

# Optimierte Steuerung eines Elektrolichtbogenofens

Thomas Poppe  
ZFE ST SN 41  
Siemens AG München

Thomas Martinetz  
ZFE ST SN 41  
Siemens AG München

Kurt Hohendahl  
ANL A 141  
Siemens AG Erlangen

## 1 Einleitung

In Elektrolichtbogenöfen wird Stahlschrott mithilfe von elektrischer Energie eingeschmolzen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Öfen wird entscheidend vom Gesamtwirkungsgrad, also von der möglichst optimalen Leistungsumsetzung, bestimmt. Bei dem hier untersuchten Ofentyp handelt es sich um einen Drehstrom-Lichtbogenofen, bei dem die Energieeinbringung über drei Elektroden erfolgt. Zwischen den Elektrodenspitzen und der Schmelze bilden sich drei Wechselstrom-Lichtbögen, durch die die Energie, im wesentlichen durch Strahlung, an die Umgebung abgegeben wird [E. Kluss].

Aus elektrotechnischer Sicht ist der Drehstrom-Lichtbogenofen ein in Sternschaltung mit freiem Sternpunkt betriebener, unsymmetrischer Verbraucher mit nichtlinearer Charakteristik. Die Steuerung des elektrischen Arbeitspunktes erfolgt durch stufenweise Verstellung der Sekundärspannung des Ofentransformators und durch eine stufenlose, getrennte Einstellung der Abstände der drei Elektrodenspitzen zum Schmelzmaterial, wodurch die nichtlineare Charakteristik der Lichtbögen verändert wird. Eine Elektrodenabstandsregelung hat die Aufgabe, den gewählten elektrischen Arbeitspunkt zu halten. Die Regelung stellt die drei Abstände dabei so ein, daß in jedem Strang die sogenannte Strangimpedanz, die sich aus den Effektivwerten der jeweiligen Sternspannung und des Strangstromes ergibt, gleich der Sollimpedanz wird.

Bei den heutigen Drehstrom-Lichtbogenöfen wird mit statischen Sollwerten für die Spannungsstufe und für die Impedanzsollwerte gearbeitet, die während einer Charge überhaupt nicht verändert oder nur in Abhängigkeit der verschiedenen Prozeßphasen vorgegeben werden [K. Hohendahl]. Ziel dieser Arbeit war ein neues Optimierungskonzept, das die Sollwerte für die unterlagerte Regelung ständig nachführt, so daß der Drehstrom-Lichtbogenofen mit optimaler Energieeinbringung, unter Einhaltung von Grenzwerten für die Ströme, der Verteilung der Strahlungsintensität und weiteren Randbedingungen, betrieben wird. Im folgenden wird ein Konzept vorgestellt, das auf ein neues, linearisiertes Modell aufbaut, das mit Hilfe eines adaptiven neuronalen Netzes die Basis für das Optimierungsverfahren darstellt. Das Konzept wurde mit Hilfe einer Simulation getestet, in der der Drehstrom-Lichtbogenofen durch ein nichtlineares, gekoppeltes Differentialgleichungssystem nachgebildet wurde. Der Ansatz ist hier nur auf eine Optimierung der elektrischen Wirkleistung unter den genannten Randbedingungen simuliert und getestet, kann jedoch auch auf eine innere energetische Optimierung des Elektrolichtbogenofens erweitert werden, wenn dafür ein geeignetes Modell und evtl. weitere Meßgrößen zur Verfügung stehen.

Das Verfahren wurde bereits an einem 80 MW-Lichtbogenofen der Firma Krupp in Bochum getestet. Dabei stellte sich heraus, daß das vorgeschlagene adaptive Modell die Anlage gut beschreibt und somit eine optimierte Steuerung möglich ist. Bereits während der Testphase der installierten Pilotanlage war eine Wirkleistungssteigerung erkennbar.

*Copyright Siemens AG. All rights reserved.*

*(11.5.94)*

## 2 Simulationsmodell und Ersatzschaltbild

Das der Simulation zugrundeliegende Modell wird durch das folgende nichtlineare Gleichungssystem beschrieben:

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + U_{LB1}(i_1) - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - U_{LB2}(i_2) \\
 U_{23} &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + U_{LB2}(i_2) - R_3 i_3 - L_3 \frac{di_3}{dt} - U_{LB3}(i_3) \\
 i_1 + i_2 + i_3 &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

was auch durch das in Bild 1.a dargestellte Blockschaltbild dargestellt werden kann. Die im Bild 1.a angegebenen konzentrierten Elemente sind die auf die Sekundärseite bezogenen Leitungsgrößen, wobei in den Induktivitäten  $L_1$  bis  $L_3$  bereits die Gegeninduktivitäten enthalten sind [E. Kluss], [K. Bretthauer, K. Timm]. Alle angegebenen Größen -auch die Leitungsgrößen- sind Funktionen der Zeit, so daß es sich bei der Simulation um ein nichtlineares, zeitvariantes Modell handelt, das kontinuierlich numerisch integriert wird.

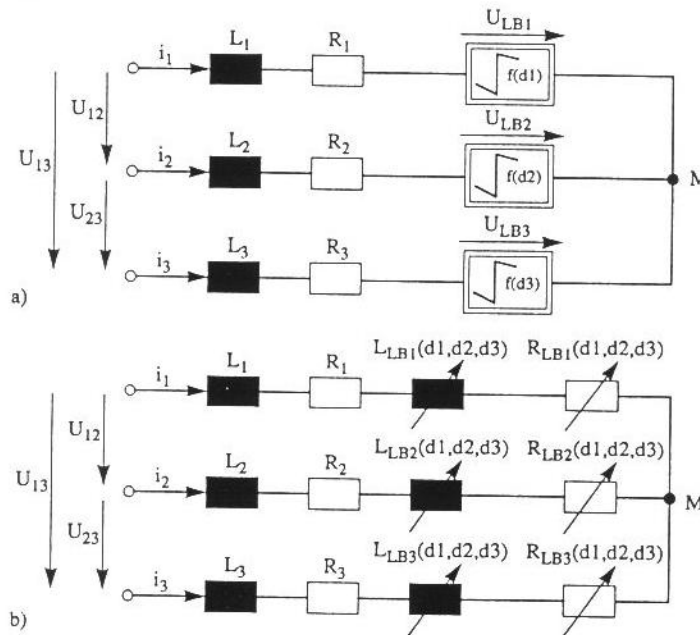


Bild 1: Ersatzschaltbilder des Drehstrom-Lichtbogenofens.

a) Blockschaltbild des simulierten Modells.

b) Linearisiertes Ersatzschaltbild.

Als Simulationstool wurde das SIMULINK von MATLAB benutzt, in dem das Gleichungssystem (1) in der folgenden Zustandsgleichungsform (2) mit einem Runge-Kutta-Verfahren 3. Ordnung integriert wurde.

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= f_1(i_1, i_2, i_3, u_{12}, u_{23}, d_1, d_2, d_3) \\ \frac{di_2}{dt} &= f_2(i_1, i_2, i_3, u_{12}, u_{23}, d_1, d_2, d_3) \\ \frac{di_3}{dt} &= -\frac{d(i_1 + i_2)}{dt} = -\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

Das in Bild 1.a dargestellte Modell ist natürlich auch nur eine idealisierte Abbildung der Realität, die das System u. a. mit einer idealen Spannungsquelle beschreibt, dessen Spannungsverlauf zwar beliebig eingestellt werden kann, die jedoch keine inneren Widerstände besitzt. Die ohmschen Widerstände  $R_1$  bis  $R_3$  bezeichnen die Resistenzen auf der Sekundärseite.

Das elektrische Verhalten eines Lichtbogens wird durch eine nichtlineare und unstetige Strom-Spannungs-Kennlinie beschrieben, deren Verlauf durch eine Funktion des Abstandes der Elektrodenspitze zur Schmelze variiert wird. In Bild 2 ist eine Kennlinienschar dieser U-I-Funktion dargestellt.

Sie wird durch vier Größen, die wiederum vom Abstand  $d(t)$  abhängen, beschrieben. Diese vier Parameter setzen sich aus der negativen und positiven Durchbruchspannung und aus den zwei negativen differentiellen Widerständen für die Stromflußbereiche zusammen [E. Kluss]. Die Parameter der positiven und der negativen Halbwelle können verschieden sein, wodurch ein asymmetrischer Lichtbogen modelliert wird.

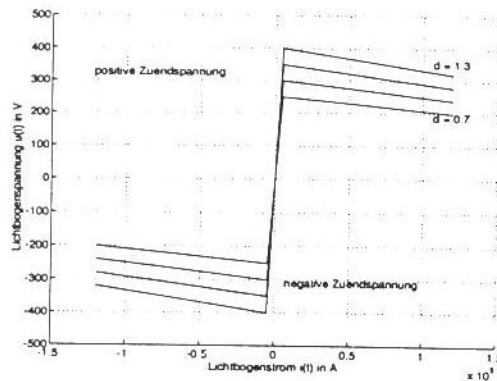


Bild 2: U-I-Kennlinie als Funktion des Abstandes  $d(t)$ .

Auf der Abzisse ist der Lichtbogenstrom dargestellt, der im gezündeten Zustand im Bereich von 100 KA liegt. Die Lichtbogenstromspannung liegt im Bereich 300 V und nimmt vom Betrag her nach dem Zünden ab (negativer differentieller Widerstand). Der Abstand  $d(t)$  gibt den Differenzabstand an, ist auf den Wert 1.0 (Arbeitspunkt) normiert und kann Werte zwischen 0.0 (Kurzschluß) und  $\infty$  annehmen (Leerlauf einer Phase). Der Zusammenhang zwischen dem Abstand  $d(t)$  und der Zündspannung wurde als

proportional angenommen, womit die Zündspannung mit steigendem Abstand zunimmt [J. Schiffath]. Der differentielle Widerstand ändert sich ebenfalls proportional zum Abstand. Die Koeffizienten, die diese Zusammenhänge beschreiben, wurden experimentell so bestimmt, daß das dynamische Verhalten des simulierten Drehstrom-Lichtbogenofens mit den aus realen Messungen vorliegenden Verläufen vergleichbar ist.

Weitere Teile eines Elektrolichtbogenofens, wie die Regelung, die Hydraulik, die Meßdatenerfassung- und Verarbeitung sowie der Transformator wurden ebenfalls dynamisch simuliert, so daß der Ofen unter Einwirkung von zeitlich beliebigen Steuereingriffen und Störungen in seinem dynamischen Verhalten untersucht werden kann. Die Struktur der Simulation ist in Bild 3 dargestellt. Für die folgenden Betrachtungen sind die Blöcke (Optimierung, Leistungsverteilung, Sollimpedanzregler und Neuronales Netz) zunächst nicht nötig. Der mit Ofen bezeichnete Block enthält das in (2) beschriebene, gekoppelte und nichtlineare Differentialgleichungssystem, daß die Spannungen  $u_{12}(t)$  und  $u_{13}(t)$ , sowie die drei Abstände  $d_1(t)$  bis  $d_3(t)$  als eingeprägte Größen besitzt.

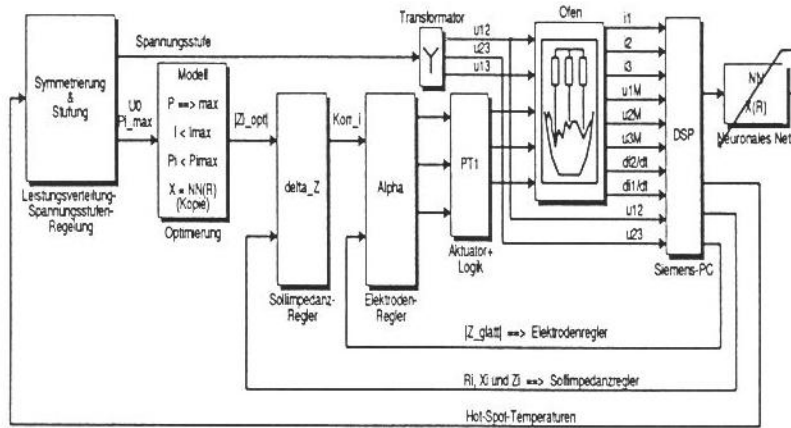


Bild 3: Die Struktur des dynamisch simulierten Elektrolichtbogenofens.

Die drei Abstände sind dabei als die wirksamen Differenzabstände zwischen den Elektrodenspitzen und der Schmelze zu verstehen, die sich aus den absoluten Positionen der Elektrodenspitzen und dem darunter wegschmelzenden Schrott ergeben. Die Höhenänderung des Schrottes ist im Block Aktuator+Logik versteckt simuliert und wird für externe Auswertungen nicht benötigt, da es ja auch am realen Ofen nicht möglich ist, die wirksamen Abstände zu messen und als Regelgröße zu verwenden. Der mit DSP bezeichnete Block beinhaltet die gesamte Meßtechnik und digitale Signaldatenverarbeitung, die u.a. die für die Regelung benötigten Ist-Impedanzen ermittelt und der Regelung zur Verfügung stellt. Auf der Signalleitung 'IZ\_glat' werden die im DSP für jeden Strang identifizierten Beträge der Impedanzen, im Multiplex an den Siemens-Elektrodenregler geleitet. Die Bezeichnung Z\_glat deutet an, daß die Ist-Impedanzen für die Elektrodenregelung nicht aus den Effektivwerten (s.u. Glg.9-11), sondern aus gleichgerichteten und geglätteten elektrischen Größen berechnet werden. Im Regler werden die Beträge der Ist-Impedanzen mit den Beträgen der Soll-Impedanzen verglichen, indem die Abweichungen der Quotienten  $\alpha = Z_{ist} / Z_{soll}$  gegen 1.0 als Regelabweichungen in den Mehrgrößen-PI-

Regler eingehen. Die Sollgrößen sind wie bereits oben erwähnt z. Zt. während einer Charge statisch und werden nicht an die sich ändernde Anlage angepaßt. Es sei hier vorweggenommen, daß dies durch das neue Optimierungskonzept geleistet wird. In Bild 4 sind die zeitlichen Verläufe einiger elektrischer Größen aus der Simulation eines asymmetrischen Drehstrom-Lichtbogenofens im quasi-stationären Zustand in einem Zeitraum von 25 msec. aufgezeichnet.

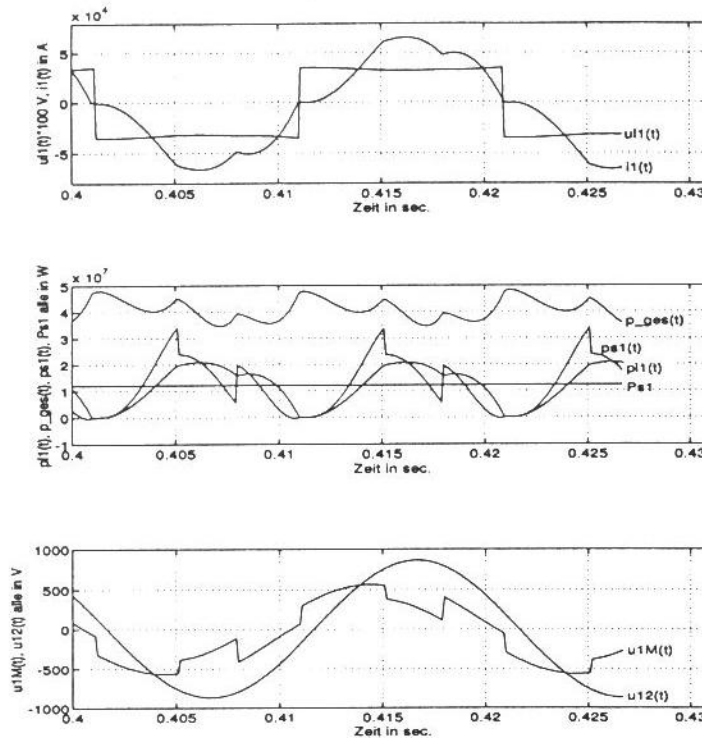


Bild 4: Zeitliche Verläufe einiger elektrischer Größen im eingeschwungenen Zustand. Simulation eines asymmetrischen Ofens.

Die Lichtbogenleistung  $u1(t)$  und der Strangstrom  $i1(t)$  gehen natürlich gleichzeitig durch den Nullpunkt, die Grundschiwingung von  $i1(t)$  besitzt jedoch eine Phasenverschiebung gegenüber der Grundschiwingung der Lichtbogenleistung, was aus Bild 4 bei genauerer Betrachtung bereits deutlich wird. Die Strangströme zeigen pro Halbwelle drei Unstetigkeiten, die jeweils von den Stromnulldurchgängen verursacht werden, die jedoch nicht äquidistant sein müssen, da es sich um ein asymmetrisches Modell handelt, bei dem auch die Amplituden der drei Strangströme unterschiedlich sind. Im mittleren Teilbild sind verschiedene zeitliche Leistungen  $\{u(t) \cdot i(t)\}$  dargestellt. Die Gesamtleistung wird nach Aron durch  $\{p_{ges}(t) = i1(t) \cdot u12(t) - i3(t) \cdot u23(t)\}$  berechnet. Die Strangleistung  $ps1(t)$  des ersten Stranges kann im Gegensatz zur Lichtbogenleistung auch negative Werte annehmen und einen diskontinuierlichen Verlauf besitzen. Im dargestellten Fall sind die Verlustwiderstände  $R_1$  bis  $R_3$  aus Bild 1 zu null angenommen, so daß der Effektivwert einer Strangleistung gleich dem Effektivwert der Lichtbo-

genleistungen ist (die Integration der quadratischen Werte von  $ps1(t)$  und  $pl1(t)$  über eine Netzperiode liefert gleiche Werte). Der Effektivwert der Leistung des ersten Stranges, der mit Hilfe eines gleitenden Effektivwertbildners berechnet wird, ist in  $Ps1$  dargestellt. Im unteren Teilbild ist die Strangspannung  $u1M(t)$  zum freien Sternpunkt M und ihre Phasenlagen zur eingepprägten, verketteten Spannung  $u12(t)$  dargestellt. Die Strangspannungen besitzen Spannungssprünge, die durch die Sprünge der Lichtbogen-  
spannungen hervorgerufen werden und sehr deutlich die Verkoppelung des Systems erkennen lassen. Das Potential des freien Sternpunktes ist den gleichen Sprüngen unterworfen.

### 3 Optimierungskonzept mit Hilfe eines neuronalen Netzes

Aus Bild 4 wurde ersichtlich, daß es zwischen den Grundsicherungen der Lichtbogenspannung  $u1(t)$  und dem Lichtbogenstrom  $i(t)$  (in jedem Strang) eine Phasenverschiebung gibt. Die Größe dieser Phasenverschiebung ist nach den Simulationsergebnissen im wesentlichen von der Charakteristik des Lichtbogens abhängig, also eine Funktion des Abstandes zwischen Elektrode und Schmelzbad. Der Zustand des Plasmas, wie Temperatur und chemische Zusammensetzung wurde noch nicht simuliert, obwohl sein Einfluß sicherlich vorhanden ist. Wenn das in Bild 1.a dargestellte Blockschaltbild des Drehstrom-Lichtbogenofens durch ein linearisiertes Ersatzschaltbild beschrieben wird, ergibt sich das in Bild 1.b dargestellte Ersatzschaltbild. Jeder Lichtbogen wurde durch eine Impedanz, also durch eine Reaktanz und eine Resistanz, ersetzt. Durch diesen neuen Ansatz wird eine veränderliche Betriebsreaktanz eingeführt, deren Wert sich mit der Lichtbogenlänge ändert. Die bekannte Änderung des Lichtbogenwiderstandes mit der Lichtbogenlänge wird ebenfalls erweitert. Da es sich hier um ein gekoppeltes System handelt, muß die Bezeichnung in Bild 1.b an allen variablen Elementen durch die Form  $R_{LB}(d1,d2,d3)$  erweitert werden, was ausdrückt, daß sich die Werte der Reaktanzen in jedem Strang in Abhängigkeit von allen Lichtbogenlängen ändern. Wird z.B. der Abstand  $d1$  im ersten Strang variiert, so ändern sich neben  $Z_{LB1}$  auch die Impedanzen  $Z_{LB2}$  und  $Z_{LB3}$ . Durch diese Erweiterung wird deutlich, daß hier ein Mehrgrößenverhalten vorliegt, was die Steuerung und die Regelung berücksichtigen muß.

Die Wirkleistung, die in den Lichtbögen umgesetzt wird, läßt sich mit Hilfe der komplexen Wechselstromrechnung für das linearisierte Ersatzschaltbild berechnen. Der Ausdruck, der sich dafür ergibt, ist jedoch nicht sehr handlich und setzt sich aus den drei Termen Glg. 3-5 zusammen, die jeweils die Wirkleistung in einem Strang darstellen. Eingangsgrößen sind die sechs Werte, die die Gesamtreaktanzen beschreiben, wobei die Leitungsverlustwiderstände vernachlässigt wurden. Die Strangreaktanzen ergeben sich durch Addition der konstanten Kurzschlußreaktanzen und der variablen Lichtbogenreaktanzen. Eine weitere Eingangsgröße ist der Effektivwert der verketteten Spannung des als symmetrisch angenommenen Dreiphasensystems. Die Gesamtwirkleistung ergibt sich durch Addition der Glg. 3-5 und ist in Glg. 6 als Funktion der sieben oben genannten Größen dargestellt.

$$P_1 = \frac{R_1 U_0^2 [R_2^2 + X_2^2 + R_3^2 + X_3^2 + R_2 R_3 + X_2 X_3 - \sqrt{3} (R_2 X_3 - R_3 X_2)]}{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 - X_1 X_2 - X_2 X_3 - X_3 X_1)^2 + (R_1 X_2 + R_2 X_1 + R_2 X_3 + R_3 X_2 + R_3 X_1 + R_1 X_3)^2} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{R_2 U_0^2 [R_1^2 + X_1^2 + R_3^2 + X_3^2 + R_1 R_3 + X_1 X_3 - \sqrt{3} (R_3 X_1 - R_1 X_3)]}{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 - X_1 X_2 - X_2 X_3 - X_3 X_1)^2 + (R_1 X_2 + R_2 X_1 + R_2 X_3 + R_3 X_2 + R_3 X_1 + R_1 X_3)^2} \quad (4)$$

$$P_3 = \frac{R_3 U_0^2 [R_1^2 + X_1^2 + R_2^2 + X_2^2 + R_1 R_2 + X_1 X_2 - \sqrt{3} (R_1 X_2 - R_2 X_1)]}{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 - X_1 X_2 - X_2 X_3 - X_3 X_1)^2 + (R_1 X_2 + R_2 X_1 + R_2 X_3 + R_3 X_2 + R_3 X_1 + R_1 X_3)^2} \quad (5)$$

Copyright Siemens AG. All rights reserved. (11.5.94)

$$P = \sum_{i=1}^3 P_i(U_0, R_1, R_2, R_3, X_1, X_2, X_3) \quad (6)$$

In der Simulation wurde deutlich, daß sich die Reaktanzen und Resistenzen in jedem Strang mit der Lichtbogenlänge verändern, wobei es jedoch einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den Resistenzen und den Reaktanzen gibt. Wenn dieser Zusammenhang bekannt ist, reduziert sich die Anzahl der Eingangsgrößen in Glg. 6 auf vier. Damit liegt hier ein Problem zur Maximierung der Wirkleistung P mit Hilfe der vier freien Parameter, die mit Hilfe der vier Stellgrößen (U<sub>0</sub>, d1, d2, d3) eingeregelt werden können, vor. Das Problem kann auch durch den folgenden Ansatz beschrieben werden: wenn die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den Reaktanzen X<sub>i</sub> und den Resistenzen durch die nichtlinearen Funktionen NN<sub>i</sub> beschrieben werden, ergibt sich am Maximum der Wirkleistung ein optimales Widerstandstrippel, woraus sich wiederum mit Glg. 7 die optimalen Soll-Impedanzen berechnen lassen.

$$X_i = NN_i(R_1, R_2, R_3) \quad (7)$$

$$\text{Optimierung: } P = P_{max} \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial R_i} = 0, \forall i, \Rightarrow R_{1opt}, R_{2opt}, R_{3opt} \Rightarrow Z_{1opt}, Z_{2opt}, Z_{3opt} \quad (8)$$

Der Name der nichtlinearen Funktion NN deutet an, daß es sich dabei um ein neuronales Netz handelt, das die Approximation aus dem dreidimensionalen Eingangsraum (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>) in den dreidimensionalen Ausgangsraum (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) beschreibt. Auf der nächsten Seite sind in Bild 5 Meßwerte der Impedanzen (Reaktanzen über Resistenzen) aus der Simulation aufgetragen. Die Lichtbogenlängen wurden dazu in großen Bereichen durchfahren.

Die Berechnung der Impedanzen erfolgt durch die übliche Bestimmung aus den strangweise gemessenen Effektivwerten der Ströme und Spannungen [W. Schwabe]. Wir bezeichnen diese Größen auch mit effektive Impedanzen, um auszudrücken, daß es sich dabei um Rechengrößen handelt, die für die Linearisierung des Elektrolichtbogenofens benötigt werden, jedoch nicht als reale Impedanzen verstanden werden dürfen [T. Pfeiler]. Der Berechnung dieser effektiven Größen liegt ein Effektivwertmodell zugrunde, was bedeutet, daß die Effektivwerte der Stranggrößen und die Phasen der Grundschwingungen des linearisierten Modells mit den jeweiligen Größen im nichtlinearen Modell übereinstimmen. Wenn T die Abtastzeit bezeichnet und N\*T = T<sub>Netz</sub> die Periodendauer der Netzfrequenz (20 msec) ist, berechnen sich die Effektivwerte der Strangströme, Strangspannungen und der Strangwirkleistungen folgendermaßen:

$$I_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_i^2(kT)} \quad , \quad U_{iM} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_{iM}^2(kT)} \quad (9)$$

$$P_{si} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} p_{si}(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_i(kT) u_{iM}(kT) \quad (10)$$

Die Bestimmung der effektiven Leitungsgrößen erfolgt nun wie folgt:

$$\text{Phase: } \cos(\varphi_i) = \frac{P_{si}}{I_i U_{iM}} \quad , \quad \text{Resistanz: } R_i = \frac{P_{si}}{I_i^2} \quad \text{und Reaktanz: } X_i = \frac{\sqrt{I_i^2 U_{iM}^2 - P_{si}^2}}{I_i^2} \quad (11)$$

Bei kurzen Lichtbögen nehmen die Lichtbogenreaktanzen kleine Werte an und die Strangreaktanzen

streben den Kurzschlußreaktanzen des asymmetrisch simulierten Elektrolichtbogenofens zu ( $X_{10} = 3.1$  mOhm,  $X_{20} = 4.1$  mOhm,  $X_{30} = 2.2$  mOhm). Die in Glg. 8 angegebene Bedingung, daß die Ableitung am Optimum nach den Widerständen null wird, ist nur zulässig, wenn keine Randbedingungen vorliegen und das globale Optimum erreicht werden kann. Da es hier jedoch Randbedingungen für die Ströme, die thermische Wandbelastung und die Widerstände selber gibt, lautet die Optimierungsaufgabe

$$\text{maximiere } P(U_0, R) \quad \text{unter Einhaltung von: } g_i(U_0, R) \leq 0. \quad (12)$$

Die Randbedingungen  $g_i(U_0, R)$  können beliebige, nichtlineare Funktionen von den vier freien Variablen sein. Darin können sich auch Grenzwerte für die freien Variablen und Gleichungsnebenbedingungen verbergen. Bei den in Bild 5 dargestellten optimalen Werten A für die Impedanzsollwerte gab es Grenzwerte für die Variablen -so wurde z.B. die obere Grenze für die Spannung auf die gewünschte Spannungsstufe gesetzt- und drei Ungleichungsnebenbedingungen für die Effektivwerte der Strangströme, die sich aus den Glg. 3-5 ableiten lassen zu:

$$I_1 \approx \sqrt{\frac{P_1}{R_1}} \Rightarrow g_1(U_0, R) = I_1 - I_{1max} \leq 0 \quad (13)$$

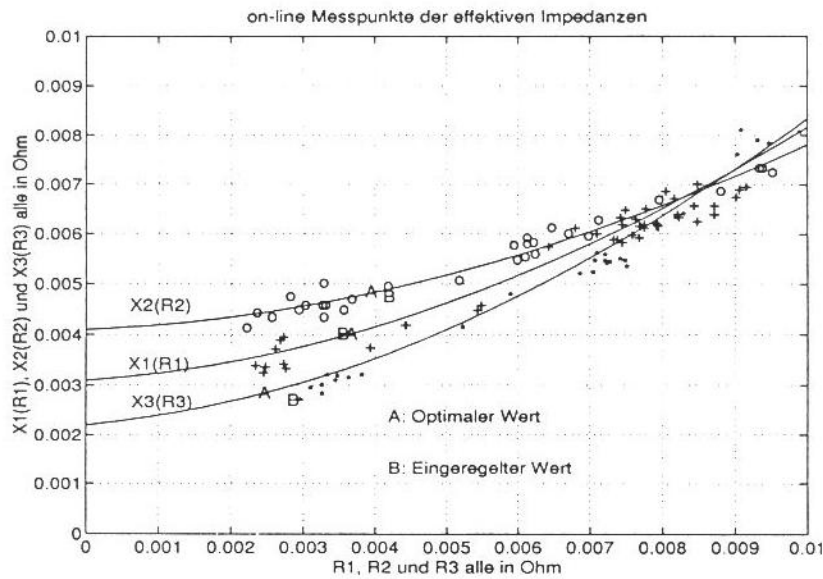


Bild 5: Meßpunkte der effektiven Impedanzen an einem asymmetrischen Ofen bei Veränderung der Lichtbogenlängen. Approximation durch ein einfaches Netz (Regression). Optimale Impedanzsollwerte (A) mit Glg. 6-9 und Regressionsmodell berechnet ( $I_{1max} = 60$  KA).

Bei Betrachtung von Bild 5 wird deutlich, daß die mit dem neuronalen Netz identifizierten Zusammenhänge (durchgezogenen Linien) zwischen den Widerständen und den Betriebsreaktanzen außerdem die Kurzschlussreaktanzen liefern. Wenn die Kurzschlußreaktanzen bekannt sind und mit den identifizierten übereinstimmen, dann können diese Werte als Vorwissen in das Netz eingebracht werden und



damit das Trainieren einfacher und das Netz stabiler machen.

Für die Optimierung der in Glg. 6 angegebenen Energiefunktion unter den linearen und nichtlinearen Randbedingungen wurde ein Verfahren nach Gill, Murray and Wright<sup>1</sup> benutzt, das nach der SQP-Methode (Sequential Quadratic Programming) und der Lösung eines QP-Subproblems (Quadratic Programming) funktioniert.

Die mit B gekennzeichneten Punkte sind die Impedanzwerte, die durch die Regelung eingestellt wurden, wenn die Optimalen Werte A vorgegeben wurden. Je näher die Punkte A und B liegen, desto genauer ist die globale Beschreibung des Lichtbogenofens durch das adaptive Modell gelungen. Der gesamte Ablauf des Optimierungskonzeptes wird in Bild 3 beschrieben. Die im Block DSP on-line identifizierten Ist-Impedanzen werden alle 3 sec. an das neuronale Netz geliefert, in dem der in Glg. 7 beschriebene Zusammenhang gelernt wird. Das Training des Netzes erfolgt sowohl im off-line-Modus (aus aufgezeichneten und/oder simulierten Daten), als auch im on-line-Modus, wobei dazu auch Datenpaare aus der Vergangenheit gespeichert werden. Das neuronale Netz ist somit adaptiv, wodurch auch das Gesamtmodell Glg. 6 adaptiv ist. Im Block OPTIMIERUNG werden die optimalen Soll-Impedanzen berechnet und an den Sollimpedanz-Regler übergeben. Dieser ermittelt aus den optimalen Sollimpedanzen und den gemessenen Ist-Impedanzen Korrekturwerte  $Korr_i$ , die an den unterlagerten Siemens-Elektrodenregler übergeben werden. Die Einführung eines zusätzlichen Sollimpedanzreglers war nötig, da der vorhandene Elektrodenregler als Sollgröße keine Impedanzwerte, sondern nur prozentuale Korrekturwerte auf die festvorgegebenen Impedanzsollwerte erlaubt. Der Impedanzsollwert, auf den der unterlagerte Elektrodenregler regelt, ergibt sich also aus dem Produkt  $Z_{Soll} * Korr_i$ .

Wenn der Schrott weitgehend eingeschmolzen ist, brennen die Lichtbögen auf dem blanken Schmelzbad und ein größerer Teil der Strahlungsleistung gelangt in die gekühlte Ofenwand, deren Temperatur dann schlagartig ansteigen kann. Die Reaktion darauf war bis jetzt ein Herabsetzen der Spannungsstufe, wodurch das Leistungsniveau insgesamt sinkt. Da die Temperaturverteilung jedoch meistens sehr stark asymmetrisch ist und oft nur in einem der sog. Hot-Spot-Wandelemente (die den drei Elektroden nächstgelegenen) zu beobachten ist, reicht eine Reduzierung der Strahlungsleistung in dem betroffenen Sektor aus. Der äußere Regelkreis in Bild 3 erfüllt diese Aufgabe. Die Temperaturen in den Wandkühlelementen werden ständig gemessen um so auf eine auftretende Temperaturerhöhung frühzeitig reagieren zu können. In dem Reglerblock Symmetrisierung&Stufung wird anhand der Verteilung der Wandtemperaturen und anhand der Temperaturänderungen entschieden, ob die Wandbelastung durch eine geänderte Leistungsverteilung, oder zusätzlich durch Herabsetzen der Trafostufe reduziert werden kann. Die Ausgänge dieses Reglers gehen als dynamische Randbedingungen in den Optimierungsblock ein. Steigt die Wandbelastung z.B. in dem der ersten Elektrode am nächsten gelegenen Kühlelement, so wird die maximale Leistung  $P_{1Max}$  dieses Stranges herabgesetzt. Da die Leistungsverteilung durch die Begrenzung des Stellgliedes nicht beliebig asymmetrisch gewählt werden kann, wird ab einer bestimmten Wandbelastung eine Verringerung der Trafostufe nicht mehr zu vermeiden sein. Da dies mit einer stärkeren Verringerung der Gesamtwirkleistung verbunden ist, kommt es darauf an, den Zeitpunkt der Stufung durch das neue Leistungsverteilungsverfahren möglichst weit nach hinten zu verschieben.

In Bild 6 ist ein Simulationslauf über zwei Sekunden dargestellt, bei dem zweimal nach jeweils 0,5 Sekunden zwischen dem herkömmlichen Steuerungsverfahren und dem neuen Verfahren umgeschaltet wurde. Für das herkömmliche Verfahren wurden konstante Impedanzsollwerte gewählt, die vom Optimum abweichen. Damit kann man das alte Verfahren zwar in einen beliebig schlechten Zustand bringen, allerdings wurde durch systematisches Durchfahren der konstanten Sollwerte kein besseres Optimum als das mit den neuen Verfahren gefunden. Aufgetragen sind die zeitlichen Verläufe der Elektrodenabstände  $d1(t)$ ,  $d2(t)$  und  $d3(t)$ , die beim alten Verfahren andere stationäre Endzustände als beim

1. P.E. Gill, W. Murray and M.H. Wright, Practical Optimization, Academic Press, London, 1981.

neuen Verfahren annehmen. Dabei ist sehr schön zu sehen, wie der Übergang in allen drei Elektroden gleichzeitig stattfindet.

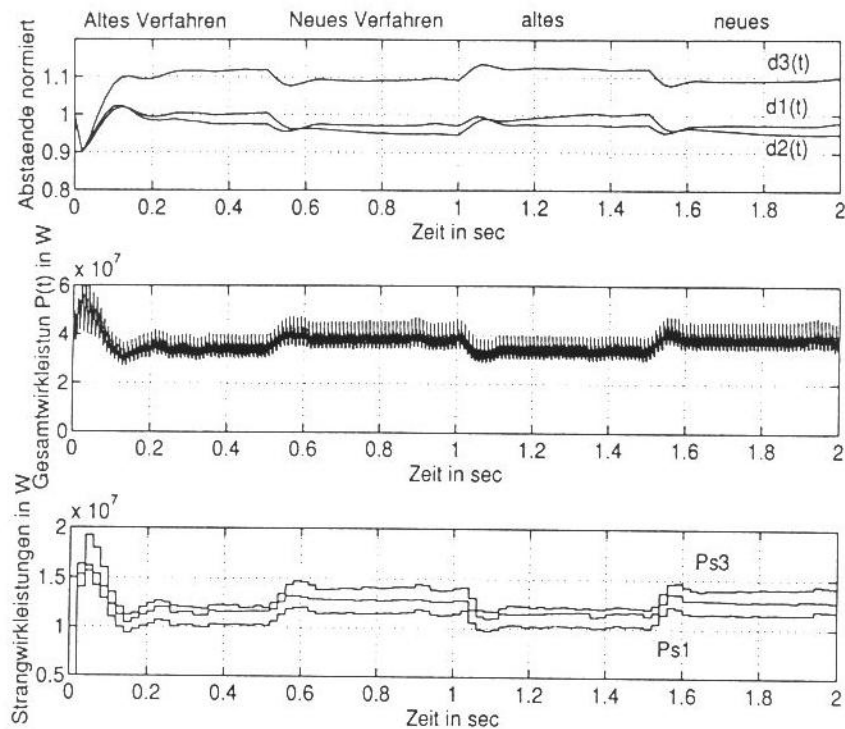


Bild 6: Simulation an einem asymmetrischen Elektrolichtbogenofen. Nach jeweils 0.5 Sekunden wird zwischen dem alten Verfahren (vorgegebene konstante Sollimpedanzen) und dem neuen Verfahren (adaptive Optimierung mit neuem Modell und neuronalem Netz) umgeschaltet. Die Wirkleistung steigt in allen Strängen.

Wenn sich die Spannungsstufe, der vom Netz identifizierte Zusammenhang und die Randbedingungen nicht ändern, wird die rechenzeitaufwendige Optimierungsroutine nicht neu gestartet.

#### 4 Ausblick

Das Ziel des vorgestellten Optimierungskonzeptes ist die Maximierung der elektrischen Wirkleistung unter Einhaltung von Randbedingungen. Dazu wurde ein neues Modell vorgeschlagen, das von den Lichtbogenlängen abhängige Strangimpedanzen besitzt, wobei sich nicht nur die Resistenzen, sondern auch die Reaktanzen mit der Lichtbogenlänge ändern. Da es außerdem einen Zusammenhang zwischen der Änderung der Resistenzen und Reaktanzen gibt, liegt ein Modell vor, mit dem die von außen betrachteten elektrischen Eigenschaften in einem großen Arbeitsbereich berechnet werden können. Die-

Der Zusammenhang zwischen den effektiven Reaktanzen und Resistenzen wird stark von der Lichtbogencharakteristik und somit von Betriebszustand beeinflusst und muß deswegen während des Schmelzvorganges ständig identifiziert werden. Diese on-line Adaptation übernimmt ein neuronales Netz.

Eine weitere Optimierung von Elektrolichtbogenöfen, wie die innere energetische Optimierung, die das Verhältnis zwischen Leistungseinbringung und Abstrahlung an die Wandung berücksichtigt, erfordert weitere adaptive Modelle, die bereits angedacht sind und durch weitere neuronale Netze realisiert werden können.

## 5 Literatur

- Erich Kluss,  
*"Einführung in die Probleme des elektrischen Lichtbogen- und Widerstandsofens"*,  
Springer Verlag, 1951.
- Josef Schiffarth,  
*"Über die Regelung von Lichtbogenöfen auf größtmögliche Lichtbogenleistung"*,  
Dissertation, TH Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1962.
- William E. Schwabe,  
*"Stahlerzeugung in Hochleistungs-Lichtbogenöfen"*,  
Stahl und Eisen 89, Nr. 17, 1969.
- S. Köhle,  
*"Beziehungen zwischen den Induktivitäten des Hochstroms, von Lichtbogenöfen"*,  
Elektrowärme international 36, S. B314 - B320, 1978.
- John Persson,  
*"Analyzing the electrical Characteristics of Arc Furnaces"*,  
Electrical Furnace Conference Proceedings, 1989.
- Kurt Hohendahl,  
*"Arbeitspunkte beim Betrieb eines Elektro-Lichtbogenofens"*,  
Interner Bericht Siemens AG, ANL A 141/132, 1992.
- K. Bretthauer und K. Timm,  
*"Ein Beitrag zur Theorie des Drehstrom-Lichtbogenofens"*,  
Elektrowärme international 28, S. 115-120, 1970.
- Thomas Pfeiler,  
*"Untersuchungen zur Leistungsumsetzung im Drehstrom-Lichtbogenofen"*,  
Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1993.