennwerten getroffen werden.

<u>Nr.</u>	Kennwert	Kurz	<u>Definition</u>
1	max. Amplitude	А	u <sub>3,III</sub>
2	max. Signalabfall	$\alpha_1$	u' <sub>3,II</sub>
3	max. Signalanstieg	$\alpha_2$	u' <sub>3,IV</sub>
4	Signalbreite über Maxima	Δχ	$X_{3,V}-X_{3,I}$
5	Amplitude des Maximums	A <sub>z</sub> oder A <sub>v</sub>	$u_{3,l}$ oder $u_{3,v}$
6	Symmetrie 1	$\Delta x_z/\Delta x_v$	$\ln \left  \frac{x_{3,V} - x_{3,III}}{x_{3,III} - x_{3,I}} \right $
7	Symmetrie 2	$\alpha_1/\alpha_2$	$\ln \left  \frac{u_{3,ll}'}{u_{3,lV}'} \right $
8	Symmetrie 3	A <sub>z</sub> /A <sub>v</sub>	$\ln \left  \frac{u_{3,V}}{u_{3,I}} \right $
9	Bezogene maximale Amplitude	A <sub>bez</sub>	$A_{bez} = \frac{u_{3,III}}{u_{eff,min}}$

Tabelle IV. 4

Kennwerte zur Beschreibung des Grundmusters 3

#### IV.2.2 Betragsmäßige Ermittlung der Kennwerte der Referenzmuster

Durch die Definition der die Signalmuster beschreibenden Kennwerte wird der Vergleich realer Muster mit den Referenzmustern auf einen Vergleich der Kennwerte reduziert. Dazu sind zunächst die Kennwerte der Referenzmuster betragsmäßig zu ermitteln. Dies stößt auf die Schwierigkeit, daß das ideale Referenzmuster in aufgezeichneten Meßdaten nicht existiert. Vielmehr ist jeder reale Signalverlauf mehr oder weniger durch das überlagerte Rauschen verzerrt. Es besteht also zunächst die Aufgabe, Signalmuster zu gewinnen, bei denen diese Verzerrungen unterdrückt sind. Dazu bestehen zwei mögliche Vorgehensweisen:

1. Durch eine Simulation der Drahtbrüche an einem Probekörper erhält man nahezu ideale Signale ohne Überlagerung mit Rauschanteilen aus dem Seil. Diese Si-

- gnalmuster sind unabhängig vom Seiltyp und Schädigungsproblem und versprechen daher eine allgemeingültige Anwendung (s. IV.2.2.1).
- 2. Bei einer statistischen Auswertung realer Drahtbrüche kann der Rauschpegel berücksichtigt werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die statistischen Daten anlagenbezogen zu gewinnen und sich daraus ergebende schädigungsspezifische Variationen des Referenzmusters zu berücksichtigen. Die so gewonnenen Daten sind nur im Rahmen der Auswertung am betreffenden Seiltrieb bzw. an ähnlichen Seiltrieben gültig (s. IV.2.2.2).

## IV.2.2.1 Betragsmäßige Ermittlung der Kennwerte mittels Probekörper

Die betragsmäßige Gewinnung allgemeingültiger Kennwerte für die Referenzmuster durch Simulation des Seilschadens erfordert die Variation aller Parameter, die auf das sich ausbildende Streufeld Einfluß nehmen. Die Ausführung solcher Simulationen an realen Seilen sind daher kaum möglich. Hierzu bieten sich jedoch bereits in der Literatur beschriebene Ersatzprüfkörper:

- 1. Das Stangenbündel nach Grupe [3]
- 2. Der nichtmagnetische Träger nach Kurz [7].

#### IV.2.2.1.1 Das Stangenbündel

Das Stangenbündel (Abbildung IV. 2) entspricht in seinem Aufbau, insbesondere hinsichtlich des metallischen Querschnitts, näherungsweise einem realen Seil. Es besteht aus einem Bündel paralleler Drähte, in dem simulierte Drahtbrüche durch Austausch eines Drahtes gegen zwei Drahtstücke gebildet werden können. Damit ist die Einstellung und Kontrolle der Parameter zwar möglich, aber sehr aufwendig, da Parameteränderungen jeweils einen mehr oder minder vollständigen Neuaufbau des gesamten Bündels erfordern.

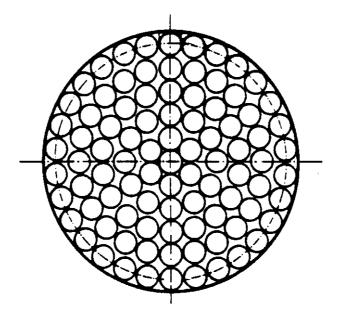


Abbildung IV. 2

Querschnitt durch ein Stangenbündel [3]

## IV.2.2.1.2 Der nichtmagnetische Träger

Besser als das Stangenbündel ist der nichtmagnetische Träger für die Variation der Parameter geeignet. Er besteht aus einem Trägerkörper, dessen Werkstoff das magnetische Streufeld von zu simulierenden Drahtbrüchen nicht beeinflußt. Auf ihn werden zwei Drahtstücke in Längsrichtung so aufgebracht, daß sie einen Drahtbruch nachbilden (Abbildung IV. 3). Alle Parameter können durch einfaches Austauschen oder Verschieben der Drahtstücke variiert und kontrolliert werden. Der metallische Querschnitt des nichtmagnetischen Trägers mit Drahtenden ist zwar wesentlich kleiner als der eines realen Seils, doch kann der Unterschied nach Kurz [7] vernachlässigt werden, da die magnetinduktiven Drahtseilprüfgeräte im Bereich der Sättigung des Drahtwerkstoffes arbeiten.

Kurz [7] gewinnt mittels dieses Prüfkörpers bei Verwendung eines Seilprüfgerätes mit zwei Spulengruppen betragsmäßig Kennwerte für die Grundmuster 2 und 3 in Abhängigkeit von den Bruchparametern und verwendet diese für eine quantitative Analyse von aufgezeichneten Streuflußmessungen. Die Übereinstimmung der am Probekörper ermittelten Ergebnisse mit denen, die an realen Drahtbrüchen gemessen wurden, ist so deutlich, daß er die Bruchparameter realer Drahtbrüche aus den

Streuflußmessungen rekonstruieren kann. Die Abweichung der rekonstruierten Bruchparameter von den tatsächlichen liegt dabei unter vier Prozent [7]!

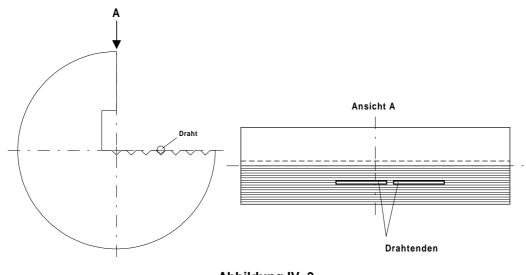


Abbildung IV. 3

Nichtmagnetischer Träger [1]

Darauf aufbauend hat Schulz [1] entsprechende Kurvenverläufe für das im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehende Prüfgerät, ausgerüstet mit zwei Halbspulen (Abbildung II. 15), aufgenommen und mit Daten realer Drahtbrüche verglichen. Der Vergleich der Kennwerte realer Drahtbrüche von Seilproben unterschiedlichen Störpegels mit den am Probekörper gewonnen Werten zeigt dabei im Gegensatz zu den durch Kurz [7] erarbeiteten Ergebnissen eine völlig unzureichende Übereinstimmung. Einzig die Abweichungen des Kennwertes A (Tabelle IV. 4) liegt in allen Fällen ≤9%. Die Übereinstimmung der restlichen Kennwerte fällt deutlich schlechter aus [1]. Dies resultiert aus dem Einfluß des Rauschpegels. Reduziert man das Rauschen um den periodischen Signalanteil der Litzenfrequenz, d.b. um den aus dem Seilaufbau

den periodischen Signalanteil der Litzenfrequenz, d.h. um den aus dem Seilaufbau resultierenden Anteil, so ist der Grad der Übereinstimmung der Kennwerte realer Drahtbrüche mit denen am Prüfkörper ermittelten bereits höher, jedoch für eine Rekonstruktion der Bruchparameter aus Streuflußmessungen noch nicht ausreichend [1].

Die Ursache für diese deutlichen Abweichungen ist ausschließlich im Rauschpegel der Messungen an realen Seilen zu sehen. Bereits ein geringer Rauschpegel erreicht eine Größenordnung, die der Amplitude der beiden lokalen Maxima von Grundmusters 3 bei äußeren Drahtbrüchen entspricht [1].

Der Einfluß des überlagerten Rauschens ist somit nicht vernachlässigbar und die Verwendung der am Prüfkörper ermittelten idealer Werte für eine Drahtbrucherkennung daher nicht möglich!

## IV.2.2.2 Betragsmäßige Ermittlung anlagenbezogener Kennwerte

Anlagenbezogene Kennwerte für die Referenzmuster lassen sich nur an realen Seilen gewinnen. Dazu ist die Untersuchung einer ausreichenden Anzahl Messungen von Seilproben mit drahtbruchverursachten Signalmustern erforderlich. Die Identifizierung der Signalmuster erfolgt nach Vergleich der Messung mit den entsprechenden geöffneten Seilabschnitten und Zuordnung der gefundenen Schäden.

Nach Auswertung der Seilproben steht für jedes Referenzmuster eine Stichprobe realer Signalmuster zur Verfügung. Mittels statistischer Verfahren lassen sich daraus für jeden Kennwert Erwartungswert und Streuung der Normalverteilung ermitteln. Eine Normalverteilung der gemessenen Beträge der Kennwerte sei dabei unterstellt. Diese anlagenbezogenen Daten der Kennwerte berücksichtigen nicht nur den vorliegenden Rauschpegel sondern auch alle weiteren Störeinflüsse auf die Messungen, wie beispielsweise Schwankungen in der Zentrierung des Seilprüfgerätes zur Seillängsachse. Anlagenbezogene Kennwerte sollten daher möglichst immer aus unterschiedlichen Messungen gebildet werden, um diese Störeinflüsse zu erfassen.

## IV.2.3 Entwicklung der Signalmuster aus Streuflußmessungen

Zum Vergleich mit den definierten Referenzmustern ist der gemessene Signalverlauf in einzelne Signalmuster zu unterteilen. Die Unterteilung orientiert sich an den fünf charakteristischen Punkten des Grundmusters 3. Ausgehend von einem lokalen Minimum werden die vier weiteren Punkte gemäß Tabelle IV. 3 gesucht und zu einem Signalmuster zusammengefaßt. Gekennzeichnet ist die Lage jedes Signalmusters durch die Seilkoordinate des lokalen Minimums  $x_i$  (Abbildung IV. 4).

Bedingung für die Berücksichtigung als lokales Minimum bzw. lokales Maximum ist:

$$u_{3,III} < 0$$
 $u_{3,I} > 0$  Gl. 17
 $u_{3,V} > 0$ 

Mit dieser Forderung werden entsprechende Extrema, die durch Störungen bedingt sind, unterdrückt.

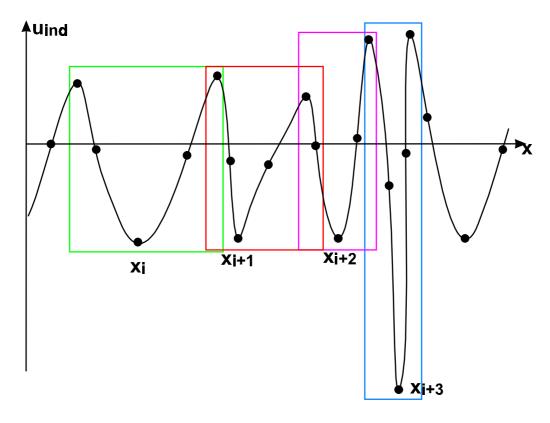
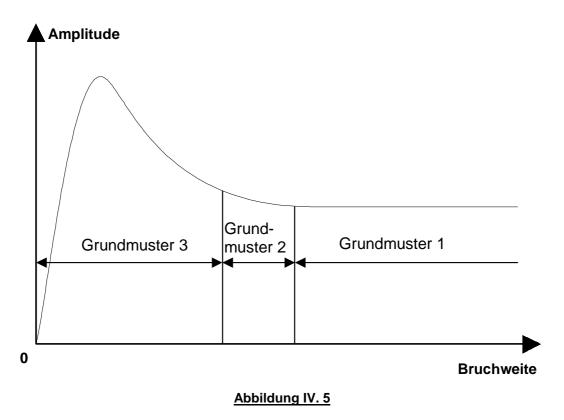


Abbildung IV. 4

Bildung der Muster aus einem Signalverlauf

Es stehen somit für eine Klassifizierung immer so viele Muster zur Verfügung, wie negative, lokale Minima im Signalverlauf vorhanden sind, abzüglich der beiden, eventuell unvollständigen Muster am Anfang und Ende der Meßdaten.

Den Mustern können gemäß Tabelle IV. 4 die definierten Kennwerte zugewiesen werden.



Einfluß des Bruchendenabstandes auf die Amplitude des lokalen Maximums der drei Grundmuster

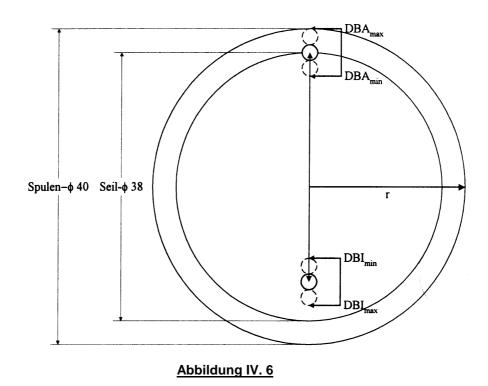
## IV.3 Musterklassifikation mittels Fuzzy-Logic

Die Schwierigkeit der rechnergestützten Erkennung von drahtbruchverursachten Signalmustern liegt in der Streuung der Kennwerte realer Signalmuster. Auf die Ausbildung eines drahtbruchverursachten Signalverlaufs nehmen drei Faktoren Einfluß:

- 1. Die Ausbildung des Streufeldes wird in erster Linie von den Bruchparametern bestimmt. Auch wenn üblicherweise das Grundmuster 3 die dominante Signalform ist, unterscheiden sich reale Signalmuster aufgrund unterschiedlicher Bruchendenabstände oftmals in ihrer Amplitudenhöhe (Abbildung IV. 5).
- 2. Das eigentliche Streufeld des Drahtbruches wird vom Rauschen überlagert (s. IV.2.2).
- 3. Die Änderung der Ausrichtung des Prüfgerätes zur Seillängsachse führt zu vermeintlichen Änderungen der Tiefenlage der Brüche im Seil. In II. ist eine zentrische Führung der Spulen um das Seil vorausgesetzt. Bei realen Messungen ist dies nicht zu gewährleisten. Da das Prüfgerät üblicherweise mittels einer Rollenführung auf dem Seil läuft, führen Durchmesseränderungen zu einer Exzentrizität der Meßspulen. Dies zieht somit Fehlinterpretationen der Tiefenlage der Drahtbrüche nach sich. Die Trennung zwischen inneren und äußeren

brüche nach sich. Die Trennung zwischen inneren und äußeren Drahtbrüchen verwischt sich (Abbildung IV. 6).

Eine Mustererkennung für Drahtbruchsignalmuster muß diese Streuungen tolerieren.



Auswirkung der exzentrischen Spulenführung auf die Lage äußerer und innerer Drahtbrüche [1]

Die bisher entwickelten rechnergestützten Drahtbrucherkennungsverfahren lassen sich als einfache Musterklassifikatoren auffassen, die nur eine geringe Anzahl Kennwerte auswerten. Verbreitet ist die Analyse der Amplitude A des Grundmusters 3 (s. Tabelle IV. 4) und die Verwendung einer Ergebnisklasse - der Klasse "Drahtbruch".

Die betragsmäßige Definition des Kennwertes dieses einzigen Referenzmusters bildet das einseitig offene Intervall  $[A_u; \infty]$ . Jedes Signalmuster, dessen Kennwert A die Bedingung  $A \ge A_u$  erfüllt, wird somit der Klasse "Drahtbruch" zugeordnet. Unterschreitet der Kennwert A die untere Grenze  $A_u$  nur um einen infinitesimalen Betrag dA, so wird das zugehörige Signalmuster nicht der Klasse "Drahtbruch" zugeordnet, obwohl diese Änderung dA sich auf die Gestalt des Signalmusters nur unmerklich auswirkt und daher von einem Inspekteur bei der visuellen Auswertung nicht wahrgenommen würde.

Eine sinnvolle Festlegung des Wertes  $A_u$  fällt aufgrund dieser scharfen Trennung verständlicherweise schwer. Beschriebene Vorgehensweisen [5] machen die untere

Grenze  $A_u$  interessanterweise ausschließlich von der Höhe des Rauschpegels abhängig und nicht von der erwarteten Amplitude drahtbruchverursachter Signalmuster. Damit wird zwar die Fehlklassifikation von Rauschsignalen verhindert, doch verschlechtert sich gleichzeitig die Treffsicherheit bezüglich der Erkennung drahtbruchverursachter Signalmuster.

Die Analyse des Inspekteurs unterscheidet sich von dieser Auswertemethodik grundsätzlich. Er berücksichtigt die Abweichungen von den erwarteten Kennwertebeträgen mittels einer graduellen Bewertung. So führen infinitesimale Differenzen nicht sofort zu einem Ausschluß aus einer Klasse, sondern zunächst nur zu einer geringeren Bewertung des Zugehörigkeitsgrades. Erst nach Analyse aller Kennwerte und der Ermittlung der graduellen Zugehörigkeitsgrade zur Klasse "Drahtbruch" und der Komplementärklasse "Kein Drahtbruch" erfolgt die endgültige Zuweisung zu einer der beiden Ergebnisklassen. Diese Auswerte- und Bewertungsmethodik sollte eine sinnvolle rechnergestützte Drahtbrucherkennung übernehmen. Als mathematische Grundlage bietet sich dafür Fuzzy-Logic an.

Fuzzy-Logic ist ein mathematisches Modell zur Nachbildung der menschlichen Logik. Sie arbeitet darum mit unscharfen Mengen und graduellen Zugehörigkeiten der Elemente zu diesen Mengen [19]. Ein Fuzzy-Musterklassifikator erhält als Eingänge scharfe Werte, verarbeitet sie mittels unscharfer Logik und liefert als Ausgänge graduelle Zugehörigkeitsgrade zu Ergebnisklassen bzw., wenn gewünscht, ein wiederum scharfes Ergebnis. In diesem Fall wird die Ergebnisklasse benannt, der die Eingangsdaten am besten entsprechen.

#### IV.3.1 Fuzzy-Musterklassifikator

Für den Entwurf eines Musterklassifikators mit Fuzzy-Logic bieten sich unterschiedliche Ansätze an. Der einfachste basiert auf der Übertragung eines Fuzzy-Regelalgorithmus auf das Klassifikationsproblem. Dieser Algorithmus gliedert sich in drei Teile:

- 1. Die *Fuzzyfizierung* übersetzt die vorliegenden, scharfen Kennwerte in für Fuzzy-Logic verständliche Zugehörigkeiten zu linguistischen Variablen.
- 2. Die *Inferenz* besteht aus der Regelbasis, dem Wissen des Entwicklers über das vorliegende Klassifikationsproblem. Hier werden durch logische Verknüpfungen

- die Eingangswerte mit den Ergebnisklassen verbunden. Durch definierte Operatoren erfolgt die Berechnung der Erfülltheitsgrade der Regeln.
- 3. In der *Defuzzyfizierung* erfolgt die Übersetzung der Erfülltheitsgrade in für den Anwender interpretierbare Zugehörigkeitsgrade zu den definierten Ergebnisklassen.

## IV.3.1.1 Fuzzyfizierung

<u>Klasse</u>	Bezeichnung	Beschreibung	<u>Grundmuster</u>
Klasse	DBA	Äußerer Drahtbruch mit geringem Bru-	Grundmuster 3
1		chendenabstand in der äußeren Drahtlage	
Klasse	DBI	Innerer Drahtbruch mit geringem Bruchen-	Grundmuster 3
2		denabstand in der äußeren Drahtlage	

<u>Tabelle IV. 5</u>

Ergebnisklassen für einen Musterklassifikator für Schrägaufzugseile

Die Ergebnisklassen des Klassifikators sind aufgrund der Abhängigkeit der erwarteten Signalmuster vom zu untersuchenden Seiltyp und Seiltrieb dem vorliegendem Schädigungsproblem anzupassen. Es bedarf also eines detaillierten Wissens über die zu erwartenden Seilbelastungen und die daraus resultierenden Seilschäden.

Nach **III** sind an Schrägaufzugseilen einzelne innere und äußere Drahtbrüche in den Außenlitzen zu erkennen. Der Bruchendenabstand ist dabei üblicherweise gering, so daß es ausreichend ist, zwei Ergebnisklassen, *DBA* und *DBI*, für die Drahtbrüche zu definieren (Tabelle IV. 5).

Drahtbrüche der Klasse 1 treten an den Kontaktstellen des Seils zu Seilscheiben und Trommeln auf, während Drahtbrüche der Klasse 2 durch Kontakt der Litzen untereinander bzw. der Litzen und der Seele verursacht werden. Drahtbrüche in den Litzen, d.h. in den inneren Drahtlagen, kommen in Abhängigkeit von der Belastung des Seils und den Umgebungsbedingungen am Einsatzort seltener vor, treten in Schrägaufzugseilen aber gehäuft im Seilbereich 1 auf (III. 1). Sie müßten gegebenenfalls durch eine dritte Klasse erfaßt werden.

Daneben ist es notwendig, Klassen zu definieren, die keine Drahtbrüche repräsentieren. Erst damit können die zu untersuchenden Signalmuster überhaupt auch als "Kein Drahtbruch" klassifiziert werden. Es gibt zwei Wege, solche Klassen zu bilden:

- 1. Analog zu den Drahtbruchklassen lassen sich ein oder mehrere Referenzmuster definieren, die typisches Rauschen repräsentieren.
- 2. Der "elegantere" Weg ist die Definition von Komplementärklassen zu den Drahtbruchklassen. Diese bilden keine eigenen Ergebnisklassen, sondern nur die fiktiven Klassen "Nicht-Klasse 1" usw., bzw. hier: *NOTDBA*, *NOTDBI*.

Zur Übertragung der Problemstellung in Fuzzy-Logic ist zunächst eine Transformation der Eingangs- und Ausgangsdaten in die Fuzzy-Linguistik notwendig, d.h. die Definition von linguistischen Variablen und linguistischen Termen.

Die Eingangskanäle werden durch linguistische Variablen benannt, die man mit KENNWERT 1 bis KENNWERT n bezeichnet. Jeder KENNWERT i, i=1,...,n, hat einen Wertebereich  $W_i$ , der durch die zu erwartenden Werte  $X_i$  des Eingangskanals i festgelegt ist. Diese Wertebereiche werden in linguistische Terme unterteilt, beispielsweise GROß, KLEIN oder allgemein: GRÖßE j, die in Verbindung mit der zugehörigen linguistischen Variablen unscharfe Mengen bezeichnen: KENNWERT i DER GRÖßE j. Die "unscharfe Menge" unterscheidet sich dabei von der Menge im Sinne der scharfen Logik dadurch, daß Elemente ihr nur teilweise angehören können. Der Übergang von "nicht Element von" zu "Element von" wird stetig und entspricht dadurch mehr dem menschlichen Empfinden.

Die Definition einer unscharfen Menge erfolgt durch Formulierung von Zugehörigkeitsfunktionen, die den Grad der Zugehörigkeit  $0 \le \mu_{ij} \le 1$  des Wertes  $X_i$  eines Eingangskanals i zur unscharfen Menge KENNWERT i DER GRÖßE j beschreiben:

$$\mu_{ij}(\boldsymbol{X}_i) = f_j(\boldsymbol{X}_i) \text{ mit } \mathbf{0} \le f_j(\boldsymbol{X}_i) \le \mathbf{1} \ \forall \boldsymbol{X}_i \in \boldsymbol{W}_i$$
 Gl. 18

Die Form der Funktion  $f(X_i)$  ist prinzipiell beliebig. Es ist aber sinnvoll, einen möglichst einfachen Funktionsverlauf zu wählen, um den Rechenaufwand gering zu halten. Übliche Funktionsverläufe sind die Dreieck- und Trapezfunktion (Abbildung IV. 10, Abbildung IV. 11) [18, 19]. Die Mengen an den Rändern des Wertebereiches  $W_i$ 

können als sogenannte Randmengen definiert werden (Abbildung IV. 10, Abbildung IV. 11):

Rechte Randmenge: 
$$\mu_{ij} = f_i(X_i)$$
 für:  $X_i \le X_i^*$ 

$$\mu_{ij} = 1$$
 für  $\boldsymbol{X}_i > \boldsymbol{X}_i^*$  Gl. 19a

Linke Randmenge: 
$$\mu_{ij} = f_j(X_i)$$
 für:  $X_i \ge X_i^*$ 

$$\mu_{ii} = 1$$
 für  $\boldsymbol{X}_i < \boldsymbol{X}_i^*$  Gl. 19b

Die Anzahl solcher unscharfer Mengen je Kennwert ist ebenfalls beliebig. Es ist aber zur Reduzierung des Rechenaufwandes sinnvoll, eine möglichst geringe Anzahl Mengen zu wählen. Diese Anzahl sollte ungerade sein, so daß neben Mengen, die "große" und "kleine" Werte repräsentieren, auch eine Menge existiert, die "mittlere" Werte umfaßt [18]. Um den gesamten Wertebereich lückenlos abzudecken, überschneiden sich die einzelnen Mengen.

Die Ausgänge des Fuzzy-Klassifikators werden ebenfalls mit linguistischen Variablen gekennzeichnet. Hier lassen sich die Begriffe Ergebnisklasse 1, Drahtbruchklasse 1 oder DBA, DBI definieren. Linguistische Terme werden nicht definiert, da die Ergebnisklassen keine weitere Unterteilung aufweisen.

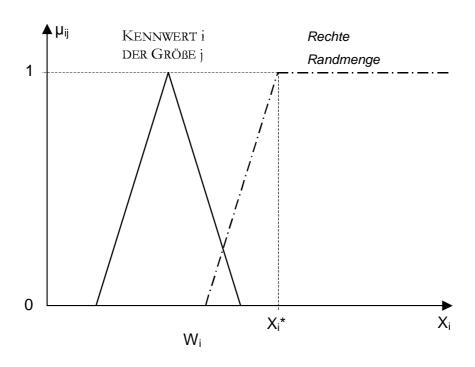


Abbildung IV. 7

Dreieckfunktion

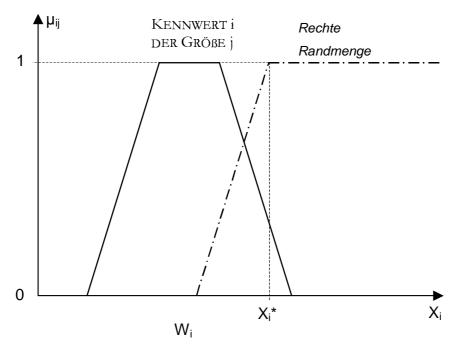


Abbildung IV. 8

Trapezfunktion

## IV.3.1.2 Fuzzy-Inferenz

Die Regelbasis umfaßt die logischen Verknüpfungen, die die Zusammenhänge zwischen den Ausgängen und den Eingängen beschreiben. Aufgebaut ist sie aus einem Block einzelner Regeln der Form:

R: WENN KENNWERT 1 DER GRÖßE j UND ... UND KENNWERT n DER GRÖßE m DANN Ergebnisklasse 1

Jede Regel enthält auf der "DANN"-Seite die zugehörige Ergebnisklasse. Auf der "WENN"-Seite stehen die linguistischen Terme, also unscharfe Mengen, denen die Kennwerte eines Eingangssignalmusters angehören müssen, um der Ergebnisklasse zugeordnet werden zu können.

Die einzelnen Terme auf der "WENN"-Seite sind daher mit logisch-UND verknüpft (Abbildung IV. 9). Können einer Ergebnisklasse mehrere linguistische Terme eines Kennwertes zugeordnet werden, so sind entsprechend viele Regeln aufzustellen, die miteinander logisch-ODER verknüpft sind.

Die Regeln der Komplementärklassen enthalten die Komplemente der einzelnen linguistischen Terme der entsprechenden Ergebnisklasse. Sie haben dann die Form:

R: WENN NICHT(KENNWERT 1 DER GRÖßE j) UND NICHT(...) ... UND NICHT(KENNWERT n DER GRÖßE m) DANN NICHT-ERGEBNISKLASSE l

Die Auswirkung der Definition der Zugehörigkeitsfunktionen für den Umfang der Regelbasis wird an der Form der einzelnen Regeln deutlich: Je weniger linguistische Terme eines Kennwertes einer Ergebnisklasse zugeordnet werden müssen, desto kleiner ist die Regelbasis. Dementsprechend geringer wird damit der spätere Rechenaufwand.

Eine entsprechend sinnvolle Definition der linguistischen Terme und ihrer Zugehörigkeitsfunktionen kann somit nur durch genaue Kenntnis der zu erwartenden Beträge der gewählten Kennwerte erfolgen. Diese Beträge sind nach **II.2** und **IV.2.2** von der Seilkonstruktion und dem Seilprüfgerät abhängig.

## IV.3.1.2.1 Rechnerische Behandlung der Regelbasis

Die linguistischen Terme KENNWERT i DER GRÖßE j werden für die rechnerische Behandlung der Regeln durch die Zugehörigkeit  $\mu_{ij}(X_i)$  zu dieser unscharfen Menge, beim entsprechenden Komplementärmuster durch die Zugehörigkeit  $1-\mu_{ij}(X_i)$ , ersetzt. Die logische Verknüpfung *UND* ist auf verschiedene Weise umsetzbar: Übliche Übersetzungen sind der Minimumoperator oder der Algebraic-Product-Operator [19]. Damit läßt sich der Erfülltheitsgrad einer Regel R errechnen nach:

$$E_R = \min \left[ \mu_{1j}, ..., \mu_{nk} \right]$$
 bei Verwendung des Minimumoperators Gl. 20

bzw.

$$E_R = \mu_{1j} \cdot ... \cdot \mu_{nk}$$
 bei Verwendung des Algebraic-Product-Operators GI.

und für die Komplementärmuster:

$$E_R = min[(1 - \mu_{1j}),...,(1 - \mu_{nk})]$$
 bei Verwendung des Minimumoperators GI. 22

bzw.

$$\boldsymbol{E}_{R} = \left(\mathbf{1} - \mu_{1j}\right) \cdot \dots \cdot \left(\mathbf{1} - \mu_{nk}\right)$$
 bei Verwendung des Algebraic-Product-Operators Gl. 23

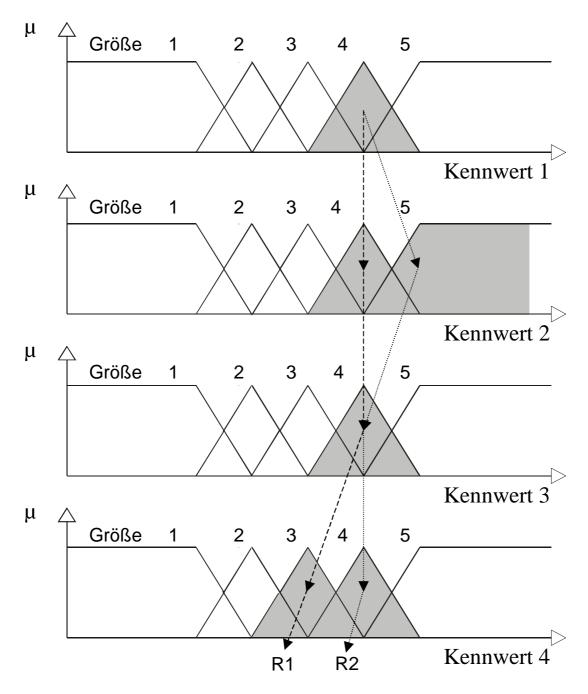
Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Wichtungen in der Regelbasis vorzunehmen, um einem etwaig unterschiedlichen Einfluß einzelner linguistischer Terme auf den Erfülltheitsgrad der Regeln Rechnung zu tragen. Dazu werden Gewichte  $\delta_1,...,\delta_n \le 1$  mit  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$  eingeführt. Diese Gewichte werden als Exponenten der Zugehörigkeiten in einer Regel gesetzt [18].

Es ergibt sich dann für den Erfülltheitsgrad einer Regel:

$$E_R = \min(\mu_{1j}^{\delta_1}, ..., \mu_{nk}^{\delta_n})$$
 bei Verwendung des Minimumoperators Gl. 24

bzw.

 $\boldsymbol{E}_{R} = \mu_{1j}^{\delta_{1}} \cdot ... \cdot \mu_{nk}^{\delta_{n}}$  bei Verwendung des Algebraic-Product-Operators Gl. 25



## Regelblock der Ergebnisklasse I:

R1: WENN X<sub>1</sub>=Kennwert 1 Größe 4 UND X<sub>2</sub>=Kennwert 2 Größe 4 UND X<sub>3</sub>=Kennwert 3 Größe 4 UND X<sub>4</sub>=Kennwert 4 Größe 3 DANN Ergebnisklasse 1

#### **ODER**

R2: WENN X<sub>1</sub>=Kennwert 1 Größe 4 UND X<sub>2</sub>=Kennwert 2 Größe 4 UND X<sub>3</sub>=Kennwert 3 Größe 4 UND X<sub>4</sub>=Kennwert 4 Größe 3 DANN Ergebnisklasse 1

#### Abbildung IV. 9

Bildung des Regelblockes für eine Ergebnisklasse I aus der Kombination der zugehörigen linguistischen Terme (grau) der Eingangswerte (Kennwerte 1 bis 4)

## IV.3.1.3 Defuzzyfizierung

Die Ausgabe des Klassifikationsergebnisses kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

- 1. Unscharf, durch Ausgabe der Zugehörigkeitsgrade des untersuchten Eingangsmusters zu allen Ergebnisklassen.
- 2. Scharf, durch Ausgabe der Ergebnisklasse, der das untersuchte Eingangsmuster am ehesten zuzuordnen ist.

Besteht nicht der Wunsch nach einem scharfen Ergebnis der Klassifikation, können aus den Erfülltheitsgraden der Regeln die Zugehörigkeitsgrade zu jeder Ergebnisklasse berechnet werden.

Mittels des Maximum-Operators berechnet sich der Gesamterfülltheitsgrad der *m* Regeln einer Ergebnisklasse *l* zu [18]:

$$GE_1 = max(E_{11},...,E_{ml})$$
 GI. 26

Zur Ermittlung des Zugehörigkeitsgrades *ZG* eines Signalmusters zu einer Ergebnisklasse ist zu klären, wann ein Zugehörigkeitsgrad *ZG=1* bzw. *ZG=0* vorliegt. Dazu läßt sich ein Vergleich der Gesamterfülltheitsgrade der Regeln einer Klasse mit dem ihrer Komplementärklasse heranziehen.

Ein untersuchtes Signalmuster wird mit ZG=1 einer Ergebnisklasse I zugeordnet, wenn gilt:

$$GE_1 > k \cdot GE_{NOTI}$$
 Gl. 27

Weiterhin ist ZG=0 für:

$$GE_1 \leq GE_{NOT}$$
 Gl. 28

Der Verlauf der Funktion  $\mathbf{ZG}_{I} = \mathbf{f}(\mathbf{GE}_{I}, \mathbf{GE}_{NOTI})$  zwischen diesen beiden Grenzfällen wird linear angesetzt. Somit gilt (Abbildung IV. 10):

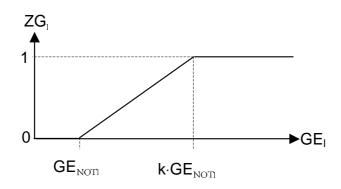
$$GE_{l} > k \cdot GE_{NOTI}$$
:
  $ZG_{l} = 1$ 
 Gl. 29a

  $k \cdot GE_{NOTI} \ge GE_{l} > GE_{NOTI}$ :
  $ZG_{l} = \frac{1}{GE_{NOTI} \cdot (k-1)} \cdot GE_{l} - \frac{1}{k-1}$ 
 Gl. 29b

  $GE_{l} \le GE_{NOTI}$ :
  $ZG_{l} = 0$ 
 Gl. 29c

  $k \ge 1$ 
 $k \ge 1$ 

Der Faktor *k* ist frei wählbar und abhängig vom vorliegenden Klassifikationsproblem.



#### Abbildung IV. 10

Verlauf der Zugehörigkeit zu einer Ergebnisklasse I in Abhängigkeit von den Gesamterfülltheitsgraden der Regeln, GE, GE<sub>NOTI</sub>

Der Zugehörigkeitsgrad zur Komplementärklasse einer Ergebnisklasse / errechnet sich dann zu:

$$ZG_{NOTI} = 1 - ZG_{I}$$
 GI. 30

Entsprechend der gewählten Konfiguration des Musterklassifikators zur Drahtbrucherkennung liefert der Klassifikationsalgorithmus die Zugehörigkeitsgrade zu den Klassen:

- DB KLASSE 1
- DB Klasse 2
- ...
- DB KLASSE n

Die Entscheidung, welcher Drahtbruchklasse das untersuchte Signalmuster angehört, hat der Anwender letztendlich auf der Basis der Zugehörigkeitsgrade zu den Ergebnisklassen selbst zu treffen.

Soll auch diese letzte Entscheidung durch den Klassifikationsalgorithmus erfolgen also dem Anwender ein scharfes Ergebnis zur Verfügung gestellt werden, so besteht mittels des Maximum-Operators die Möglichkeit, die Ergebnisklasse mit dem höchsten Zugehörigkeitsgrad zu ermitteln. Erfüllt dieser Zugehörigkeitsgrad die Bedingung:

$$ZG_{I} > k^{*} \cdot ZG_{NOTI} \Leftrightarrow ZG_{I} > \frac{k^{*}}{1 + k^{*}}$$
 Gl. 31

mit:  $k^* \ge 1$ 

so ist diese Ergebnisklasse dem Anwender als Ergebnis auszugeben. Mit dem Faktor  $k^*$  läßt sich eine Vertrauensgrenze einstellen, bei deren Überschreitung das Signalmuster als Drahtbruch gewertet wird. So werden nur die sicher erkannten Drahtbrüche dem Anwender ausgegeben.

#### IV.3.1.4 Anpassung und Optimierung

Der Fuzzy-Musterklassifikator ist in der Lage, mit Hilfe von ausgewählten Kennwerten den Ähnlichkeitsgrad von Signalmustern mit vorgegebenen Referenzmustern zu berechnen und, wenn gewünscht, das ähnlichste Muster zu benennen. Dazu sind Trainingsdaten notwendig, mit deren Hilfe der Algorithmus an die vorliegende Prüfaufgabe angepaßt werden kann.

Trainingsdaten sind dabei Kennwerte realer Signalmuster, die durch Inspektion von Seilproben eindeutig den vorgegebenen Referenzmustern zugewiesen werden können. Der Klassifikator ist so zu konfigurieren, daß er diese Zuweisungen wiederholen kann. Es handelt sich dabei um einen Lernprozeß, bei dem die Änderung folgender freier Parameter vom Entwickler vorzunehmen ist:

- Auswahl der geeigneten Kennwerte der Ergebnisklassen gemäß IV.2.1
- 2. Definition der Zugehörigkeitsfunktionen gemäß IV.3.1.1
- 3. Definition des Regelblocks gemäß IV.3.1.2

- 4. Wichtungen in den Regeln gemäß IV.3.1.2.1
- 5. Wahl des Faktors k für die Defuzzyfizierung gemäß IV.3.1.3

Die große Anzahl Einstellmöglichkeiten und die Wechselwirkungen der einzelnen Parameter untereinander gestalten die Optimierung zeit- und arbeitsintensiv. Getroffene Änderungen sind immer wieder an den Trainingsdaten bezüglich ihrer Auswirkungen zu überprüfen.

Dieser Optimierungs- oder Anpassungsaufwand beeinträchtigt die Ausweitung der Anwendung eines solchen Klassifikators auf neue Problemstellungen.

#### IV.3.2 Selbstlernender Fuzzy- Musterklassifikator

Mit dem in **IV.3.1** vorgestellten Musterklassifikator lassen sich bereits gute Ergebnisse bei der Identifikation von drahtbruchverursachten Signalmustern erreichen. Die Anpassung an eine vorhandene Problemstellung ist aber sehr aufwendig. Ziel muß es daher sein, einen Klassifikator zu konstruieren, der anhand von Trainingsdaten in der Lage ist, sich selbstlernend auf ein vorliegendes Problem einzustellen.

Eine effiziente automatische Anpassung wird durch die große Zahl freier Parameter des in **IV.3.1** beschriebenen Klassifikators und deren gegenseitige Beeinflussung behindert. Um diese Zahl zu reduzieren, ist die Fuzzyfizierung und die Inferenz des Fuzzy-Algorithmus zu modifizieren.

#### IV.3.2.1 Modifikation der Fuzzyfizierung

Legt man die linguistischen Terme der Kennwerte unabhängig von den zu erwartenden Wertebereichen der Ergebnisklassen fest, führt dies zu einer hohen Anzahl unscharfer Mengen. Nur so ist eine eindeutige Beschreibung der Ergebnisklassen durch die Regeln möglich. Zur Verringerung der Anzahl unscharfer Mengen ist aber eine Reduzierung der freien Parameter des Klassifikationsalgorithmus unumgänglich. Es ist also im vorhinein eine Berücksichtigung der Wertebereiche der Ergebnisklassen in der Definition der Zugehörigkeitsfunktionen der unscharfen Mengen vorzusehen. Diese Anpassung führt notwendigerweise zum Grenzfall der mit einer Ergebnisklasse gekoppelten unscharfen Menge, d.h. eine unscharfe Menge umfaßt nur den Wertebereich, der für eine Ergebnisklasse zu erwarten ist. Es ergeben sich linguistische Terme der Form KENNWERT i DER ERGEBNISKLASSE j.

Die Anzahl der linguistischen Terme ist dann nur noch von der Anzahl der verwendeten Kennwerte und vorhandenen Ergebnisklassen abhängig. Sie ergibt sich somit zu:

$$n_{linguistischeTerme} = n_{Kennwerte} \cdot n_{Ergebnisklassen}$$
 Gl. 32

Durch diese Kopplung der unscharfen Mengen mit den Ergebnisklassen läßt sich die Zugehörigkeitsfunktion als Häufigkeitsverteilung interpretieren. Dabei ist die Zugehörigkeit zur unscharfen Menge um so höher, je häufiger ein Kennwertbetrag bei realen Mustern auftritt. Unterstellt man zunächst eine Normalverteilung der Kennwertbeträge bei realen Signalmustern, so bietet sich für die Definition der Zugehörigkeitsfunktion eine normierte Gaußsche Glockenkurve an (Gl. 33). Die Zugehörigkeit des Erwartungswertes nimmt dabei den Wert "Eins" an [15].

$$\mu_{ij}(\boldsymbol{X}_i) = \mathbf{e}^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\boldsymbol{X}_i - \boldsymbol{m}_i}{\sigma_i}\right)^2\right)}$$
 Gl. 33

Da reale Verteilungen oftmals durch eine Normalverteilung nur unzureichend beschrieben werden können, wird für die endgültige Definition der Zugehörigkeitsfunktionen eine 5-parametrige Funktion, basierend auf der Gaußschen Glockenkurve, eingesetzt (Abbildung IV. 11):

$$X_{i} \le m_{i}: \quad \mu_{ij}^{*}(X_{i}) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{X_{i}-m_{i}}{\sigma_{1i}})^{2}} \qquad \mu_{ij}(X_{i}) = \frac{\mu_{ij}^{*}(X_{i}) \cdot (CF_{1}+1)}{1+CF_{1} \cdot \mu_{ij}^{*}(X_{i})} \text{ Gl. 34a}$$

$$X_{i} > m_{i}: \qquad \mu_{ij}^{*}(X_{i}) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{i}-m_{i}}{\sigma_{2i}}\right)^{2}} \qquad \qquad \mu_{ij}(X_{i}) = \frac{\mu_{ij}^{*}(X_{i}) \cdot (CF_{2}+1)}{1+CF_{2} \cdot \mu_{ij}^{*}(X_{i})} \text{ Gl. 34b}$$

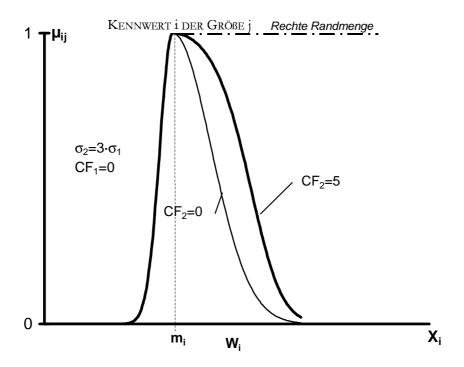


Abbildung IV. 11
5-parametrige Zugehörigkeitsfunktion

Diese abschnittsweise definierte Funktion berücksichtigt unterschiedliche Streuungen für den Bereich  $X_i \le m_i$  und  $X_i > m_i$ . Darüber hinaus läßt sich die Steilheit der beiden Flanken über die Faktoren  $CF_1$  und  $CF_2$  vorgeben und ermöglicht damit die "Unschärfe" der Mengen einzustellen (Abbildung IV. 12). Mit steigendem  $CF_1$  und  $CF_2$  nähert sich die Flanke immer weiter einer Rechteckform. Für den Grenzfall  $CF_1=CF_2\to\infty$  erhält man dementsprechend eine Rechteckfunktion und damit die Zugehörigkeitsfunktion zu einer scharfen Menge (Abbildung IV. 12). Die Definition von Randmengen nach Gl. 19a,b kann für bestimmte Kennwerte weiterhin sinnvoll sein.

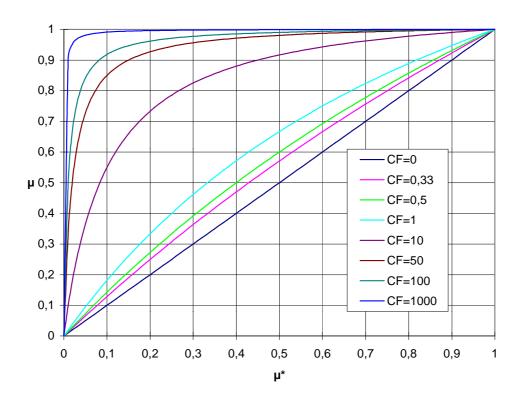


Abbildung IV. 12
Gestalt der Funktion  $\mu$ = $f(\mu^*)$  nach Gl. 34a, b in Abhängigkeit vom Faktor CF

## **IV.3.2.2 Modifikation der Inferenz**

Erfolgt nach modifizierter Fuzzyfizierung die Bildung der Regelbasis weiterhin analog zu **IV.3.1.2**, so ergibt sich aufgrund der Kopplung der unscharfen Mengen mit den Ergebnisklassen für jede Ergebnisklasse genau eine Regel der Form:

R: WENN KENNWERT 1 DER ERGEBNISKLASSE j UND ... UND KENNWERT n DER ERGEBNISKLASSE j DANN ERGEBNISKLASSE j

Wichtungen sind in diesen Regeln entbehrlich, da die Zugehörigkeitsfunktionen auf den Häufigkeitsverteilungen realer, bekannter Signalmuster basieren und auf die einzelnen Ergebnisklassen zugeschnitten sind. Die Anzahl freier Parameter und die Komplexität des Optimierungsprozesses reduziert sich dadurch erheblich.

Die Regelbasis hat durch die vorgenommenen Modifikationen eine vorgegebene, feste Form und wird während einer Optimierung nur in sofern verändert, als daß die Anzahl der in ihr enthaltenen Terme der Anzahl der verwendeten Kennwerte angepaßt werden muß.

#### IV.3.2.3 Anpassung und Optimierung

Die freien Parameter des Klassifikationsalgorithmus haben sich durch die vorgenommenen Modifikationen erheblich reduziert. Beeinflußbar bleiben lediglich:

- 1. Die Auswahl der Ergebnisklassen gemäß IV.3.1.1;
- 2. Die Auswahl der Kennwerte der Ergebnisklassen IV.3.1;
- 3. Die Definition einer Zugehörigkeitsfunktion je Kennwert gemäß IV.3.2.1;
- 4. Die Wahl des Faktors *k* für die Defuzzyfizierung gemäß **IV.3.1.3**.

Die Anpassung und Optimierung eines so konstruierten Klassifikators beschränkt sich somit auf die Veränderung relativ weniger Werte. Damit wird eine selbstlernende Optimierung in vertretbarer Rechenzeit möglich.

#### IV.3.3 Genetische Algorithmen zur Optimierung von Musterklassifikatoren

Die Optimierung hat die Aufgabe, den Musterklassifikator für ein vorliegendes Schädigungsproblem so einzustellen, daß möglichst viele Signalmuster, die durch Drahtbrüche verursacht sind, den entsprechenden Drahtbrüchklassen zugeordnet werden. Signalmuster anderer Ursachen sollen möglichst vollständig der Klasse "Kein Drahtbrüch" zugewiesen werden.

Dafür ist ein Trainingsdatensatz erforderlich, der aus einer Anzahl Signalmuster bekannter Verursacher besteht, d.h. dessen Klassifikationsergebnis bekannt ist. Der Klassifikator ist nun so zu konfigurieren, daß er dieses Klassifikationsergebnis möglichst exakt wiederholen kann.

Der notwendige Optimierungsprozeß der Einstellungen des Klassifikators läßt sich als Extremwertaufgabe auffassen, bei der die Abweichung des Klassifikationsergebnisses des Trainingsdatensatzes zum bekannten Ergebnis minimal werden soll. Die Variablen der Extremwertaufgabe sind die freien Parameter des Klassifikationsalgorithmus nach IV.3.2.3, die einen Suchraum für die Lösung aufspannen, dessen Dimension der Anzahl dieser freien Parameter entspricht.

Für solche Extremwertaufgaben mit einer großen Zahl Variablen lassen sich in der Literatur unterschiedliche Lösungsmethoden finden. Geeignet ist beispielsweise der genetische Algorithmus aus der Gruppe der evolutionären Verfahren [20].

Hierbei wird das Prinzip der natürlichen Auslese in vereinfachter Form auf die Lösungsfindung übertragen: In einer Population konkurrieren Individuen, die in ihrem Erbmaterial eine mögliche Lösung der Extremwertaufgabe verschlüsselt haben, miteinander, um möglichst viele Nachkommen zu zeugen und so ihr Erbmaterial weiterzugeben.

Die Auswahl der Eltern eines Nachkommens erfolgt zunächst zufällig, doch ist für ein Individuum die Wahrscheinlichkeit sich zu reproduzieren um so größer, je kleiner seine Lösung der der Extremwertaufgabe zu Grunde liegenden Funktion ist. So nähert sich von Generation zu Generation das am höchsten bewertete Individuum einer Lösung der Extremwertaufgabe. Es ist allerdings nicht vorhersehbar, ob es sich um das absolute Minimum im festgelegten Suchraum handelt oder lediglich um ein lokales. Daher ist es notwendig, immer mehrere Optimierungen mit dem genetischen Algorithmus durchzuführen und das Ergebnis mit dem kleinstem Minimum auszuwählen.

Die Vor- und Nachteile des genetischen Algorithmus sind in Tabelle IV. 6 zusammengefaßt.

Vorteile GA	Nachteile GA		
Arbeitet mit einer Kodierung des Pro-	Lösung stark abhängig vom Bewer-		
blems	tungsmaß und von der Kodierung		
Transformation ist mit gewichtetem Zufall	integrationsgerechte Hardwarelösungen		
verbunden	sind sehr komplex		
parallel, robust und adaptiv	Rechenintensiv		
Basis ist eine Menge von möglichen Lö-	findet nicht unbedingt die optimale Lö-		
sungen	sung		
Benötigt nur ein beliebiges Bewertungs-	schlechte Konvergenzeigenschaft		
maß			
Zwischenlösung jederzeit benutzbar			

Tabelle IV. 6

Vor- und Nachteile des genetischen Algorithmus [22]

#### IV.3.3.1 Definition des genetischen Codes

Die Lösung der Extremwertaufgabe jedes Individuums ist in seinem aus einem einzigen Chromosom bestehenden Erbmaterial verschlüsselt. Diese Verschlüsselung erfolgt üblicherweise im Binärcode, wodurch eine große Zahl Gene erforderlich wird, um die in den meisten Fällen als Dezimalzahlen vorliegenden Daten zu verschlüsseln. Kodier- und Dekodierroutinen übernehmen den Datenaustausch [20].

Herrera, Lozano und Verdegay [16] schlagen abweichend davon die Verwendung von Genen als Träger von Dezimalzahlen vor, wodurch der aufwendige Verschlüsselungsprozeß entfällt. Die Funktion der einzelnen Gene ist hierbei allerdings sehr viel stärker mit ihrer Lage im Chromosom gekoppelt. Während der Tausch von Genfolgen in den Chromosomen bei Verwendung der Binärcodierung möglich ist, ohne die Information vollständig unbrauchbar zu machen, müssen bei der Dezimalcodierung die

Gene immer die gleiche Stelle in einem Chromosom besetzen. Dies ist besonders im Hinblick auf die Definition der genetischen Operatoren relevant (s. **IV.3.3.4.4**).

Für das vorliegende Optimierungsproblem besteht mit Hilfe der Dezimalcodierung die Möglichkeit, die freien Parameter direkt einzelnen Genen zuzuordnen. Der Aufbau

eines Chromosoms ergibt sich für den Klassifikator nach Tabelle IV. 7.

Die Länge der Chromosome ergibt sich aus der Anzahl der Ergebnisklassen und der verwendeten Kennwerte mit den fünf Parametern der Zugehörigkeitsfunktion (IV.3.2.1)zu:

$$\mathbf{n}_{\mathsf{Gen}} = \mathbf{n}_{\mathsf{Ergebnisklasse}} \cdot \mathbf{n}_{\mathsf{Kennwert}} \cdot \mathbf{5}$$
 Gl. 36

Nach IV.3.2.3 ist auch die Anzahl der Kennwerte als freier Parameter des Klassifikationsalgorithmus wählbar. Dies führt nach Gl. 36 zu unterschiedlichen Chromosomenlängen der Individuen einer Population. Kreuzungen zwischen Individuen unterschiedlicher Chromosomenlänge gemäß IV.3.3.4.4.2 sind nicht möglich. Darüber hinaus geht Erbinformation verloren, wenn durch Mutation der Kennwerteumfang und der Genumfang eines Nachkommens geringer ist als der seiner Eltern.

Es ist also anzustreben, die Chromosomenlänge aller Individuen konstant zu halten und nicht zu berücksichtigende Kennwerte im Chromosom vielmehr zu kennzeichnen als zu löschen.

Die Kennzeichnung der Kennwerte in den en tsprechenden Genen wird durch die Dezimalkodierung möglich. Jeder Kennwert wird durch das Erwartungswert-Gen und das Streuungs-Gen repräsentiert. Der Wert des Streuungs-Gens ist definitionsgemäß immer positiv. Hier bietet sich die Möglichkeit, das Vorzeichen als Kennzeichner einzusetzen: Nicht zu berücksichtigende Kennwerte erhalten ein negatives Vorzeichen im Streuungs-Gen. So bleibt die Information dieser Gene weiterhin erhalten und steht für nächste Generationen zur Verfügung.

Aufbau eines Chromosoms							
Gen	Gen Inhalt = Parameter						
1	Erwartungswert	Ergebnisklasse 1	Kennwert 1				
2	Streuung 1						
3	CF <sub>1</sub>						
4	Streuung 2						
5	CF <sub>2</sub>						
5n-4	Erwartungswert		Kennwert n				
5n-3	Streuung 1						
5n(m-1)+1	Erwartungswert	Ergebnisklasse m	Kennwert 1				
5n(m-1)+2	Streuung 1						
•••							
5nm-1	Streuung 2		Kennwert n				
5nm	CF <sub>2</sub>						

Tabelle IV. 7

Aufbau eines Chromosoms und Belegung der Gene

## IV.3.3.2 Bildung der Ausgangspopulation

Der Umfang der Population während des Evolutionsprozesses bleibt konstant. Die Anzahl der Individuen je Generation ist frei wählbar, beeinflußt aber aufgrund des Erbmaterialumfanges die Entwicklung der Folgegenerationen. Kleine Populationen benötigen mehr Generationsschritte, um einen entsprechend optimierten Parametersatz zu liefern als dies bei einer hohen Anzahl Individuen notwendig wäre. Es besteht bei kleinen Populationen darüber hinaus eher die Gefahr, daß sie sich in einem Bereich des Parametersuchraums um ein lokales Minimum "festsetzen". Große Populationen sind dagegen dynamischer, da sie eine größere Zahl Bereiche des Suchraumes parallel untersuchen können. Die obere Grenze der Individuenzahl ist durch Rechengeschwindigkeit und Speicherplatz des Rechners begrenzt.

Die Bildung der Ausgangspopulation erfolgt ausgehend von einem vorgegebenen Urindividuum. Dieses muß bereits einen sinnvollen Parametersatz für den Klassifikationsprozeß darstellen. Es bietet sich daher an, aus den vorhandenen Trainingsdaten Erwartungswert und Streuung der Normalverteilung für alle Kennwerte zu ermitteln und im Chromosom des Urindividuums abzulegen. Für das Urindividuum werden die beiden Streuungen und CF-Werte der 5-parametrigen Zugehörigkeitsfunktionen gleich gesetzt. Mit  $CF_1$ = $CF_2$ =0 sind die Zugehörigkeitsfunktionen des Urindividuums Gaußsche Glockenkurven nach Gl. 32. Durch Mutation des Urindividuums (s. IV.3.3.4.4.1)entstehen alle weiteren Individuen der Ausgangspopulation.

#### IV.3.3.3 Prinzip der natürlichen Auslese

Das Prinzip der natürlichen Auslese beruht darauf, daß einzelne Individuen aufgrund einer besseren Anpassung an ihre Umgebung erfolgreicher als ihre Artgenossen sind und dadurch statistisch mehr Nachkommen zeugen. Das Erbmaterial dieser besser angepaßten Individuen setzt sich so im Laufe der Generationen gegenüber dem der schlechter angepaßten durch.

Der Grad der Anpassung an eine vorgegebene Umgebung wird mit Fitness bezeichnet.

## IV.3.3.3.1 Bewertung der Individuen – Die Fitnessfunktion

Um das Prinzip der natürlichen Auslese für die Lösungsfindung einer Extremwertaufgabe nachzubilden, ist eine Bewertung der Individuen einer Population notwendig. Damit soll die Güte der Lösung der Extremwertaufgabe ermittelt werden. Im vorliegenden Fall handelt es sich um den Grad der Übereinstimmung zwischen dem vorgegebenen und dem mit dem im Chromosom *chr* verschlüsselten Parametersatz errechneten Klassifikationsergebnis des Trainingsdatensatzes.

Zu diesem Zweck wird eine Funktion definiert, mit der sich die Fitness jedes Individuums berechnen läßt. Die Definition dieser Fitness-Funktion richtet sich nach dem Ziel des Optimierungsprozesses. Grundanteil ist die Summe der Fehlerquadrate zwischen ermittelten Zugehörigkeitsgraden und den Vorgaben im Trainingsdatensatz:

$$\boldsymbol{F}^{2}(\boldsymbol{chr}) = \frac{1}{\boldsymbol{n}_{TM}} \cdot \sum_{i=1}^{\boldsymbol{n}_{TM}} \left[ \left( \boldsymbol{ZG}_{i,EK,Soll} - \boldsymbol{ZG}_{i,EK,lst}(\boldsymbol{chr}) \right)^{2} \right]$$
 Gl. 37

Jedes Trainingsmuster liefert genau einen Anteil zur Summe der Fehlerquadrate. Es werden jeweils nur die Zugehörigkeitsgrade verglichen, die zur korrekten Ergebnisklasse des Trainingsmusters gehören.

Erweitert wird der Grundanteil um einen Fehleranteil, der den Anteil falsch klassifizierter Trainingsmuster berücksichtigt:

$$F_1(chr) = \sum_{i=1}^{n_{TM}} f_{K,EK1,EK2,i}$$
 Gl. 38

Der Fehleranteil nach GI.38 wird gebildet aus der Anzahl falsch klassifizierter Signalmuster jeder Ergebnisklasse. Mit dem Faktor  $f_{\mathcal{K}_{EK1,EK2}}$  läßt sich der Fehler eines falsch klassifizierten Trainingsmusters abhängig von der korrekten und der falsch zugewiesenen Ergebnisklasse einstellen. So kann beispielsweise der Fehler eines nicht als Drahtbruch klassifizierten drahtbruchverursachten Signalmusters schwerer empfunden werden, als wenn ein Drahtbruch der Klasse 1 als Drahtbruch der Klasse 2 klassifiziert wird.

Die Fitness eines Individuums mit dem Chromosom chr errechnet sich dann zu:

$$Fi(chr) = (F^{2}(chr) + f_{5} \cdot F_{1}(chr))^{-1}$$
 Gl. 39

Der Faktor  $f_5$  ermöglicht eine Verschiebung des Einflusses zwischen den beiden Anteilen der Fitness-Funktion.

Mit der Definition der Fitnessfunktion geht die Extremwertaufgabe "Suche nach einem Minimum der Abweichung zwischen vorgegebenem und ermitteltem Klassifikationsergebnis" über in die Extremwertaufgabe "Suche nach einem Maximum der Fitnessfunktion".

## IV.3.3.3.2 Bestimmung der Selektionswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit für ein Individuum, sich zu reproduzieren, wird durch die Selektionswahrscheinlichkeit angegeben. Diese wird in Anlehnung an das Prinzip der natürlichen Auslese durch die Fitness des Individuums im Verhältnis zur Gesamtfitness der Population bestimmt. So ist gewährleistet, daß Individuen mit einer hohen Anpassung an ihre Umgebung, d.h. mit einer hohen Fitness, statistisch mehr Nachkommen haben als solche mit einer geringen Fitness.

Diese Selektionswahrscheinlichkeit berechnet sich zu:

$$p_{s,chr} = \frac{Fi(chr)}{\sum_{chr} Fi(chr)}$$
 Gl. 40

Die Ermittlung der Selektionswahrscheinlichkeit nach Gl. 40 birgt bei kleinen Populationen vom Umfang 50...100 Individuen zwei Nachteile [17]: In den ersten Generationen ist die Streuung der Fitness der einzelnen Individuen groß. Bei der nach Gl. 40 definierten Selektionswahrscheinlichkeit bestimmen die wenigen Individuen mit stark überdurchschnittlicher Fitness fast ausschließlich die nächste Generation. Bei weit fortgeschrittener Entwicklung der Population ist die Streuung der Fitness gering, so daß auch die Selektionswahrscheinlichkeit der Individuen annähernd gleich wird. Die Besten einer Generation haben somit kaum einen Vorteil gegenüber der Restpopulation.

Um diese Probleme zu vermeiden, wird die skalierte Fitness Fi' nach Goldberg [17] definiert. Damit ist gewährleistet, daß das Verhältnis der höchsten zur durchschnittli-

chen Fitness während der gesamten Entwicklung konstant bleibt. Ein gängiger einfacher Ansatz dazu ist die lineare Skalierung [17]:

$$Fi'(chr) = a \cdot Fi(chr) + b$$
 Gl. 41

Gesetzt wird für die durchschnittliche Fitness der Population:

$$Fi'_{avg} = Fi_{avg}$$
 Gl. 42,

Für die Umrechnung der Fitness eines Individuums in die skalierte Fitness ist nur noch das Verhältnis von maximaler zu durchschnittlicher Fitness festzulegen.

$$\frac{\mathbf{Fi'}_{\text{max}}}{\mathbf{Fi}_{\text{avg}}} = \mathbf{C}$$
 GI. 43

Die Konstante C sollte üblicherweise Werte zwischen 1,2 und 2 annehmen [17]. Bei dieser Skalierungsmethode kann das Problem auftreten, daß  $Fi'_{min} < 0$  wird. In diesem Fall ist anstelle Gl. 42 zu setzen:

$$\mathbf{F}'_{\min} = \mathbf{0}$$
 Gl. 44

#### IV.3.3.4 Reproduktion - Bildung einer neuen Generation

Die Reproduktion der Individuen nach der Bewertung und Ermittlung der Selektionswahrscheinlichkeiten führt zu einer neuen Generation. In dieser Folgegeneration lassen sich Individuen aus unterschiedlichen Ursprüngen unterscheiden:

- 1. "Die Besten" als Individuen mit unverändertem Chromosomen der am höchsten bewerteten Individuen der vorhergehenden Generation
- 2. "Die Nachkommen" aus Kreuzungen und Mutationen von Individuen der vorhergehenden Generation
- 3. "Die Neuen" als Mutationen des Urindividuums

#### IV.3.3.4.1 "Die Besten"

Aus der bestehenden Generation wird eine festgelegte Anzahl Individuen unverändert in die Folgegeneration übertragen. Es handelt sich dabei um die Individuen mit der höchsten Fitness.

Die Größe dieser Gruppe nimmt spürbaren Einfluß auf den Ablauf des genetischen Algorithmus. Werden zu viele Individuen unverändert übertragen, haben die Evolutionsprozesse nur geringen Einfluß. Eine brauchbare Lösung wird dann erst nach einer hohen Anzahl Generationen erreicht.

Die gewählte Anzahl sollte immer größer Eins sein, da sich während des Optimierungsprozesses unterschiedliche Entwicklungslinien einstellen, die abwechselnd das beste Individuum stellen. Um die Besten dieser Linien möglichst unverändert übertragen zu können, ist eine Anzahl <5 in den meisten Fällen ausreichend.

### IV.3.3.4.2 "Die Nachkommen"

"Die Nachkommen" werden durch die Anwendung der genetischen Operatoren auf die Chromosomen ausgewählter Individuen der bestehenden Generation gebildet (s. IV.3.3.4.4). Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Individuum bei der Erzeugung der Nachkommen berücksichtigt wird, ist durch seine Selektionswahrscheinlichkeit bestimmt (s. IV.3.3.3.2).

Die Bildung des Erbgutes eines Nachkommen aus den Chromosomen seiner Eltern wird durch Zufallsprozesse gesteuert. Die Wahrscheinlichkeit einer Kreuzung des Elternerbgutes wird durch die Kreuzungswahrscheinlichkeit  $p_K$  angegeben (s. **IV.3.3.4.4**). Erfolgt keine Kreuzung, so wird das Erbmaterial unverändert auf die Nachkommen kopiert.

Anschließend an diese erste genetische Operation besteht die Möglichkeit der Mutation der Chromosomen zur endgültigen Bildung des Erbmaterials. Die Wahrscheinlichkeit der Mutation wird durch die Mutationswahrscheinlichkeit angegeben.

Aus zwei Elternindividuen entstehen immer zwei Nachkommen.

#### **IV.3.3.4.3 Genetische Operatoren**

Die Zuordnung von Dezimalzahlen zu den Genen macht eine Modifikation der klassischen genetischen Operatoren notwendig [16]. Da eine beliebige Vertauschung der Gene in den Chromosomen aufgrund der direkten Kopplung mit den Parametern nicht möglich ist, lassen sich hier nur die:

- 1. Mutationsoperation
- 2. Kreuzungsoperation

für die Reproduktion einer neuen Generation formulieren [16].

#### IV.3.3.4.3.1 Mutation eines Chromosoms

Durch die Mutation kann jedes Gen eines Chromosoms verändert werden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Gen einer Mutation unterworfen wird, bezeichnet man als Mutationswahrscheinlichkeit eines Gens  $p_{MG}$ .

Während diese Veränderung bei der Binärkodierung den Austausch der beiden Zahlen 0 und 1 bedeutet, ist der Vorgang bei der Dezimalkodierung komplexer. Nach Herrera, Lozano und Verdegay [16] berechnet sich ein mutiertes Gen  $c_k$  aus dem ursprünglichen Gen  $c_k$  zu:

$$c'_{k} = \begin{cases} c_{k} + \Delta(c_{kr} - c_{k}) \cdot f_{G}, & wenn & Zufallszahl = 0 \\ c_{k} - \Delta(c_{k} - c_{kl}) \cdot f_{G}, & wenn & Zufallszahl = 1 \end{cases}$$

$$mit:$$

$$c_{k}, c'_{k} \in [c_{kl}, c_{kr}]$$

Der Term  $\Delta(\Delta c)$  liefert zufällige Werte aus dem Intervall  $[0,\Delta c]$ . Die Breite des Intervalls nimmt mit zunehmender Generationenzahl ab. Damit wird zu Beginn der Optimierung zunächst eine breite Streuung der mutierten Gene erreicht. Gegen Ende wird der Suchraum um die dann vorhandenen Individuen eingeengt, um eine Feinoptimierung in der Schlußphase zu erreichen.

Die Abhängigkeit der Intervallbreite von der Generationenzahl wird durch Wichtung des Terms  $\Delta(\Delta c)$  mit der Funktion  $f_G=f(G)$  erreicht (Abbildung IV. 13). Sie ist definiert zu:

$$G \le G_1$$
: Gl. 46a

$$G_1 < G \le G_2$$
:  $f_G = \frac{1 - f_{G0}}{G_1 - G_2} \cdot G + \frac{f_{G0}G_1 - G_2}{G_1 - G_2}$  Gl. 46b

$$G_2 \le G_1$$
:  $f_G = f_{G0}$  GI. 46c

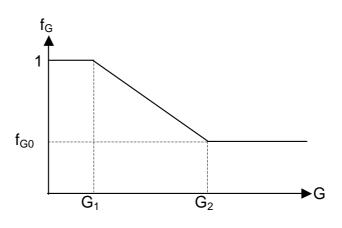


Abbildung IV. 13

Verlauf der Funktion f<sub>G</sub>(G)

#### IV.3.3.4.3.2 Kreuzung zweier Chromosomen

Durch Kreuzung entstehen aus der Mischung des Erbmaterials zweier Elternidividuen zwei Nachkommen. Dazu werden die Chromosome an einer zufällig ausgewählten Stelle getrennt und zwei Genfolgen ausgetauscht (Abbildung IV. 14).

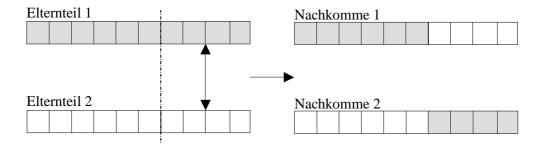


Abbildung IV. 14

Schematische Darstellung der Kreuzung zweier Individuen durch Austausch von Genfolgen in den Chromosomen