

V Selbstlernender Fuzzy-Musterklassifikator zur Erkennung von Drahtbrüchen in Schrägaufzugseilen

Mit dem Verfahren nach **IV.3.2** läßt sich für den konkreten Einsatz an Schrägaufzugseilen von Hochöfen eine rechnergestützte Drahtbruchererkennung erstellen. Dazu ist zunächst die Konfiguration des Klassifikationsalgorithmus mit den zu erkennenden Drahtbrucharten und der Ausgabemethode zu definieren.

Anhand der Auswertung von Streuflußmessungen vorliegender Proben abgelegter Seile läßt sich ein Ausgangsparametersatz aufstellen, der mittels Trainingsdaten zu einem optimierten Musterklassifikator mit ausreichender Erkennungsquote drahtbruchverursachter Signalmuster zum Einsatz an Schrägaufzugseilen weiterentwickelt wird.

V.1 Konfiguration des Klassifikators

Für den Einsatz des Musterklassifikators zur Drahtbruchererkennung an Schrägaufzugseilen läßt sich entsprechend den zu erwartenden Schadensbildern (s. **III**) folgende Konfiguration des Klassifikationsalgorithmus definieren:

- 1) **Eingänge:** Kennwerte des Grundmusters 3 gemäß Tabelle IV. 3.
Der charakteristische Wert des Grundrauschens, $u_{\text{ind,eff,min}}$, wird für ein Intervall $[x-2500\text{mm};x+2500\text{mm}]$ aus dem gleitenden Effektivwert über 500 mm gemäß **IV.2.1** und Gl. 19 bestimmt.
- 2) **Zugehörigkeitsfunktionen:** 5-parametrische Zugehörigkeitsfunktionen gemäß **IV.3.2.1**. Für folgende Kennwerte werden rechte Randmengen definiert:
 - $A_{\text{DBA}}, \alpha_{1,\text{DBA}}, \alpha_{2,\text{DBA}}, A_{\text{bez,DBA}}$
 - $A_{\text{DBI}}, A_{\text{bez,DBI}}$
- 3) **Regelbasis:** Verwendung des Minimum-Operators als UND-Verknüpfung gemäß **IV.3.1.2.1**
- 4) **Ergebnisklassen:**
 - Klasse 1: „Äußerer Drahtbruch“ - DBA gemäß **IV.3.1.1**
 - Klasse 2: „Innerer Drahtbruch“ - DBI gemäß **IV.3.1.1**
- 5) **Defuzzifizierung:** Wahl der Faktoren k und k^* gemäß **V.4.7**

- 6) Ausgabe der Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisklassen und der ähnlichsten Ergebnisklasse gemäß **IV.3.1.3.1**

Die Wahl der Randmengen berücksichtigt, daß das Rauschen üblicherweise kleinere Amplituden und flachere Signalverläufe aufweist als drahtbruchverursachte Signalmuster. Die unscharfe Menge zum Kennwert A_{bez} muß aufgrund der „Filtereigenschaft“ als rechte Randmenge ausgebildet sein. Seine Aufgabe besteht in der Unterdrückung von Signalmustern kleiner Amplitude.

Um eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Klassifikationsalgorithmus zu ermöglichen, werden sowohl die Zugehörigkeitsgrade zu den Ergebnisklassen als auch das endgültige, scharfe Ergebnis durch Anwendung des Maximum-Operators nach **IV.3.1.3.2** auf die Zugehörigkeitsgrade ausgegeben.

V.2 Ermittlung des Ausgangsparametersatzes

Als Ausgangsdaten für die Voreinstellung des Musterklassifikators stehen Streuflußmessungen von Probestücken realer Schrägaufzugseile zur Verfügung. Aus diesen werden durch Vergleich mit den geöffneten Proben die drahtbruchverursachten Signalmuster identifiziert und die Kennwerte nach Tabelle IV. 4 aufgenommen.

Aus der Probe *HO9 L2* werden aus den insgesamt 22 Drahtbrüchen 6 äußere und 12 innere ausgewählt und daraus nach **IV.3.3.2** die Ausgangsparameter ermittelt. In Tabelle V. 1 ist der vollständige Ausgangsparametersatz zusammengefaßt.

Für die Klassifikation werden zunächst alle neun Kennwerte verwendet.

V.3 Anwendung des Musterklassifikators mit den Ausgangsparametern

Konfiguriert man mit dem Ausgangsparametersatz gemäß Tabelle V. 1 den Musterklassifikator und wendet ihn auf die Probe *HO9 L2* an, aus der diese Parameter selbst gewonnen sind, so erhält man bereits ein sehr gutes Klassifikationsergebnis: 96,7% der untersuchten Signalmuster werden korrekt klassifiziert (Tabelle V. 2). Von den vorhandenen 22 Drahtbrüchen werden 18 erkannt (81,8%) und davon 15 zudem der korrekten Ergebnisklasse zugewiesen. Drei Drahtbrüche erreichen für beide Ergebnisklassen identische Zugehörigkeitsgrade und sind daher nicht eindeutig einer Ergebnisklasse zuzuordnen (Kennung *DB* in Tabelle V. 2).

| Seiltrieb: | Thyssen Krupp Stahl AG - Schrägaufzug Hochofen 9/Ha | | | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Seiltyp: | CASAR Turboplast 38mm sS 1770 N/mm² | | | |
| Ausgangsparameter | | | | |
| Kennwert | | m | $\sigma_1=\sigma_2$ | CF₁=CF₂ |
| 1 DBA | A [Vs/mm] | $636,5 \cdot 10^{-5}$ | $165,2 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 2 DBA | α_1 [Vs/mm ²] | $169,0 \cdot 10^{-5}$ | $49,7 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 3 DBA | α_2 [Vs/mm ²] | $169,0 \cdot 10^{-5}$ | $49,7 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 4 DBA | Δx [mm] | 18,1 | 5,92 | 0 |
| 5 DBA | A _v [Vs/mm] | $216,0 \cdot 10^{-5}$ | $40,6 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 6 DBA | $\Delta x_z/\Delta x_v$ [-] | $-2,02 \cdot 10^{-1}$ | $5,11 \cdot 10^{-1}$ | 0 |
| 7 DBA | α_1/α_2 [-] | $7,228 \cdot 10^{-2}$ | $4,816 \cdot 10^{-1}$ | 0 |
| 8 DBA | A _z /A _v [-] | $-4,526 \cdot 10^{-1}$ | $6,855 \cdot 10^{-1}$ | 0 |
| 9 DBA | A _{bez} [Vs/mm] | 8,409 | 2,154 | 0 |
| 1 DBI | A [Vs/mm] | $321,1 \cdot 10^{-5}$ | $62,7 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 2 DBI | α_1 [Vs/mm ²] | $68,6 \cdot 10^{-5}$ | $17,2 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 3 DBI | α_2 [Vs/mm ²] | $68,6 \cdot 10^{-5}$ | $17,2 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 4 DBI | Δx [mm] | 26,1 | 6,91 | 0 |
| 5 DBI | A _v [Vs/mm] | $153,0 \cdot 10^{-5}$ | $43,9 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 6 DBI | $\Delta x_z/\Delta x_v$ [-] | $1,126 \cdot 10^{-1}$ | $3,259 \cdot 10^{-1}$ | 0 |
| 7 DBI | α_1/α_2 [-] | $5,847 \cdot 10^{-3}$ | $3,87 \cdot 10^{-1}$ | 0 |
| 8 DBI | A _z /A _v [-] | $6,167 \cdot 10^{-2}$ | $4,028 \cdot 10^{-1}$ | 0 |
| 9 DBI | A _{bez} [Vs/mm] | 4,538 | $8,58 \cdot 10^{-1}$ | 0 |

Tabelle V. 1

*Ausgangsparametersatz basierend auf statistischen Daten
der Seilprobe HO9 L2
„Urindividuum“*

| | |
|-------------------------------------|------------|
| Anzahl Signalmuster | 214 |
| Anzahl Drahtbrüche | 22 |
| Korrekt klass. Drahtbrüche | 15 |
| Fehlerhaft klass. Drahtbrüche | 0 |
| Nicht eindeutig klass. Drahtbrüche | 3 |
| Gesamt erkannte Drahtbrüche | 18 |
| Nicht erkannte Drahtbrüche | 4 |
| Zu viel erkannte Drahtbrüche | 0 |
| Korrekt klassifizierte Signalmuster | 207 |

Tabelle V. 2

*-Klassifikator mit Ausgangsparametern-
Klassifikationsergebnis der Seilprobe HO9 L2*

Dieses Ergebnis zeigt bereits die generelle Eignung des Verfahrens zur Erkennung von drahtbruchverursachten Signalmustern. Mit ihm wird bereits schon bei Verwendung lediglich statistisch gewonnener Daten eine hohe Trefferquote erreichen.

Die Anwendung des so konfigurierten Klassifikators auf Messungen weiterer Seilproben und Betriebsmessungen zeigt ebenfalls gute Klassifikationsergebnisse (Tabelle V. 3). 95-98% der untersuchten Signalmuster werden korrekt klassifiziert.

Dieses Ergebnis erfüllt jedoch noch nicht den notwendigen Mustererkennungsgrad für den vorliegenden Seiltrieb (s. **V.8**). Vor allem die hohe Zahl zu viel erkannter Drahtbruchsignale beeinträchtigen dabei das Klassifikationsergebnis. Ursächlich dafür ist die Quelle der Ausgangsparameter: Die errechneten statistischen Daten basieren ausschließlich auf den Kennwerten drahtbruchverursachter Signalmuster. Andere Signalursachen, z.B. das Rauschen, bleiben somit unberücksichtigt.

Zur Erhöhung des Mustererkennungsgrades und Berücksichtigung des Rauschpegels mit den dazugehörigen Signalmustern muß der Parametersatz anhand von Trainingssignalmustern optimiert werden.

| | H91L54 | H91R50 | H91R56 | H91R62 | KORR | H91R | H91L |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|
| Anzahl Signalmuster | 276 | 211 | 243 | 260 | 213 | 3047 | 4073 |
| Anzahl Drahtbrüche | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 4 | 2 |
| Korrekt klassifizierte Drahtbrüche | 2 | 1 | 2 | 0 | | 1 | 0 |
| Fehlerhaft klassifizierte Drahtbrüche | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 |
| Nicht eindeutig klassifizierte Drahtbrüche | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 |
| Gesamt erkannte Drahtbrüche | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Nicht erkannte Drahtbrüche | 0 | 0 | 0 | 1 | | 3 | 2 |
| Zu viel erkannte Drahtbrüche | 11 DBA | | 2 DBA | | | 8 DBA | 6 DBA |
| | | 5 DBI | 9 DBI | 7 DBI | 8 DBI | 118 DBI | 101 DBI |
| | | | | | 2 DB | 10 DB | 4 DB |
| Korrekt klassifizierte Signalmuster | 265 | 206 | 232 | 252 | 203 | 2908 | 3960 |
| | 96,0% | 97,6% | 95,5% | 96,9% | 95,3% | 95,4% | 97,2% |

Tabella V. 3

-Klassifikator mit Ausgangsparametern-

Klassifikationsergebnisse unterschiedlicher Seilproben und Betriebsmessungen

V.4 Optimierung

Aufgabe der Optimierung nach **IV.3.2.3** ist es, die im Parametersatz abgelegten Kennwerte der Referenzmuster so anzupassen, daß:

1. möglichst viele der im Trainingsdatensatz enthaltenen drahtbruchverursachten Signalmuster der korrekten Ergebnisklasse zugeordnet werden,
2. die Zugehörigkeitsgrade der im Trainingsdatensatz enthaltenen drahtbruchverursachten Signalmuster zur korrekten Ergebnisklasse möglichst hoch sind,
3. die Zugehörigkeitsgrade der im Trainingsdatensatz enthaltenen drahtbruchverursachten Signalmuster zur falschen Ergebnisklasse möglichst gering sind,
4. möglichst wenige der im Trainingsdatensatz enthaltenen nicht drahtbruchverursachten Signalmuster einer der Drahtbruchergebnisklassen zugeordnet werden,
5. die Zugehörigkeitsgrade der im Trainingsdatensatz enthaltenen nicht drahtbruchverursachten Signalmuster zu den Drahtbruchergebnisklassen möglichst gering sind.

V.4.1 Trainingsdatensatz

Der erforderliche Trainingsdatensatz ist entsprechend den in **V.4** aufgestellten Forderungen zu formulieren. Er enthält neben den Kennwerten der zu Grunde liegenden Signalmuster auch das zugehörige, korrekte Klassifikationsergebnis in Form der Zugehörigkeitsgrade zu den beiden Drahtbruchergebnisklassen. Darüber hinaus sind auch die Zugehörigkeitsgrade zu den Komplementärklassen hinterlegt, die nur für die Optimierung als korrekte Ergebnisklasse nicht drahtbruchverursachter Signalmuster Verwendung finden. Die Zugehörigkeit zur fiktiven Ergebnisklasse NOTDB errechnet sich zu:

$$\mathbf{ZG}_{NOTDB} = \frac{\mathbf{ZG}_{NOTDBA} + \mathbf{ZG}_{NOTDBI}}{2} \quad \text{Gl.47}$$

Ein Signalmuster wird der Klasse NOTDB zugeordnet, wenn es weder der Klasse DBA noch der Klasse DBI zugewiesen werden kann.

Ein Trainingsdatensatz enthält somit:

1. Betrag der x-Koordinate der Trainingsmuster, zur Identifikation der Lage des Signalmusters
2. Beträge der Kennwerte A , α_1 , α_2 , Δx , A_z , $\Delta x_z/\Delta x_v$, α_1/α_2 , A_z/A_v , A_{bez} der Trainingsmuster
3. Beträge der korrekten Zugehörigkeitsgrade ZG_{DBA} , ZG_{DBI} , ZG_{NOTDBA} , ZG_{NOTDBI} der Trainingsmuster gemäß Tabelle V. 4
4. Chromosom des Urindividuums gemäß Tabelle V. 1.

Den Zielsetzungen des Optimierungsprozesses folgend, enthält der Trainingsdatensatz neben Signalmustern, die den beiden Ergebnisklassen DBA und DBI angehören, auch nicht drahtbruchverursachte Muster (fiktive Klasse NOTDB).

Gebildet wird der Trainingsdatensatz aus Signalmustern der Proben *HO9 L2*, *H91 L54* und *H91 R56*. Er umfaßt insgesamt 591 Signalmuster (Tabelle V. 5)

| Ursache des Trainingsmusters | vorgegebene Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisklasse: | | | |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|------|--------|--------|
| | DBA | DBI | NOTDBA | NOTDBI |
| <i>Äußerer Drahtbruch</i> | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| <i>Innerer Drahtbruch</i> | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| <i>Kein Drahtbruch</i> | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 |

Tabelle V. 4

Festlegung der Zugehörigkeitsgrade zu den Ergebnisklassen in Abhängigkeit von der Ursache des Signalmusters

| Ergebnisklasse | Anzahl Signalmuster |
|----------------|---------------------|
| DBA | 9 |
| DBI | 11 |
| NOTDB | 569 |
| Gesamt | 589 |

Tabelle V. 5

Zusammensetzung der Signalmuster im Trainingsdatensatz

Wendet man den mit den Ausgangsparametern eingestellten Klassifikator auf die Trainingsmuster an, erhält man das Klassifikationsergebnis nach Tabelle V. 6. Auffallend ist die wiederum hohe Zahl Fehlklassifizierung nicht

fallend ist die wiederum hohe Zahl Fehlklassifizierung nicht drahtbruchverursachter Signalmuster.

| Trainingsmuster | Klassifikationsergebnis: Trainingsmuster erkannt als: | | |
|------------------|----------------------------------------------------------|-----|-------|
| | DBA | DBI | NOTDB |
| DBA (insg. 9) | 8 | 0 | 1 |
| DBI (insg. 11) | 0 | 11 | 0 |
| NOTDB (insg.569) | 2 | 15 | 551 |

Tabelle V. 6

*-Klassifikator mit Ausgangsparametern-
Klassifikationsergebnis des Trainingsdatensatzes*

V.4.2 Größe der Population / Skalierungsfaktor der Selektionswahrscheinlichkeit

Aufgrund der Chromosomenlänge von 90 Genen, aus den insgesamt 90 Parametern gemäß Tabelle V. 1, und der Verwendung einer skalierten Selektionswahrscheinlichkeit (s. IV.3.3.3.2) ist eine Populationsgröße von 50 Individuen ausreichend. Der Skalierungsfaktor wird nach Goldberg zu $f_S=2$ gesetzt [17] (IV.3.3.3.2).

IV.4.3 Mutationswahrscheinlichkeit / Kreuzungswahrscheinlichkeit

Gemäß Goldberg [17] werden die Wahrscheinlichkeiten der genetischen Operationen wie folgt vorgegeben:

- $p_M=0,6$
- $p_{M,Gen}=0,03$
- $p_K=0,6$

V.4.4 Intervallgrenzen für m , σ

Die dezimale Kodierung der Parameter im Chromosom jedes Individuums bedingt, daß für die Mutationsoperationen gemäß **IV.3.3.4.3.1** eine Festlegung der Intervallgrenzen zu erfolgen hat.

Dabei ist zu beachten, daß die für den optimierten Klassifikationsalgorithmus erforderlichen Parameterwerte innerhalb dieser Grenzen erreichbar sein müssen. Die Intervallbreite ist damit recht großzügig zu wählen. Als Orientierungshilfe können die Ausgangsparameter dienen, an denen sich bereits die Verteilungsbreite der zu erwartenden Kennwerte ablesen läßt. Ausgehend davon hat sich folgende Festlegung der Intervallgrenzen als hinreichend erwiesen:

$$\sigma^* = [0; 2 \cdot \sigma_0] \quad \text{Gl. 48a}$$

$$m^* = [m_0 - 2 \cdot \sigma_0; m_0 + 2 \cdot \sigma_0] \quad \text{Gl. 48b}$$

$$CF^* = [0; 100] \quad \text{Gl. 48c}$$

Die Einstellungen der Funktion $f_G(G)$ nach **IV.3.3.4.3.1** werden so gewählt, daß für 30 aufeinander folgende Generationen die gesamte Intervallbreite für die Mutation zur Verfügung steht ($G_1=30$). Danach erfolgt gemäß Gl. 46 eine lineare Reduzierung bis zur Generationenzahl $G_2=270$. Die Mindestintervallbreite wird festgelegt zu: $f_{G_0}=0,05$.

V.4.5 Einstellung der Fitnessfunktion

Der Optimierungsprozeß wird in erster Linie durch die Einstellung der Fitnessfunktion gelenkt. Nach ihr richtet sich die Entwicklung der Individuen, so daß ihre Definition entscheidenden Einfluß auf den Verlauf der Optimierung und letztendlich auf die Ausprägung des optimierten Individuums haben.

Die Gestalt der Fitnessfunktion mit den Faktoren nach Gl. 39 erfordert zunächst die Festlegung der an den optimierten Klassifikator gestellten Eigenschaften. Hauptforderung an den Klassifikationsalgorithmus ist eine möglichst hohe Quote korrekt klassifizierter Signalmuster. Daneben sollen die Beträge der erreichten Zugehörigkeitsgrade zur korrekten Ergebnisklasse gegen Eins streben. Fehlklassifizierungen

von äußeren Drahtbrüchen als *DBI* und umgekehrt wiegen weniger schwer als eine Nichterkennung des Drahtbruches. Die generelle Einstellung des Klassifikators sollte dazu führen, daß eher zu viel als zu wenig Drahtbrüche erkannt werden.

Aus diesen Forderungen lassen sich für die Einzelanteile der Fitnessfunktion folgende Beziehungen aufstellen:

$$\begin{aligned}
 f_{\kappa, DBA \rightarrow DBI} &= f_{\kappa, DBI \rightarrow DBA} \\
 &\leq \\
 f_{\kappa, NOTDB \rightarrow DBA} &= f_{\kappa, NOTDB \rightarrow DBI} \\
 &\leq \\
 f_{\kappa, DBA \rightarrow NOTDB} &= f_{\kappa, DBI \rightarrow NOTDB}
 \end{aligned}
 \tag{Gl.49}$$

Der Faktor f_5 ist möglichst klein zu wählen, damit der Betrag der Fitnessfunktion nicht ausschließlich durch den Anteil F_1 dominiert wird, was dazu führen würde, daß Verbesserungen im Anteil F^2 dem Individuum keinen merklichen Vorteil bei der Reproduktion bringt.

F^2 kann bei zwei Ergebnisklassen und einer fiktiven Klasse Werte zwischen 0 und 3 annehmen. Ist $f_5 = 1$ gewählt, wird die Optimierung zunächst die Tendenz haben, die Fehlklassifizierungen zu reduzieren. Liegen dann nur noch ein oder zwei Fehlklassifizierungen vor, bekommen die Fehlerquadrate zunehmend Gewicht für die Ausrichtung der weiteren Optimierung, so daß sich in der Folge Individuen mit geringerem quadratischen Fehlern durchsetzen.

Die Wahl der weiteren Faktoren ist in Tabelle V. 7 dargestellt. Auch hier gilt, daß die Faktoren f_{κ} möglichst klein gewählt werden, um dem Anteil F_1 in der Fitnessfunktion nicht zu viel Gewicht zu geben.

Für die Optimierungsläufe werden drei verschiedene Einstellungen der Fitnessfunktion gewählt (Tabelle V. 7).

| | Einstellung 1 | Einstellung 2 | Einstellung 3 | Einstellung 4 |
|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| f_5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $f_{K,DBA \rightarrow DBI} = f_{K,DBI \rightarrow DBA}$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $f_{K,NOTDB \rightarrow DBA} = f_{K,NOTDB \rightarrow DBI}$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $f_{K,DBA \rightarrow NOTDB} = f_{K,DBI \rightarrow NOTDB}$ | 2 | 2 | 2 | 2 |
| k | 5 | 6 | 7 | 8 |

Tabelle V. 7

Einstellungen der Fitnessfunktion für die Optimierungen

V.4.6 Optimierung des Kennwertumfanges

Wie in **IV.2.1** beschrieben, handelt es sich bei den Kennwerten zur Beschreibung der Referenzmuster um eine willkürliche Auswahl. Im Rahmen der Optimierung des Parametersatzes ist es daher notwendig die verwendeten Kennwerte auf ihre tatsächliche Eignung für die vorliegende Problemstellung zu untersuchen. Dies erfolgt durch Entfall von Kennwerten bei einzelnen Individuen (**IV.3.3.1**).

Eine gewisse Anzahl von Kennwerten ist für die Klassifikation jedoch notwendig, um eine ausreichend komplexe Beurteilung der Signalmuster im Hinblick auf eine zufriedenstellende Abgrenzung zum Rauschen zu gewährleisten. Da die Gefahr besteht, daß für einen gebildeten Trainingsdatensatz die Untersuchung anhand nur sehr weniger Kennwerte zu ausreichenden Ergebnissen führen kann, und der Optimierungsprozeß in Richtung entsprechender Individuen abläuft, ist eine Mindestkennwertzahl zu definieren.

Für das vorliegende Problem wird eine Mindestkennwertzahl von fünf Kennwerten gesetzt.

V.4.7 Einstellung der Defuzzifizierung

Die Defuzzifizierung nach **IV.3.1.3** ist mit Hilfe des Faktors k an die Problemstellung anpaßbar. Je größer k gewählt wird, desto größer muß der Abstand der Gesamterfülltheitsgrade der Regeln der Ergebnisklasse zu dem ihrer Komplementärklasse sein, um ein Signalmuster der Ergebnisklasse zuzuordnen zu können. Es ist daher ein

möglichst hoher Wert für k anzustreben. In den ausgeführten Optimierungsläufen wird k von $k=5$ auf $k=8$ schrittweise erhöht.

Der Faktor k^* zur Einstellung der Vertrauensgrenze ist für die Optimierung auf den Kleinstwert $k^*=1$ fest eingestellt. Er kann aber später bei der Anwendung des optimierten Parametersatzes noch beliebig erhöht werden.

V.4.8 Abbruchkriterien

Die Festlegung der Abbruchkriterien für den Optimierungsprozeß hat sich an Erfahrungswerten zu orientieren. Dabei ist jedoch zu beachten, daß ein optimierter Klassifikator, um für eine gestellte Aufgabe geeignet zu sein, eine Mindestquote korrekt klassifizierter Signalmuster erfüllen muß.

Die Mindestanforderung an den erreichten Mustererkennungsgrad des Klassifikationsalgorithmus läßt sich aus bekannten Ablegedrahtbruchzahlen ableiten. Nationale Normen über die Feststellung der Ablegereife von Drahtseilen, z.B. DIN 15020 T2 [21], arbeiten mit Ablegedrahtbruchzahlen, die sich auf definierte Seillängen und die Anzahl der tragenden Drähte in der Außenlitze beziehen. Läßt man bei der Erkennung von Drahtbrüchen einen Fehler von maximal 10% zu, so bedeutet das gemäß DIN 15020 T2 [21] für ein 38mm Seil mit 208 tragenden Drähten in den Außenlitzen:

| Ablegedrahtbruchzahl nach DIN 15020 für 208 tragende Drähte in den Außenlitzen, Triebwerksklasse 5m | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| Bezugslänge | Anzahl sichtbarer Drahtbrüche | 10% / Bezugslänge | 10% / 1000mm |
| 6•d | 9 | 0,9 | 3,9 |
| 30•d | 18 | 1,8 | 1,6 |

Tabelle V. 8

Ablegedrahtbruchzahl für Schrägaufzugseile

Der maximal zulässige Fehler entspricht somit 1,6 sichtbaren Drahtbrüchen auf 1000mm Seillänge. Diese Forderung bezieht sich zwar nur auf sichtbare, d.h. äußere Drahtbrüche, läßt sich aber als Anhaltswert für alle Drahtbrüche verwenden. Die magnetinduktiven Streuflußmessungen liefern für das genannte Seil durchschnittlich ungefähr 50 Signalmuster auf 1000mm. Davon sind nach obig angeführter Forde-

rung 48,4 Muster korrekt zu erkennen. Der Mustererkennungsgrad M_{ges} muß daher bei $>96,8\%$ liegen. Gefordert wird für die vorliegende Problemstellung: $M_{ges} \geq 99\%$.

Nach Erreichen des notwendigen Kriteriums $M_{ges} \geq 99\%$ wird die Optimierung beendet, wenn 100 Generationen lang keine Erhöhung der Fitness erreicht werden konnte.

Unabhängig von diesen Kriterien wird die Optimierung abgebrochen, wenn die Fitness den Wert unendlich erreicht, d.h. beide Fehleranteile in Gl.38 zu Null werden oder die Generationenzahl 1000 erreicht wird und damit innerhalb von 1000 Generationen kein ausreichend optimiertes Individuum gebildet werden konnte.

| Einstellungen des Optimierungsprozesses | |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Größe der Population | 50 |
| Mutationswahrscheinlichkeit | $p_M=0,6$ |
| Mutationswahrscheinlichkeit eines Gens | $p_{M,Gen}=0,03$ |
| Kreuzungswahrscheinlichkeit | $p_K=0,6$ |
| Intervallgrenzen für σ | $0 \leq \sigma \leq 2 \cdot \sigma_0$ |
| Intervallgrenzen für m | $m_0 - 2 \cdot \sigma_0 \leq m \leq m_0 + 2 \cdot \sigma_0$ |
| Funktion $f_G(G)$ | $G_1=30$ $G_2=270$ $f_{G0}=0,05$ |
| Skalierungsfaktor für die Selektionswahrscheinlichkeit | $f_S=2$ |
| Anzahl der Besten | $n_{Beste}=3$ |
| Fitnessfunktion | Gemäß Tabelle V. 7 |
| Optimierung des Kennwerteumfangs? | Ja |
| Mindestkennwerteumfang je Klasse | 5 |
| Defuzzifizierung | k gemäß Tabelle V. 7 $k^*=1$ |
| Abbruchkriterien: | <ol style="list-style-type: none"> 1. $M_{ges} \geq 99\%$ und Konstanz der Fitness über mehr als 100 Generationen 2. Erreichen von $F_i \rightarrow \infty$ 3. Erreichen von Generation 1000 |

Tabelle V. 9

Einstellungen des Optimierungsprozesses

V.5 Optimierte Parametersätze

Mit den vorgegebenen Einstellungen (Tabelle V. 9, Tabelle V. 7) werden mehrere Optimierungsläufe je Einstellung durchgeführt. Dies ist notwendig, da der genetische Algorithmus sich relativ schnell in einem Bereich um ein lokales Maximum der Fitnessfunktion „festsetzt“.

Sieben ausgewählte optimierte Parametersätze werden im folgenden näher betrachtet.

V.5.1 Optimierungsergebnisse

Die Ergebnisse der ausgewählten Optimierungsläufe sind in Tabelle V. 10 und Tabelle V. 11 dargestellt.

Mit jeder der vier Einstellungen gemäß Tabelle V. 7 läßt sich ein Parametersatz finden, der alle Trainingsmuster korrekt klassifiziert. Die Erkennung von äußeren Drahtbrüchen gelingt dabei offensichtlich am einfachsten. Alle hier betrachteten optimierten Klassifikatoren erkennen äußere Drahtbrüche in den Trainingssignalmustern vollständig und weisen ihnen Zugehörigkeitsgrade von $ZG_{DBA}=1$ zu. Aufgrund der Auffälligkeit dieser Signalmuster in magnetinduktiven Streuflußmessungen (**IV.1**) überrascht dies nicht.

Die Unterscheidung der Signale innerer Drahtbrüche zum Rauschen dagegen ist problematischer. Der Ausgangsklassifikator erkennt zwar alle inneren Drahtbrüche korrekt, einher geht dies allerdings mit einer hohen Zahl als *DBI* klassifizierter Rauschsignale. Die optimierten Klassifikatoren erreichen die vollständige Abgrenzung innerer Drahtbrüche vom Rauschpegel, auch wenn die Zugehörigkeitsgrade einzelner Trainingsmuster der entsprechenden Klassen nicht immer den Wert Eins erreichen.

Zwei optimierte Klassifikatoren vollziehen allerdings die Klassifikation der Trainingsdaten fehlerlos!

Betrachtet man die aus dem Optimierungsprozessen resultierenden Auswahlen der berücksichtigten Kennwerte, zeigt sich, daß sich hinsichtlich der eingesetzten Kennwerte kein Klassifikator einem anderen vollständig gleicht. Es existieren lediglich Übereinstimmungen bei den verwendeten Kennwerten für eine Ergebnisklasse.

Jeder Optimierungsprozeß ist auf ein anderes lokales Maximum der Fitnessfunktion hin konvergiert. Dies zeigt sich nicht nur beim Vergleich mehrerer Optimierungen unterschiedlicher Voreinstellung, sondern auch bei Beibehaltung der Vorgaben. Daraus resultiert, daß mit einer Voreinstellung immer mehrere Optimierungsläufe durchzuführen sind, um aus den erzielten Ergebnissen das mit der höchsten Fitness auswählen zu können.

Auffallend ist, daß alle Kennwerte in den aufgeführten Klassifikatoren, allerdings mit unterschiedlicher Häufigkeit, Verwendung finden. Lediglich der Kennwert *Amplitude A* der Ergebnisklasse DBI bleibt unberücksichtigt, ist somit für die Erkennung innerer Drahtbrüche anscheinend wenig geeignet. Dies läßt sich auf den Umstand zurückführen, daß der Rauschpegel zum Teil Amplituden erreicht, die denen von Signalverläufen innerer Drahtbrüche entspricht (s. **IV.1**).

Interessanterweise ist der Kennwert A_v der Ergebnisklasse DBI in 6 von 7 Klassifikatoren enthalten. Das Vorhandensein eines lokalen Maximums mit entsprechender Amplitude ist offenbar ein geeignetes Kriterium zur Erkennung von Signalmustern der Klasse DBI.

Von allen Klassifikatoren verwendet werden die Kennwerte α_2 , A_z/A_v und A_{bez} . Es kann daher davon ausgegangen werden, daß sie vor allem zur Unterscheidung vom Grundrauschen notwendig sind. Hier ist besonders die Bedeutung des Kennwertes A_{bez} herauszustellen, der explizit für die Unterscheidung zwischen Rauschen und drahtbruchverursachten Signalmustern definiert wurde (s. **IV.2.1**).

| Parametersätze | A | 8 | 10 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|----------|---------------------|------------------|----------|------------------|------------------|
| Einstellung gem. Tabelle V. 7 | 2* | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| Benötigte Generationenzahl | | 355 | 56 2 | 745 | 292 | 36 2 | 779 | 678 |
| Fitness | $5,0 \cdot 10^{-2}$ | $4,8 \cdot 10^2$ | ∞ | $2,1 \cdot 10^1$ | $2,5 \cdot 10^4$ | ∞ | $1,8 \cdot 10^4$ | $5,4 \cdot 10^3$ |
| Mustererkennungsgrad [%] | 93,2 | 100 | 10 0 | 100 | 100 | 10 0 | 100 | 100 |
| Erkennung der DBA als | | | | | | | | |
| DBA | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| DBI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NOTDB | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Erkennung der DBI als | | | | | | | | |
| DBA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DBI | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| NOTDB | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Erkennung der NOTDB als | | | | | | | | |
| DBA | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DBI | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NOTDB | 551 | 569 | 56 9 | 569 | 569 | 56 9 | 569 | 569 |
| F ² DBA | $1,1 \cdot 10^{-1}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F ² DBI | 0 | $2,3 \cdot 10^{-2}$ | 0 | $4,8 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | 3 | | 2 | | | | | |
|----------------------|--|----------------------|---|---|---|----------------------|---|----------------------|----------------------|
| F ² NOTDB | | 1,7·10 ⁻² | 0 | 0 | 0 | 4,0·10 ⁻⁵ | 0 | 6,0·10 ⁻⁵ | 1,9·10 ⁻⁴ |

* Einstellung 2 nur für die Bewertung der Ausgangsparameter

Table V. 10

Ergebnisse der Optimierungen mittels genetischem Algorithmus

Parametersatz A: Ausgangsparametersatz; Parametersätze 8,...,20: Ausgewählte optimierte Parametersätze

| Klasse | | Optimierungslauf | | | | | | |
|-------------------------|---|------------------|----|----|----|----|----|----|
| | | 8 | 10 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| DBA | A | 8 | 10 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| A | X | X | X | X | X | | X | X |
| α_1 | X | X | X | X | | X | X | X |
| α_2 | X | | X | X | | X | | |
| Δx | X | X | X | | | X | | X |
| A_v | X | | | X | X | | X | |
| $\Delta x_z/\Delta x_v$ | X | X | X | X | X | | | X |
| α_1/α_2 | X | | X | | X | | X | X |
| A_z/A_v | X | | X | X | X | X | X | |
| A_{bez} | X | X | | X | X | X | X | X |

| Klasse | | Optimierungslauf | | | | | | |
|-------------------------|---|------------------|----|----|----|----|----|----|
| | | 8 | 10 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| DBI | A | 8 | 10 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| A | X | | | | | | | |
| α_1 | X | | X | X | X | | X | X |
| α_2 | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Δx | X | X | | | X | X | X | X |
| A_v | X | X | X | X | | X | X | X |
| $\Delta x_z/\Delta x_v$ | X | | | | X | X | X | X |
| α_1/α_2 | X | | X | X | | X | X | X |
| A_z/A_v | X | X | X | X | X | X | X | X |
| A_{bez} | X | X | X | X | X | X | X | X |

Tabelle V. 11

Kennwerteumfang der optimierten Parametersätze

Parametersatz A: Ausgangsparametersatz;

Parametersätze 8,...,20: Ausgewählte optimierte Parametersätze

V.6 Anwendung des optimierten Klassifikators

Der Musterklassifikator nach **V.1** wird mit dem Parametersatz nach Optimierungslauf 18 eingestellt (Tabelle V. 12) und auf vorliegende Streuflußmessungen verschiede-

ner Seilproben und Betriebsmessungen angewendet. Das Ergebnis ist in Tabelle V. 13 dargestellt. Für die aufgeführten Auswertungen ist folgende Einstellung gewählt:

- $k=7$
- $k^*=3$

| Seiltrieb: | | Thyssen Krupp Stahl AG - Schrägaufzug Hochofen 9/Ha | | | | |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Seiltyp: | | CASAR Turboplast 38mm sS 1770 N/mm² | | | | |
| Optimierte Parameter nach Optimierung 18 | | | | | | |
| Kennwert | | m | σ_1 | σ_2 | CF ₁ | CF ₂ |
| 1 DBA | A [Vs/mm] | | | | | |
| 2 DBA | α_1 [Vs/mm ²] | $136,7 \cdot 10^{-5}$ | $24,98 \cdot 10^{-5}$ | Randm. | 32,22 | |
| 3 DBA | α_2 [Vs/mm ²] | $182,3 \cdot 10^{-5}$ | $67,64 \cdot 10^{-5}$ | Randm. | 0 | |
| 4 DBA | Δx [mm] | 17,3 | 5,142 | 6,058 | 51,28 | 2,280 |
| 5 DBA | A_v [Vs/mm] | | | | | |
| 6 DBA | $\Delta x_z / \Delta x_v$ [-] | | | | | |
| 7 DBA | α_1 / α_2 [-] | | | | | |
| 8 DBA | A_z / A_v [-] | $-4,530 \cdot 10^{-1}$ | $5,199 \cdot 10^{-1}$ | $8,149 \cdot 10^{-1}$ | 75,74 | 19,01 |
| 9 DBA | A_{bez} [Vs/mm] | 6,226 | 1,283 | Randm. | 0 | |
| 1 DBI | A [Vs/mm] | | | | | |
| 2 DBI | α_1 [Vs/mm ²] | | | | | |
| 3 DBI | α_2 [Vs/mm ²] | $68,62 \cdot 10^{-5}$ | $20,28 \cdot 10^{-5}$ | $30,16 \cdot 10^{-5}$ | 16,66 | 0 |
| 4 DBI | Δx [mm] | 18,98 | 2,720 | 5,472 | 30,22 | 0 |
| 5 DBI | A_v [Vs/mm] | $93,50 \cdot 10^{-5}$ | $47,65 \cdot 10^{-5}$ | $57,69 \cdot 10^{-5}$ | 0,2123 | 92,02 |
| 6 DBI | $\Delta x_z / \Delta x_v$ [-] | $6,352 \cdot 10^{-2}$ | $3,300 \cdot 10^{-1}$ | $2,643 \cdot 10^{-1}$ | 38,61 | 4,483 |
| 7 DBI | α_1 / α_2 [-] | $2,110 \cdot 10^{-2}$ | $4,228 \cdot 10^{-1}$ | $7,113 \cdot 10^{-1}$ | 3,517 | 0,2108 |
| 8 DBI | A_z / A_v [-] | $3,101 \cdot 10^{-1}$ | $2,995 \cdot 10^{-1}$ | $5,006 \cdot 10^{-1}$ | 85,47 | 54,36 |
| 9 DBI | A_{bez} [Vs/mm] | 4,348 | $3,949 \cdot 10^{-1}$ | Randm. | 13,09 | |

Tabelle V. 12

Optimierter Parametersatz nach Optimierungslauf 18

| Bezeichnung der Seilprobe | H09 L2 | H91L54 | H91R50 | H91R56 | H91R62 | KORR | H91R | H91L |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------------|
| Anzahl Signalmuster | 214 | 276 | 211 | 243 | 260 | 213 | 3047 | 4073 |
| Anzahl Drahtbrüche | 22 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 4 | 2 |
| Korrekt klass. Drahtbrüche | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 2 | 0 |
| Fehlerhaft klass. Drahtbrüche | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 |
| Nicht eindeutig klass. Drahtbrüche | 2 | 2 | 1 | 20 | 1 | | 1 | 1 |
| Gesamt erkannte Drahtbrüche | 20 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 2 |
| Nicht erkannte Drahtbrüche | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0 |
| Zu viel erkannte Drahtbrüche | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| Korrekt klassifizierte Signalmuster | 212 | 276 | 211 | 243 | 260 | 213 | 5 DBI 3041 | 1 DBI 4072 |
| M _{ges} | 99,1% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 99,8% | 100,0% |

Tabelle V. 13

-Optimierter Klassifikator-
 Klassifikationsergebnisse unterschiedlicher Seilproben und Betriebsmessungen

Bei allen Messungen werden deutlich höhere Mustererkennungsgrade erreicht als mit dem Ausgangsklassifikator (Tabelle V. 3). Die Mustererkennungsgrade erfüllen die Forderung $M_{ges} > 99\%$, wobei mehrfach eine 100%-ige Erkennung der untersuchten Signalmuster erreicht wird.

Auffällig ist der hohe Anteil nicht eindeutig klassifizierter Drahtbrüche. Dies bedeutet, daß die Zugehörigkeitsgrade zu beiden Ergebnisklassen identisch sind.

Da die korrekte Zuweisung zu den Klassen DBA und DBI an den Trainingsdaten fast vollständig erreicht wird, gelingt dies auch folgerichtig an der Messung der Probe *HO9 L2* noch am besten. Bei den anderen Messungen ist die entsprechende Abgrenzung nicht sicher durchzuführen. Ursache dafür ist das Verwischen der Grenzen zwischen inneren und äußeren Drahtbrüchen (s. IV.3). Im genetischen Algorithmus werden solche Fälle als korrekte Klassifizierung gewertet, da im Vordergrund die Erkennung drahtbruchverursachter Signalmuster steht und nicht die Trennung der Schadensbilder.

Die Falschklassifizierung von Rauschmustern als *DBI* ist gegenüber dem Klassifikationsergebnis mit dem Ausgangsparametersatz deutlich reduziert und nur bei den beiden Betriebsmessungen (*H91R*, *H91L*) erfolgt eine sehr geringe Zahl dieser Fehler.

Die Ergebnisse zeigen die hohe Leistungsfähigkeit des Musterklassifikators zur Erkennung von Drahtbrüchen mittels magnetinduktiver Streufeldmessungen.

Die Ursachen für die wenigen nicht erkannten Drahtbrüche sind unterschiedlich:

- In der Messung der Probe *HO9 L2* werden zwei Drahtbrüche nicht erkannt. Abbildung V. 1 (x-Koordinate 1382mm) und Abbildung V. 2 (x-Koordinate 1662 mm) zeigen diese beiden Muster. Der äußere Drahtbruch bei 1382 mm ist in der Messung tatsächlich nicht erkennbar. Er ist durch überlagerte andere Signalanteile bis zur Unkenntlichkeit verzerrt. Das Drahtbruchsignal bei 1662mm ist ebenfalls stark verzerrt. Die linke Hälfte des Signalverlaufs ist zwar noch deutlich erkennbar, das rechte lokale Maximum hat allerdings eine Amplitude Nahe Null und liefert daher nur eine sehr geringe Zugehörigkeit zu dem Kennwert A_z/A_v .
- Die Nichterkennung eines Drahtbruches bei der Messung *H91R* ist auf die Ausbildung des rechten, lokalen Maximum des betreffenden Signalmusters zurückzuführen. In Abbildung V. 4 ist deutlich erkennbar, daß dieses Extremum des Drahtbruchmusters mit der x-Koordinate 61589,5 mm negativ ist.

Gemäß **IV.2.3** wird daher nicht dieses sondern das folgende lokale Maximum für die Bildung des Signalmusters herangezogen. Das so gebildete Muster erfüllt aber allein aufgrund seiner Signaltbreite Δx die Kriterien für ein Drahtbruchsignal nicht – der Drahtbruch bleibt somit unerkannt.

Die Vorteile der komplexen Signalanalyse mittels Fuzzy-Logic zeigt sich beispielhaft in Abbildung V. 3. Der erkennbare Signalverlauf rührt von Drahtbruchhäufungen in der Kernlitze der Stahlseileinlage her, also nicht von Drahtbrüchen aus den tragenden Außenlitzen. Obwohl die Amplituden der beiden vorhandenen lokalen Minima durchaus Beträge von Signalmustern innerer oder äußerer Drahtbrüche aufweisen, erreichen die aus den vorhandenen Extrema gebildeten Signalmuster nach **IV.2.3** keine Zugehörigkeitsgrade größer Null zu den beiden Ergebnisklassen. Einfache Drahtbrucherkenntungsverfahren wie das Grenzwertüberschreitungsverfahren würden diesen Signalverlauf als Drahtbruch zählen.

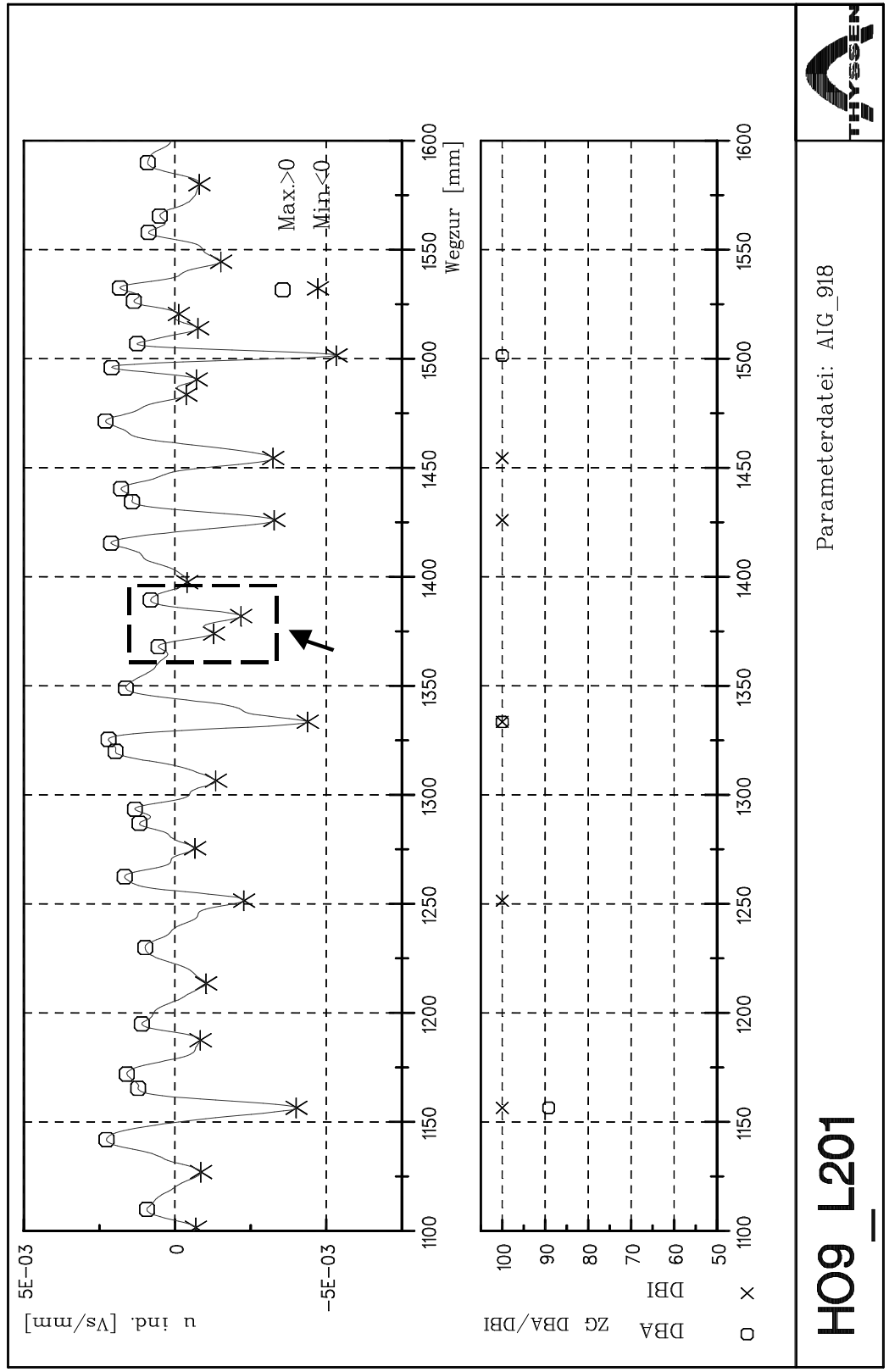


Abbildung V. 1

Seilprobe HO9 L2 – Klassifikationsergebnis mit optimiertem Klassifikator
 Induzierte Spannung mit lokalen Extrema (oben) und Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisklassen (unten)
 Nicht erkannter Drahtbruch bei 1382 mm

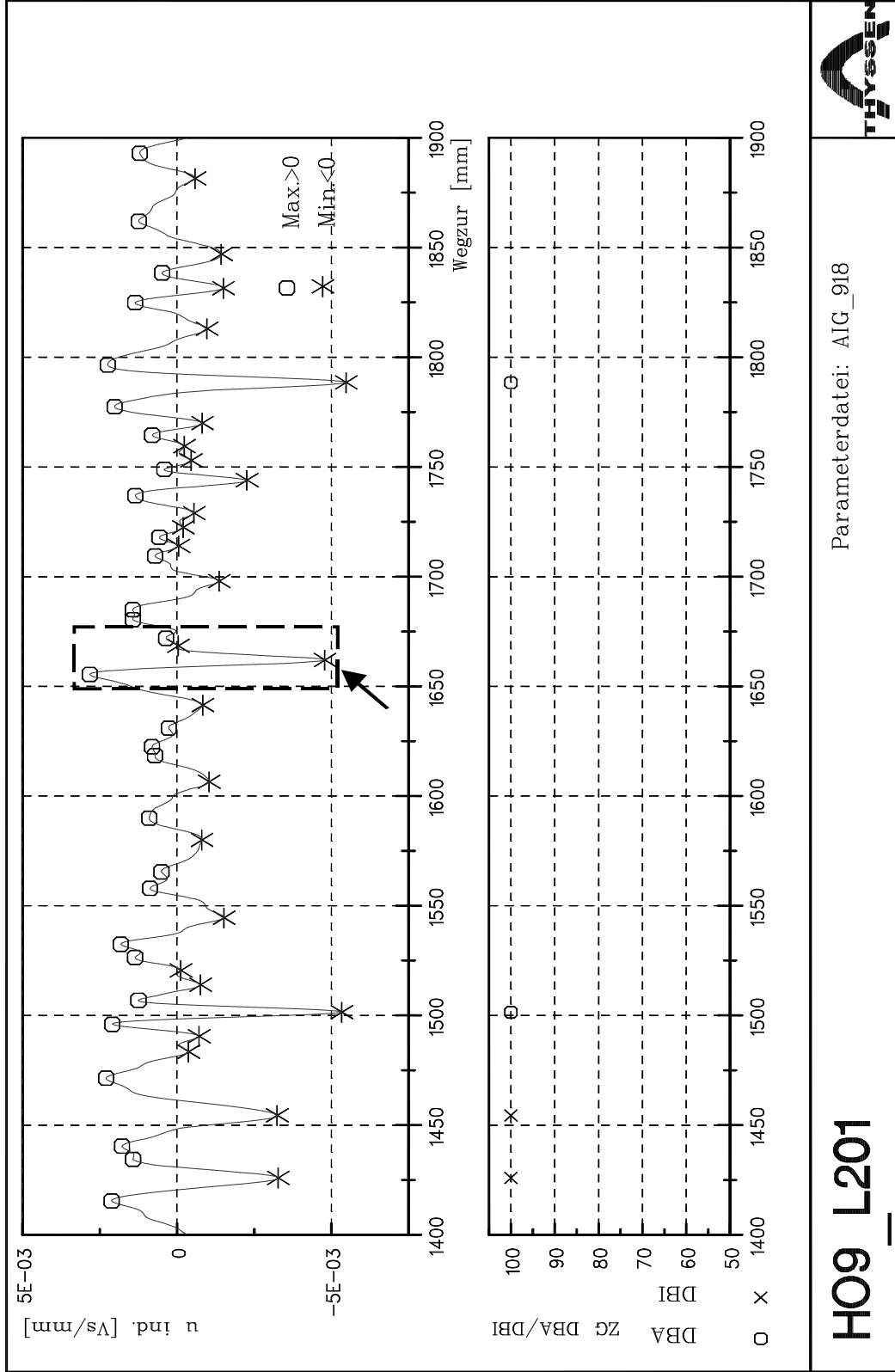


Abbildung V. 2

Seilprobe HO9 L2 – Klassifikationsergebnis mit optimiertem Klassifikator
 Induzierte Spannung mit lokalen Extrema (oben) und Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisklassen (unten)
 Nicht erkannter Drahtbruch bei 1662mm

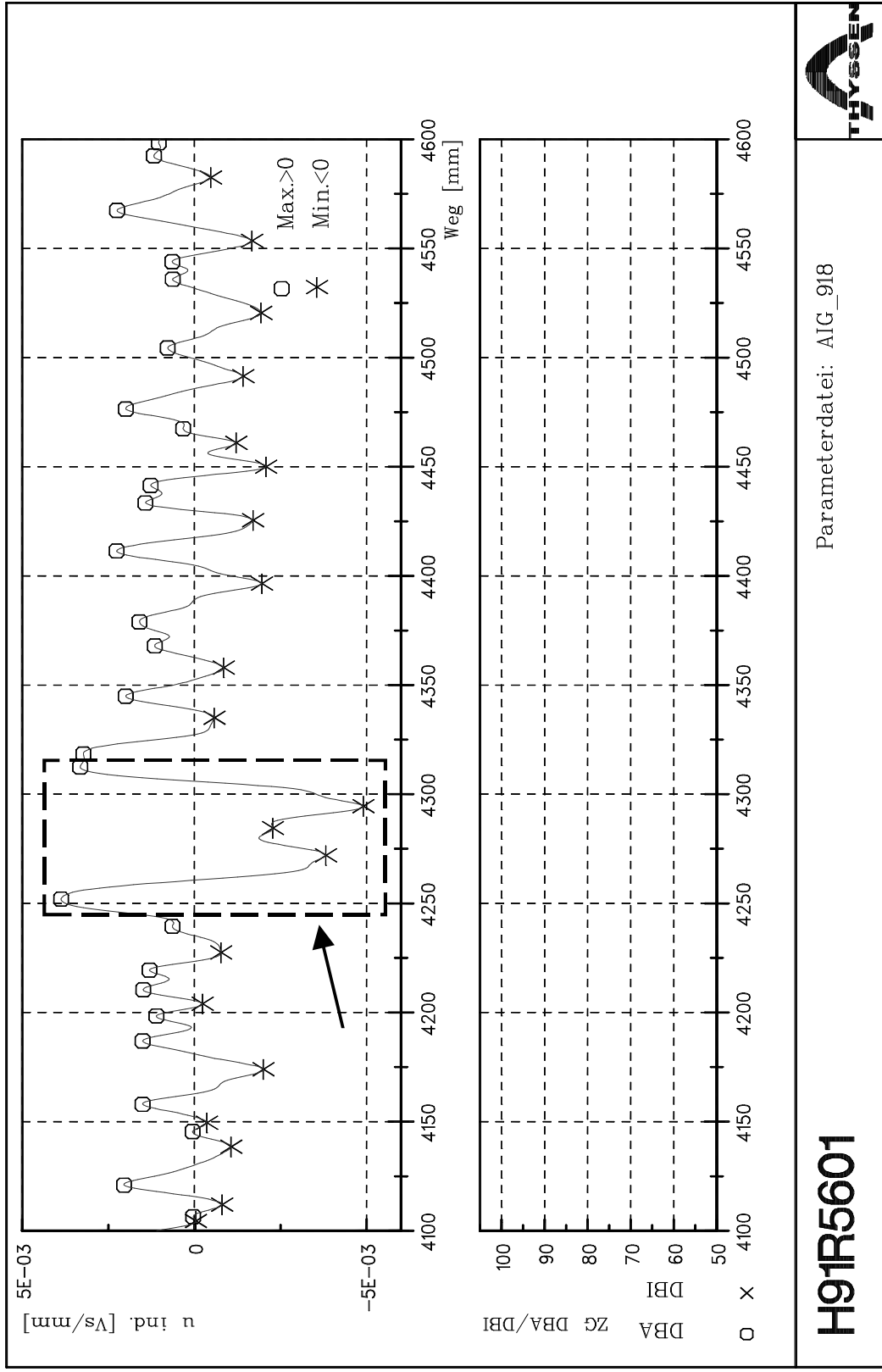


Abbildung V. 3

Seilprobe H91 R56 – Klassifikationsergebnis mit optimiertem Klassifikator
 Induzierte Spannung mit lokalen Extrema (oben) und Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisklassen (unten)
 Signalverlauf zwischen 4250 mm und 4350 mm durch Drahtbruchhäufung in der Kernseele der Stahleinlage

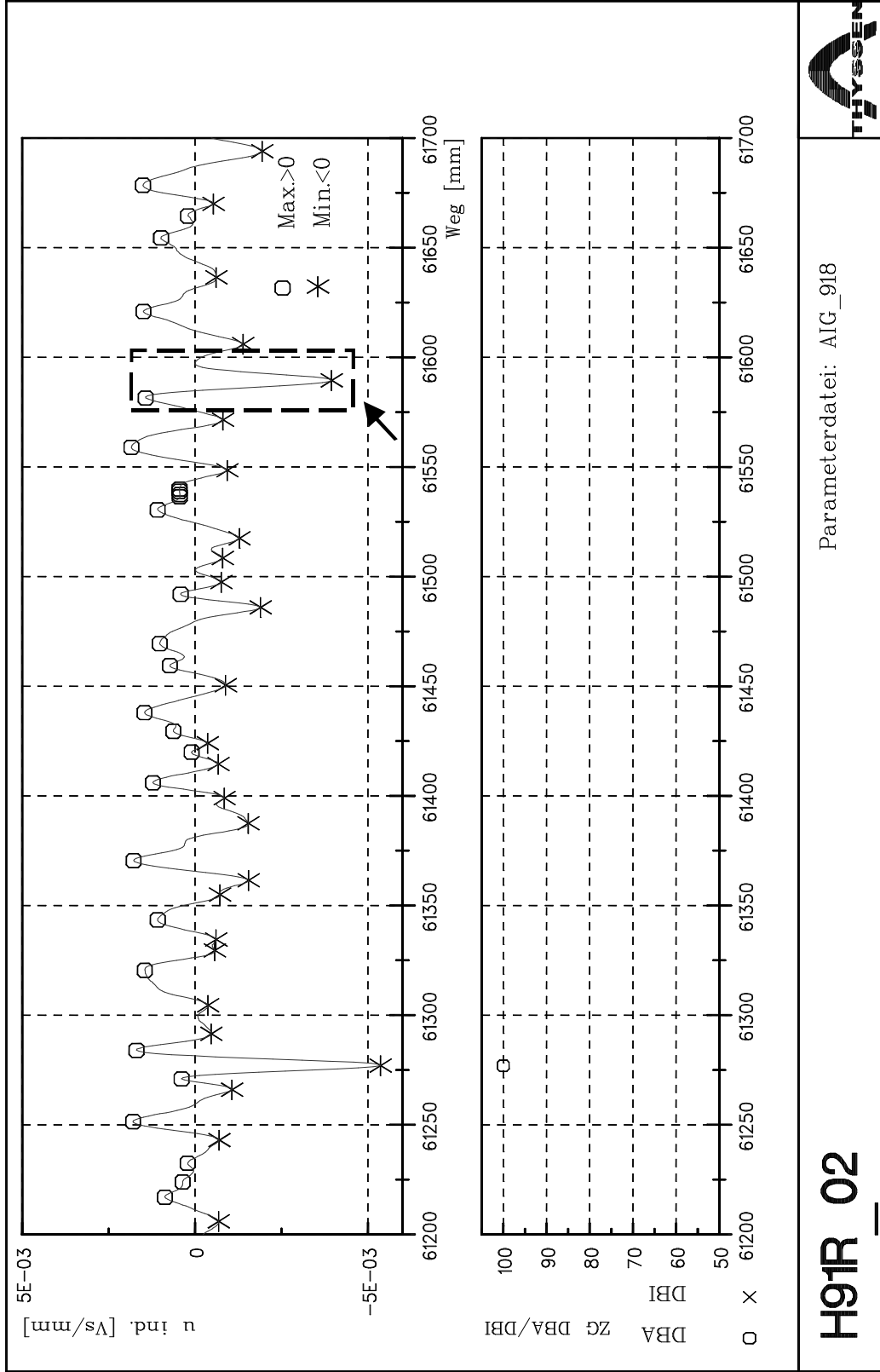


Abbildung V.4

Betriebsmessung H91 R – Klassifikationsergebnis mit optimiertem Klassifikator
 Induzierte Spannung mit lokalen Extrema (oben) und Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisklassen (unten)
 Nicht erkannter Drahtbruch bei 61589,5mm