

## **Numerischer Sammelschienenenschutz Einsatz neuronaler Netze in der Schutztechnik**

U. Braun, Universität Stuttgart

### **1. Einleitung**

Der Artikel diskutiert die Möglichkeiten der Rückrechnung von Stromsignalen, die durch Sättigung im magnetischen Kreis der Stromwandler verzerrt sind. Dabei soll nicht versucht werden, das Verhalten der Wandler exakt nachzubilden, wie es z. B. in /1/ dargestellt ist, sondern vielmehr wird ein Ansatz gewählt, der ohne Kenntnis der Wandlerdaten zum Ziel führt.

## 2. Rückrechnung verzerrter Signale

### 2.1. Motivation

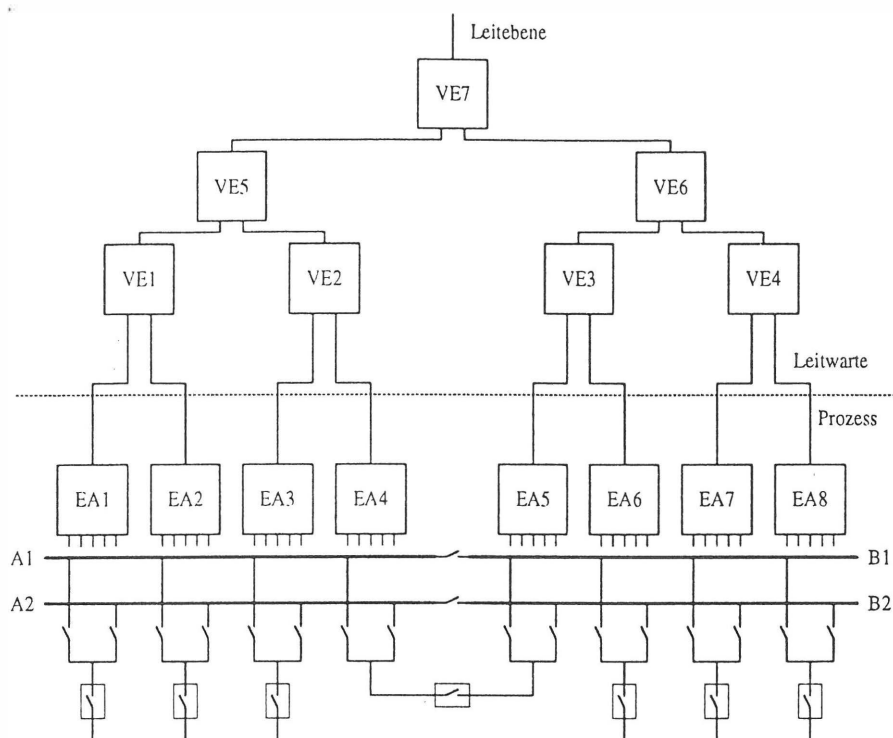
Seit jeher stellt die mögliche Sättigung der Stromwandler und die damit verbundene Verzerrung der sekundären Wandlerströme für die Schutztechnik ein wesentliches Problem dar. Bei der Auslegung fast aller Schutzrelais (Leitungs-, Transformator-, Sammelschienenschutz, ...) muß dieser Effekt berücksichtigt werden, um einen sicher funktionierenden Schutz gewährleisten zu können /2/. Dies gilt sowohl für die seit längerem eingeführten statischen, wie auch für die neueren numerisch arbeitenden Relais.

Als Beispiel soll der numerische Sammelschienenschutz herangezogen werden, da hierfür am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart grundlegende Untersuchungen /3,4/ durchgeführt wurden.

### 2.2. Dezentraler, numerischer Sammelschienenschutz

Fig. 1 zeigt den neuen, verteilt arbeitenden numerischen Sammelschienenschutz. Im Unterschied zu den bisher eingesetzten Systemen, handelt es sich hier um ein dezentral aufgebautes Schutzsystem. Der untere Teil von Fig.1 zeigt die einphasige Ersatzschaltung einer aus zwei Abschnitten bestehenden Doppelsammelschiene. Direkt in den Abgangsfeldern sind die dezentralen Ein-/Ausgabeeinheiten (Feldeinheiten) EA1 ... EA8 angebracht. Diese sind über Lichtwellenleiter-Verbindungen an die zentrale Verarbeitungseinheit angeschlossen. Die Verarbeitungseinheit besteht aus mehreren hierarchisch vernetzten Verarbeitungsmodulen, die baumartig miteinander verbunden sind. Die Hauptunterschiede zu den bisher bekannten Ansätzen sind:

- Massiv paralleler Ansatz, damit sehr große Rechenleistung verfügbar
- Dezentraler Ansatz, Datenerfassung direkt vor Ort am Abgang
- Frühestmögliche Aufrichtung einer wirksamen EMV-Barriere, d. h. LWL-Verbindung von der EA-Einheit zur Verarbeitungseinheit
- Gute Skalierbarkeit des Systems; mit jedem weiteren Abgang kommt auch die erforderliche Rechen- und Kommunikationsleistung hinzu.

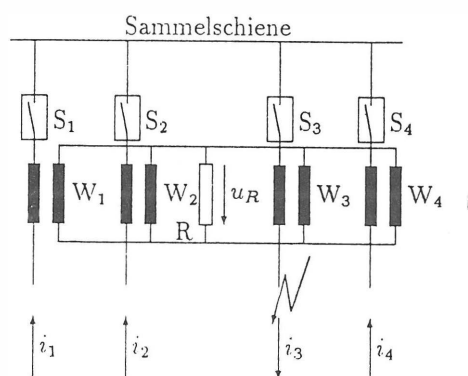


**Fig. 1**  
**Dezentraler numerischer**  
**Sammelschienenschutz**

**EA1 ... EA8: dezentrale Ein-  
/Ausgabe-Einheiten**  
**VE1 ... VE/:**  
**Verarbeitungseinheiten**

Der eigentliche Schutzalgorithmus läuft so ab: Die EA-Einheiten erfassen die Stromwerte und Anlagentopologie (Schalter- und Trennerstellungen). Die Strommeßwerte werden in den EA-Einheiten vorverarbeitet, d. h. gefiltert, eventuell rückgerechnet und auf Plausibilität überprüft. Die Daten werden dann über die LWL-Verbindungen an die Verarbeitungseinheiten weitergegeben.

In den Verarbeitungsmodulen wird aus der Topologieinformation das (interne) Anlagenabbild bestimmt. Mit Hilfe dieses Anlagenabbildes werden dann die Strommeßwerte zusammengefaßt und festgelegt, welche Hierarchieebene für welchen Sammelschienenabschnitt entscheidungsberechtigt ist.

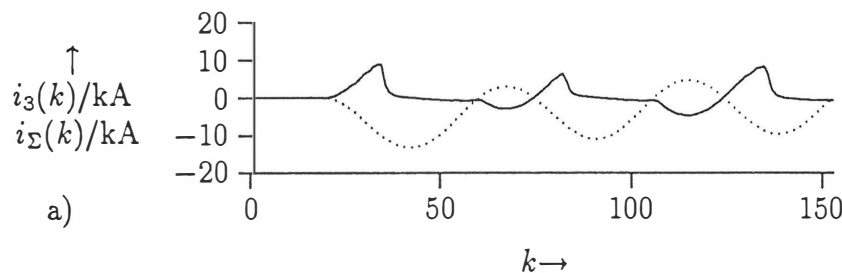


**Fig. 2**  
**Sammelschiene mit außenlie-**  
**gendem Fehler an Abgang 3**

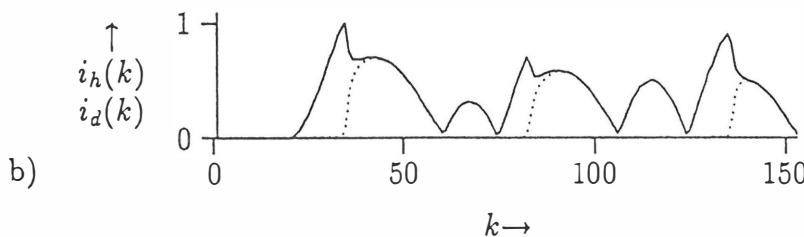
Fig. 2 zeigt das einphasige Ersatzschaltbild einer einfachen Sammelschienenanordnung mit vier Abgängen. Auf Abgang drei wird ein außenliegender Fehler angenommen, in den der Strom  $i_3$  einsteigt.

Sekundärseitig sind alle Wandler parallel geschaltet und speisen ihren Strom in den Summationswiderstand R ein. Im fehlerfreien Fall und auch bei einem außenliegenden Fehler ist die Summe der Ströme auf der Sammelschiene gleich Null. Ohne Wandlersättigung ist dies auch für den Sekundärkreis der Fall. Das Kriterium für die Erkennung eines Fehlers auf der Sammelschiene ist also das Auftreten einer Spannung  $u_R$  am Widerstand R.

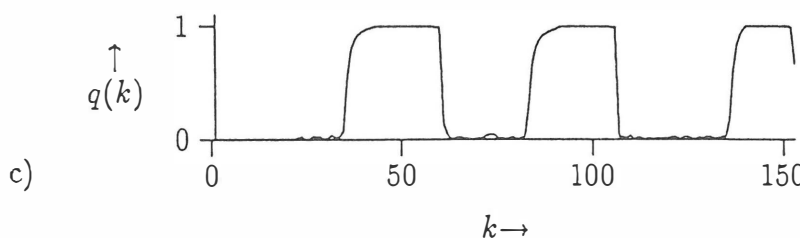
In dem gezeigten Fall muß man allerdings damit rechnen, daß der Wandler  $W_3$  in Sättigung gerät, da er den Summenstrom der Abgänge eins, zwei und vier übertragen muß. Dadurch ist im Sekundärkreis die Summe der Ströme nicht mehr gleich Null, und es entsteht ein Spannungsabfall am Widerstand R. In Fig. 3a ist der Verlauf der Ströme für den außenliegenden Fehler dargestellt:



**Fig. 3a**  
Sekundäre Wandlerströme:  
— Abgangsstrom  $i_3$   
- - - Summenstrom  $i_\Sigma$   
 $i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$



**Fig. 3b**  
Halte- und Differenzstrom  
— Haltestrom  $i_h$   
- - - Differenzstrom  $i_d$



**Fig. 3c**  
q-Wert nach Gl. (1)

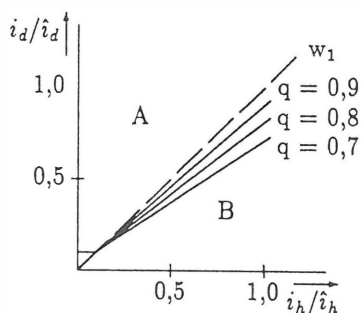
Als Auslösekriterium wird die gewichtete Stromsumme nach der folgenden Formel verwendet:

$$q = \frac{i_d}{i_h} = \frac{\sum |i(k)|}{|\sum i(k)|} \quad (1)$$

Die gewichtete Stromsumme wird verwendet, um das Auslöseverhalten gegen Wandlersättigung zu stabilisieren. Der Verlauf von  $q$  für die Ströme nach Fig. 3a ist in Fig. 3c dargestellt. Die Halte- und Differenzströme  $i_h$  und  $i_d$  sind in Fig. 3b dargestellt. Typisch löst der Sammelschienenschutz bei  $q$ -Werten  $q > 0,7 \dots 0,8$  aus. Wie man anhand von Fig. 3c sieht, wird dies hier zu einer Fehlauslösung führen, d. h. die Wandlersättigung ist in diesem Fall zu groß.

Fig. 4 zeigt einige typische Auslösekennlinien für den Sammelschienenschutz. In den Gebieten A und B findet keine Auslösung statt. Wenn der  $q$ -Wert in Gebiet A liegt, so deutet dies auf einen Fehler in der Rechnung oder Meßwerterfassung hin, da  $q \leq 1$  immer erfüllt sein muß. Das Auslösegebiet liegt in dem durch die erste Winkelhalbierende  $w_1$  und den Geraden

$q = 0,7 \dots 0,9$  aufgespannten Sektor.



**Fig. 4**  
Typische Auslösekennlinien für den Sammelschienenschutz

In der Praxis wird versucht, den Schutz durch zusätzliche Maßnahmen weiter gegen Überfunktion zu stabilisieren. Dabei werden hauptsächlich zwei Verfahren eingesetzt:

- Richtungskriterium
- Erkennen der Wandlersättigung

Das Richtungskriterium /5/ wird so eingesetzt, daß für eine Auslösung alle Stromrichtungen zur Sammelschiene hinzeigen müssen. Falls dies nicht der Fall ist, wird die Auslösung blockiert. Bei Netzen, bei denen nicht alle Sternpunkte niederohmig geerdet sind, kann dies zu Problemen führen. Auch für den Fall des innenliegenden Fehlers können Ströme von der Sammelschiene abfließen, so daß der Schutz blockiert wird und es zu einer Unterfunktion kommt.

Die Erkennung der Wandlersättigung /6,7/ wird dazu benutzt, ein Sperrsignal abzuleiten, durch das die Auslösung, z. B. für zwei Netzperioden, gesperrt wird. Der Wandler soll dadurch genügend Zeit bekommen, durch das mehrfache Ummagnetisieren aus dem Bereich der Sättigung herauszukommen.

Bei diesem Ansatz liegt das Problem darin, daß die Erkennung nicht immer richtig funktioniert und daß die Auslösezeit erheblich verlängert wird (ca. 50 ms gegenüber ca. 10 ms ohne Sättigung).

## 2.3. Konventioneller Ansatz

### 2.3.1. Prinzip

Wie Messungen an Stromwandlern [8] gezeigt haben, kann man davon ausgehen, daß auch bei starker Wandlersättigung (70 - 80% Remanenz) bis ca. 2 ms nach dem Nulldurchgang des Stromes, dieser vom Wandler richtig übertragen wird.

Die Information, die in diesem Abschnitt des Stromverlaufes enthalten ist, wird ausgewertet und in die Rekonstruktion des unverzerrten Signales eingebracht.

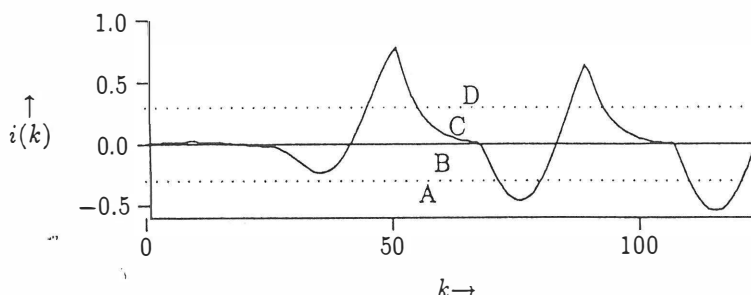
Die Größen, die bestimmt werden müssen sind:

- $i$       Scheitelwert des Stromes
- $i_G$     Verlagerung (Gleichanteil) des Stromes
- $\rho$       Einschaltwinkel
- $T_N$     Netzzeitkonstante

### 2.3.2. Ansatz für die Rückrechnung

Um die vier oben genannten Größen berechnen zu können, müssen vier Bestimmungsgleichungen aufgestellt werden, d. h. es müssen (mindestens) vier gute Meßwerte vorliegen. Mit der Zeitgrenze von 2 ms ergibt sich damit eine Abtastfrequenz von ca. 2 kHz. Gewählt wurde eine Abtastfrequenz von 2,4 kHz (48 Punkte pro Netzperiode). Bei dem hier vorgestellten Verfahren wird  $T_N \rightarrow \infty$  gesetzt. Damit sind nur noch drei Unbekannte zu bestimmen und der vierte "gute" Meßwert kann für eine Plausibilitätskontrolle herangezogen werden.

Die Voraussetzung für die Rückrechnung verzerrter Ströme ist die Erkennung des Nulldurchganges im Stromverlauf. Dafür reicht es z. B. nicht aus, nur das Vorzeichen des Stromes auszuwerten, da man mit Rauschen im Signal rechnen muß. Anschließend soll ein robustes Verfahren für die Erkennung des Nulldurchganges vorgestellt werden.



**Fig. 5 Nulldurchgangserkennung durch Klassifikation des Stromverlaufes**

Die Abtastwerte werden in vier Amplitudenbereiche A, B, C und D eingeteilt, siehe Fig. 5. Für die jeweils letzten vier Abtastwerte ergibt sich damit ein Quartett von Amplitudenbereichen. Insgesamt gibt es 256 Möglichkeiten für die Anordnung der Kennbuchstaben. Die meisten dieser Quartette können nur durch Fehler, etwa bei der Abtastung der Ströme, entstehen, z. B. DADA. Nur einige wenige weisen auf einen gültigen Nulldurchgang hin. Die möglichen Quartette und die Auswertung der Quartette sind in der nachfolgend stehenden Tabelle dargestellt.

Kombination	Signalwert	Kombination	Signalwert
AAAA	indifferent	...	...
AAAB	indifferent	...	...
AAAC	error	...	...
AAAD	error	...	...
AABA	indifferent	...	...
AABB	indifferent	DDCB	falling
AABC	raising	DDCC	falling
AABD	error	DDCD	error
AACA	error	DDDA	error
...	...	DDDB	error
...	...	DDDC	indifferent
...	...	DDDD	indifferent

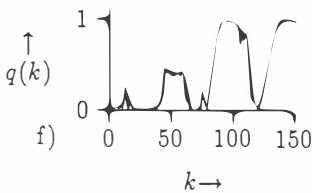
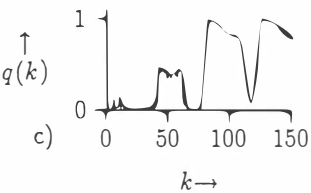
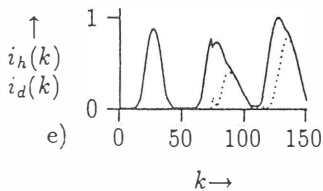
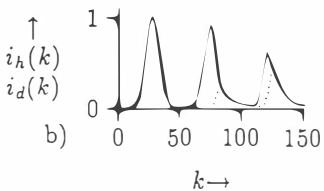
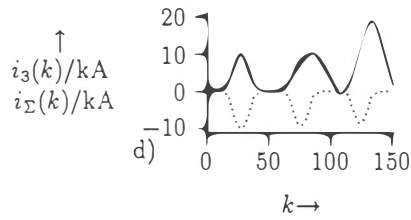
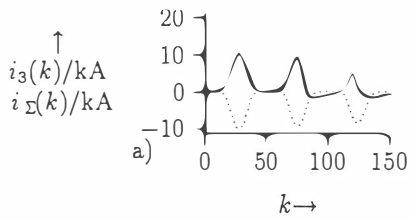
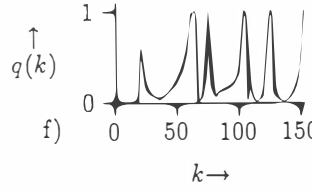
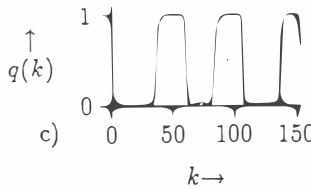
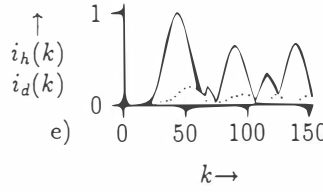
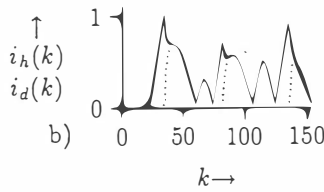
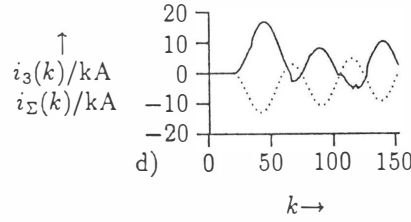
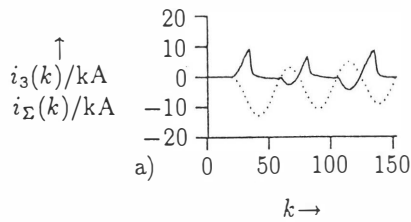
Die Erkennung wird im Programm mit einem Zustandsautomaten durchgeführt. Die Signalwerte *raising* (betragsmäßig ansteigend) und *falling* (betragsmäßig abfallend) steuern einen weiteren Automaten an, der aus vier aufeinanderfolgenden Signalwerten (4 \* raising, 4 \* falling) den Nulldurchgang erkennt. Die Zustände *indifferent* und *error* werden nur für die interne Steuerung des ersten Automaten verwendet.

Ist der Nulldurchgang erkannt, so kann man davon ausgehen, daß mindestens vier gültige Abtastwerte vorliegen, und es wird ein weiterer Automat angestoßen, der ab jetzt für jeden gemessenen Abtastwert einen rückgerechneten generiert. Weicht der gemessene Wert betragsmäßig zu stark nach unten vom gerechneten ab, so wird dies als Indiz für die eintretende Wandlerättigung angesehen. Ab diesem Zeitpunkt werden statt den gemessenen die gerechneten Stromwerte ausgegeben.

### 2.3.3. Ergebnisse

Mit den folgenden zwei Bildern werden die Ergebnisse bei der konventionellen Rückrechnung dargestellt. Fig. 6 zeigt einen gesättigten Stromverlauf in der Phase L1 des Stromes  $i_3$  nach Fig. 2. Wie man aus dem Vergleich von Fig. 6a und 6d erkennt, erfolgt die Rückrechnung relativ gut, allerdings werden beim rekonstruierten Verlauf die Nulldurchgänge nicht hinreichend gut getroffen. Damit ergeben sich kurze Zeitspannen, in denen eigentlich gegenphasige Signale gleiche Vorzeichen bekommen. Somit springt in diesen Bereichen der q-Wert auf +1.0, siehe Fig. 6c und 6f. Insgesamt wird das Verhalten des q-Wertes jedoch verbessert, da nur noch relativ schmale Nadeln übrig bleiben.

Etwas schlechter schneidet der konventionelle Algorithmus bei Signalen ab, die einen Inrush-Anteil enthalten, siehe Fig. 7a und 7d bzw. Fig. 7c und 7f. Die Nulldurchgänge werden hier wesentlich schlechter getroffen. Somit ergibt sich über alles gesehen fast keine Verbesserung. Der Grund liegt darin, daß das Verfahren nur sehr rudimentär für die Verarbeitung von Inrush-Signalen ausgelegt ist. Ein weiterer Ausbau in diese Richtung hätte jedoch die gesetzte Zeitgrenze verletzt.



**Fig. 6a** Gesättigter Stromverlauf

Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$

--- Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 6b** Halte- und Differenzstrom

— Haltestrom

--- Differenzstrom

**Fig. 6c** q-Wert nach Gl. (1), ohne Rückrechnung

**Fig. 6d** Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$ , nach konventioneller Rückrechnung

--- Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 6e** Halte- und Differenzstrom nach Rückrechnung

— Haltestrom

--- Differenzstrom

**Fig. 6f** q-Wert nach Gl. (1), nach Rückrechnung

**Fig. 7a** Gesättigter Stromverlauf mit Inrush, Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$

--- Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 7b** Halte- und Differenzstrom

— Haltestrom

--- Differenzstrom

**Fig. 7c** q-Wert nach Gl. (1), ohne Rückrechnung

**Fig. 7d** Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$ , nach konventioneller Rückrechnung

--- Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 7e** Halte- und Differenzstrom nach Rückrechnung

— Haltestrom

--- Differenzstrom

**Fig. 7f** q-Wert nach Gl. (1), nach Rückrechnung



#### 2.3.4. Laufzeiten

Die nachfolgend angegebenen Laufzeiten wurden mit dem *Alsys Ada Compilation System for the Transputer* durchgeführt. Die Randbedingungen waren dabei:

Transputer	INMOS T800, 20 MHz
Typ REAL:	6 Digits (entspr. 32 Bit)
Meßumfang	eine Phase eines Abgangs für den schlechtesten Fall
Meßzyklus:	10.000 Durchläufe

Das Schutzsystem soll mit einer Abtastrate von 2,4 kHz arbeiten, um eine genügend hohe zeitliche Auflösung zu erreichen. Damit ergibt sich eine Zeitspanne von 416,6  $\mu$ s zwischen den Abtastwerten. Als Richtlinie für die Signalvorverarbeitung (Stromrekonstruktion) wurde angenommen, daß diese höchstens 50% der insgesamt verfügbaren Rechenzeit beanspruchen darf. Die 50%-Grenze wurde reserviert, da neben der Erkennung und Rekonstruktion noch weitere Aufgaben, wie etwa Datentransfer, Überstromerkennung etc., bearbeitet werden müssen. Im schlechtesten Fall benötigte die Abarbeitung des gesamten Rückrechnungsverfahrens 45,7  $\mu$ s pro Abtastwert und Phase. Die sich damit ergebenden ca. 150  $\mu$ s liegen deutlich unter der gesetzten Grenze. Eine Analyse des vom Ada-Compiler erzeugten Transputer-Assemblercode ergab, daß der Compiler Code erzeugt, der handoptimiertem kaum nachsteht. Nur einige überflüssige Speicher- und Rücklese-Operationen wurden in den erzeugten Code eingefügt, die aber in der nächsten Version des Code-Generators eliminiert werden sollten.

Damit ist auch klar, daß nur geringe Laufzeitunterschiede (< 5%) bei Laufzeittests mit vergleichbaren versuchsweise in der Programmiersprache C kodierten Routinen auftraten.

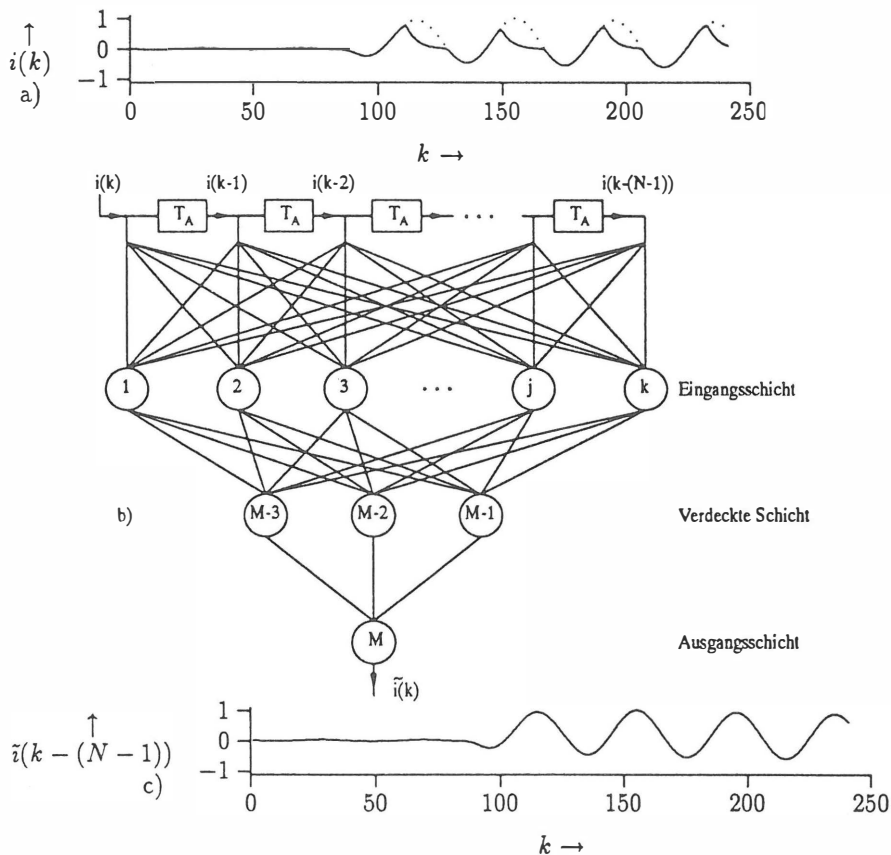
#### 2.3.5. Bewertung des konventionellen Ansatzes

Mit dem konventionellen Verfahren konnte gezeigt werden, daß es generell möglich ist, die Sättigung der Wandler in Echtzeit rückzurechnen, ohne dabei genaue Wandlerdaten zu benötigen. Die Grenzen des Verfahrens sind allerdings auch klar erkennbar geworden. Mit dem Einsatz moderner Signalprozessoren, die in der Rechenleistung ein bis zwei Zehnerpotenzen über dem hier eingesetzten Transputer liegen, sollte es jedoch möglich sein, mit höherem algorithmischen Aufwand das Problem zu beherrschen.

## 2.4. Neuronaler Ansatz

### 2.4.1. Prinzip

In Fig. 8 ist das Prinzip, das der Rückrechnung verzerrter Stromverläufe zugrunde liegt, skizziert.



**Fig. 8** Neuronales Netz, Rückrechnung durch Wandlersättigung verzerrter Ströme

**Fig. 8a**

— verzerrtes Eingangssignal  
- - - Sollsignal

**Fig. 8b**

Neuronales Netz mit analogem Eingangsschieberegister

**Fig. 8c**

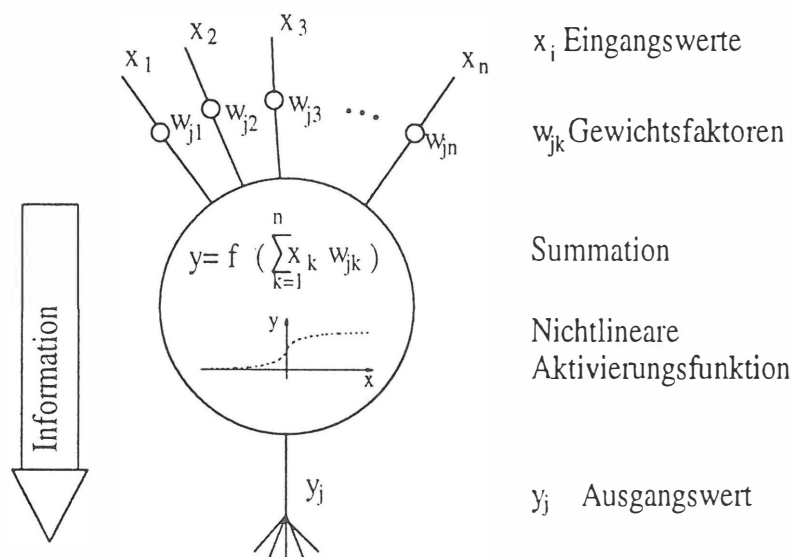
— Ausgangssignal des neuronalen Netzes

In Fig. 8 ist das Prinzip der Rückrechnung verzerrter Ströme mit einem künstlichen neuronalen Netz gezeigt. Der Strom  $i(k)$  ist das Eingangssignal für das neuronale Netz. Mit jedem Abtastschritt  $k$  wird ein neuer Abtastwert in das analoge Schieberegister (Eimerkettenspeicher) eingeschrieben und der älteste Wert verworfen. Insgesamt werden dem neuronalen Netz die letzten  $N$  (typisch  $N=20$ ) Werte parallel zugeführt. Diese Werte werden mit sogenannten *Gewichtsfaktoren* bewertet und in den Neuronen der ersten Schicht (Eingabeschicht) aufsummiert. Die gewichteten Summen werden in den Neuronen mittels einer *Transferfunktion* bewertet und an den Ausgängen in die nächste Schicht (verdeckte

Schicht) des Netzes weitergegeben. Dieser Vorgang setzt sich bis zur untersten Schicht (Ausgabeschicht) fort. Wenn das analoge Schieberegister mit Werten aufgefüllt ist, erscheint mit jedem neuen Abtastwert am Eingang ein korrigierter Wert am Ausgang. Der gesamte Vorgang wird als *propagation* oder *forward pass* bezeichnet. Hiermit wird das sogenannte *pattern matching*, d. h. die Mustererkennung und die Abbildung eines Eingabe- auf ein Ausgabemuster durchgeführt.

Als Transferfunktion können im Prinzip beliebige nichtlineare Funktionen (Sprung, Rampe, Sigmoid, ...) eingesetzt werden, wobei bei dieser Anwendung eine stetige Funktion günstig ist. Für das nichtlineare Filter wurde die Sigmoidfunktion gewählt.

Der interne Aufbau eines Neurons ist in Fig. 9 dargestellt.



**Fig. 9 Interner Aufbau eines künstlichen Neurons**

## 2.4.2. Training des neuronalen Netzes

Das Training des Netzes läuft so ab, daß dem Netz Ist-Eingangsdaten und Soll-Ausgangsdaten "vorgespielt" werden. Aus den Eingangsdaten errechnet das Netz, abhängig von den momentanen Gewichtswerten im Netz, einen Ist-Ausgangswert. Um bewerten zu können, wie gut das Netz eine gewünschte Abbildungsleistung erbringt, wird ein Fehlerkriterium eingeführt. Üblicherweise ist das der quadratische Fehler, d. h. das Quadrat der Differenz des Ist- und Soll-Ausgangswertes.

Hier kann man nun zwei Trainingsarten unterscheiden:

- Real-time-Training
- Batch-Training

Beim Real-time-Training werden nach jedem Iterationsschritt, also nach jedem neuen Muster, alle Gewichte im Netz optimiert. Beim Batch-Training wird ein kompletter Durchlauf durch alle Muster gemacht, eine quadratische Fehlersumme gebildet und anhand dieser dann die Optimierung im Netz vorgenommen. Bei der hier gezeigten Anwendung wurde nur das Batch-Training eingesetzt, da nur so alle Muster in etwa gleich gewichtet in den Trainingsprozeß eingehen.

Auf die berechnete Fehlersumme wird nun ein Optimierungsverfahren angewendet, das durch Gradientenbildung versucht, das Minimum der Fehlerfunktion zu finden. Gängige Verfahren sind z. B. der sogenannte Back-propagation-Algorithmus /9/, ein Verfahren erster Ordnung, oder das Scaled-Conjugated-Gradient-Verfahren /10/, ein Verfahren zweiter Ordnung. Bei realen Trainingsdaten ist es nicht möglich, die Fehlersumme vollständig zu Null zu machen. Beim Training wird daher normalerweise eine Fehlerschranke festgelegt, ab der mit einem zufriedenstellenden Ergebnis zu rechnen ist.

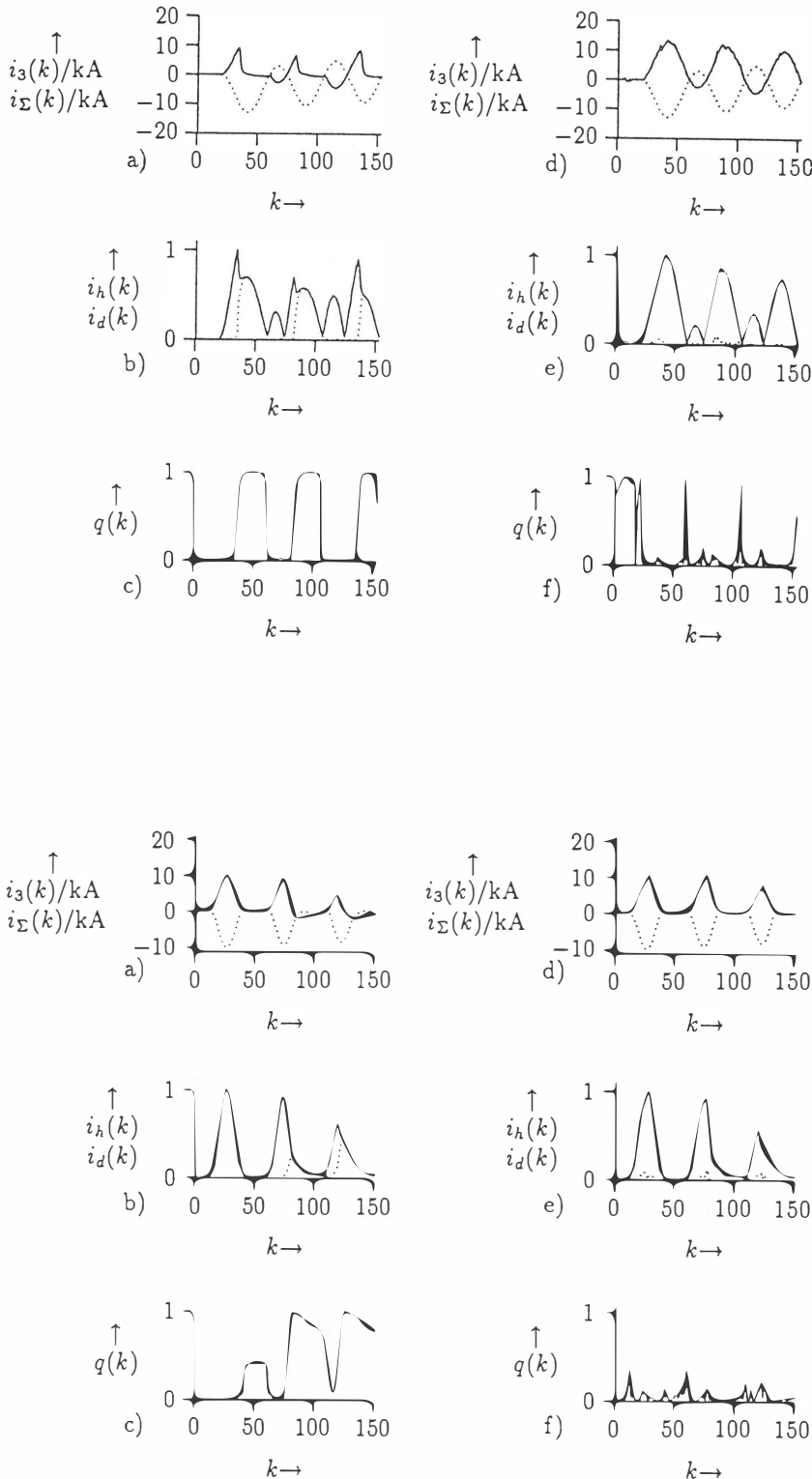
Einen guten Überblick über das Gebiet der neuronalen Netze wird in /11/ gegeben.

### **2.4.3. Ergebnisse**

Die Ergebnisse, die sich durch die neuronale Rückrechnung ergeben, sind insgesamt wesentlich besser als bei dem konventionellen Verfahren. Wie man anhand von Fig. 10a und 10d sieht, wird der verzerrte Stromverlauf gut rekonstruiert. Der Differenzstrom wird dadurch fast zu Null gemacht, siehe Fig. 10e. Damit wird entsprechend auch der Verlauf des  $q$ -Wertes besser. Es bleiben nur noch schmale Nadeln im Bereich kleiner Ströme (Rauschen) übrig. Der gleiche Effekt tritt bei den relativ kleinen Strömen im fehlerfreien Bereich (Abtastwerte:  $k = 0 \dots 25$ ) auf. Ein kleiner absoluter Fehler ergibt einen großen relativen Fehler, d. h. der  $q$ -Wert springt hier auf  $q = 1$ . Dies läßt sich aber einfach dadurch beherrschen, daß nur bei großen Strömen die rückgerechneten Werte freigegeben werden. Bei kleinen Strömen ist es sehr unwahrscheinlich, daß ein Wandler in die Sättigung gerät. Noch besser sieht es bei den mit Inrush behafteten Signalen aus. Ein Vergleich der Fig. 11c und 11f sowie Fig. 7f zeigt, daß hier durch die neuronale Rückrechnung der Verlauf des  $q$ -Wertes erheblich verbessert werden kann.

### **2.4.4. Bewertung des neuronalen Ansatzes**

Anhand der gezeigten Ergebnisse (Fig. 10f/11f) kann man feststellen, daß der Ansatz mit neuronalen Netzen vielversprechende Aussichten bietet. Daß die Ergebnisse gegenüber dem konventionellen Ansatz derart besser sind, läßt sich dadurch erklären, daß die Anzahl der im neuronalen Netz durchgeführten Rechenoperationen ca. um den Faktor 20 größer ist als beim konventionellen Algorithmus. Derzeit ist die Rechenleistung von Signalprozessoren noch nicht groß genug, um ein komplexes neuronales Netz mit, wie z. B. bei dieser Anwendung, 64 Neuronen und etwa 10.000 Gewichten in Echtzeit "durchzurechnen". Das heißt, man muß hierfür spezielle analoge /12/ oder digitale /14/ Neuro-Chips einsetzen.



**Fig. 10a** Gesättigter Stromverlauf

Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$   
- - - Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 10b** Halte- und Differenzstrom

— Haltestrom  
- - - Differenzstrom

**Fig. 10c** q-Wert nach Gl. (1), ohne Rückrechnung

**Fig. 10d** Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$ , nach konventioneller Rückrechnung  
- - - Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 10e** Halte- und Differenzstrom nach Rückrechnung

— Haltestrom  
- - - Differenzstrom

**Fig. 10f** q-Wert nach Gl. (1), nach Rückrechnung

**Fig. 11a** Gesättigter Stromverlauf mit Inrush Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$   
- - - Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 11b** Halte- und Differenzstrom

— Haltestrom  
- - - Differenzstrom

**Fig. 11c** q-Wert nach Gl. (1), ohne Rückrechnung

**Fig. 11d** Sekundäre Wandlerströme:

— Abgangsstrom  $i_3$ , nach konventioneller Rückrechnung  
- - - Summenstrom  $i_\Sigma$

$$i_\Sigma = i_1 + i_2 + i_4$$

**Fig. 11e** Halte- und Differenzstrom nach Rückrechnung

— Haltestrom  
- - - Differenzstrom

**Fig. 11f** q-Wert nach Gl. (1), nach Rückrechnung

### 3. Realisierung

Am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik wurde versucht, das neuronale Netz auf zwei Arten zu implementieren:

1. mit einem Signalprozessor
2. mit einem analogen Neuro-Chip.

Bei der Realisierung des ersten Ansatzes zeigte sich, daß der verwendete Signalprozessor (Analog Devices ADSP2101) nicht in der Lage war, das erforderliche Netz mit 64 Neuronen und ca. 3800 Gewichten in der gesetzten Zeit von  $416 \mu\text{s}$  zu simulieren. Anfangs war man davon ausgegangen, daß eine Netzgröße von 30 Neuronen und etwa 700 Gewichten für die Rückrechnung der Ströme ausreichend sei. Diese Netzgröße kann gerade noch mit den ADSP2101 bewältigt werden. Bei den Trainingsläufen zeigte sich allerdings, daß das Netz auf die eingangs erwähnte Größe erweitert werden mußte.

Auf dem Signalprozessor wurde dann, um auch einen echten Vergleich der konventionellen und algorithmischen Rückrechnung in Hardware durchführen zu können, der konventionelle Algorithmus implementiert.

Der zweite Ansatz wurde mit dem analogen Neuro-Chip 80170NW /12/ (ETANN = Electrically Trainable Analog Neural Network) der Firma Intel realisiert. Die Hardware ist ziemlich genau so aufgebaut wie in Fig. 8 skizziert. Die Stromwerte werden mit 2,4 kHz abgetastet und in ein analoges Schieberegister mit insgesamt 20 Stufen geschoben. Diese 20 letzten Abtastwerte werden dem Netz parallel zugeführt, und dieses berechnet daraus für jeden neuen Abtastwert einen korrigierten Stromwert /13/. Das analoge Schieberegister ist durch Sample & Hold-Bausteine realisiert, die von einem Intel 80196 Mikrocontroller gesteuert werden. Dieser übernimmt auch die Steuerung des ETANN-Chips, da bei diesem die einzelnen Netzsichten durch Rückkoppelung der berechneten Signale und Umschalten der Gewichtswerte durchgerechnet werden. Der ETANN-Chip kann bis zu zwei Milliarden Berechnungen pro Sekunde (CUPS = Connection Update Per Second) durchführen und hat eine Durchlaufverzögerung von ca.  $3 \dots 5 \mu\text{s}$  pro Schicht. Auf den Chip stehen 64 Neuronen und 10240 Gewichtswerte zur Verfügung. Das realisierte Netz hat die Struktur 60-30-20-10-3-1, also sechs Schichten mit etwa 3800 Gewichten.

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

Wie gezeigt werden konnte, bieten beide Ansätze -konventionell, neuronal- Möglichkeiten zur Lösung des gestellten Problems. Beim konventionellen, algorithmischen Ansatz (Software-Lösung) besteht die Schwierigkeit, daß die Komplexität des Algorithmus mit der Zahl der zu behandelnden Sonderfälle überproportional anwächst. Diese Vorgehensweise stellt aber die zur Zeit noch gängige Form dar, da hierbei die verwendeten Methoden wie etwa SA/SD (Strukturierte Analyse/Strukturiertes Design) bereits gut eingeführt und akzeptiert sind. Der neuronale Ansatz ist relativ neu und bietet einige interessante Vorteile. So muß eben nicht mehr im eigentlichen Sinne programmiert werden, sondern es müssen nur noch die relevanten Trainingsdatensätze zusammengestellt werden. D. h. der derzeit notwendige Softwaretest kann entfallen. Eventuell neu hinzukommende Sonderfälle können so berücksichtigt werden, daß sie einfach in das Ensemble der Trainingsdaten aufgenommen werden.

Ein möglicher Kritikpunkt beim Einsatz der neuronalen Netze ist, daß die verwendeten Trainingsalgorithmen zwar sehr starke Konvergenzkriterien anwenden, es aber bisher keinen Algorithmus gibt, der eine geschlossene Lösung bietet. Allerdings sollte man sich hier in Erinnerung rufen, daß es im Bereich der Programmierung ebenfalls noch keine "geschlossenen Lösungen" gibt.

Die derzeit verfügbaren analogen Neuro-Chips sind wegen ihrer relativ geringen Auflösung nicht für alle Anwendungen geeignet, und die digitalen Neuro-Chips haben für echte Applikationen noch eine zu geringe Integrationsdichte. Es ist zu erwarten, daß mit der nächsten /14/ oder übernächsten Generation alle Wünsche in bezug auf Auflösung, Integrationsdichte, Geschwindigkeit und Preis erfüllt werden können.

## 5. Literatur

- /1/ Conrad, Thomas;  
Numerische Korrektur der Sekundärströme gesättigter Stromwandler in Echtzeit;  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt,  
Fachbereich Elektrische Energietechnik, 1988
- /2/ Zahorka, R.;  
Das Verhalten von Stromwandlern bei Einschwingvorgängen;  
AEG-Mitteilungen; 1966; p. 209 -- 215
- /3/ Feser, K.; Braun, U.; Engler, F.; Maier, A.;  
Application of Neural Networks in Numerical Busbar Protection Systems;  
Application of Neural Networks to Power Systems;  
Seattle, 1991; p. 117 - 121; IEEE
- /4/ Braun, Uwe;  
Einrichtung zum Schutz eines elektrischen Betriebsmittels;  
Europäisches Patentamt, Den Haag; Nov. 1989
- /5/ Relais- und Schutztechnik, CH-ES 85-64d; Sammelschienenschutz INX5; BBC
- /6/ 7SS10 Elektronischer Sammelschienenschutz;  
SIEMENS Dok.-Nr.:(4)E14041-F2377-U211-A4
- /7/ Digitaler Stationsschutz 7SS5;  
SIEMENS Dok.-Nr.: E77000-U0007-U411-A0; 1989
- 8/ Berthold, R.; Forster, M.;  
Hochstromversuche mit dem elektronischen Sammelschienenschutz;  
Brown Boveri Technik 1968; Vol. 55-4/5; p. 250 -- 256},
- /9/ Rumelhart, D.E.; McClelland, J.L.;  
Parallel Distributed Processing;  
MIT Press; 1986
- /10/ Moeller, M.F.;  
A Scaled Conjugate Gradient Algorithm for Fast Supervised Learning;  
DAIMI PB -- 339; 1990; ISSN 0105-8517
- /11/ Cichocki, A; Unbehauen, R.;  
Neural Networks for Optimization and Signal Processing;  
Wiley, Teubner; 1993
- /12/ Intel Corporation; 80170NW data sheet; 1990
- /13/ Braun, U.; Feser, K.; Peck, D.;  
Restoring Current Signals in Real Time Using Feedforward Neural Nets; Application  
of Neural Networks to Power Systems;  
Tokyo, 1993; IEEE
- /14/ Intel; Ni1000 Neural network chip; IEEE Computer; Apr. 1993