Prädiktive dynamische Lastkontrolle für ein Elektrostahlwerk

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. (FH) Vico Haverkamp, M.Eng.

aus Emsdetten

Hamburg 2009

Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2009

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Krüger
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Maschinenbau
Professur für Prozessdatenverarbeitung und Systemanalyse

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. P. Wulfsberg
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Fakultät für Maschinenbau
Professur für Fertigungstechnik

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger für die Anregung der Thematik und die fortwährende und vielfältige Unterstützung meiner Arbeit. Seine umfassende Expertise auf dem Gebiet der Elektrostahlerzeugung trug maßgeblich dazu bei, notwendige Details in die Betrachtungen mit einzubeziehen und gleichzeitig den Überblick zu behalten. Dank der vielen lehrreichen Fachdiskussionen konnte ich so schließlich eine zielgerichtete und erfolgreiche Fertigstellung des Projektes verwirklichen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Peter Wulfsberg danke ich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill sei für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes gedankt.

Dem seinerzeitigen Leiter des Stahlwerkes der Arcelor Mittal Hamburg GmbH, Herrn Lutz Bandusch, gilt mein Dank für die Anregung der Arbeit und seinem Nachfolger Herrn Dr.-Ing. Uwe Braun für die interessierte Weiterführung des Projektes und insbesondere dafür, mir die praktische Anwendung der erarbeiteten Algorithmen am realen Objekt zu ermöglichen. Ebenso danke ich Herrn Michael Colberg und allen weiteren beteiligten Mitarbeitern der Arcelor Mittal Hamburg GmbH für die vielen beigesteuerten Ideen und die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau und Betrieb der Testinstallation.

Meinen Kollegen am Institut für Automatisierungstechnik danke ich für die angenehme Zusammenarbeit und die vielen informativen und auch unterhaltsamen Stunden. Herzlicher Dank gilt insbesondere Paul Wenig und Björn Dittmer für das sicherlich mühevolle, trotzdem jedoch sehr präzise Korrekturlesen meiner Dissertation, durch das ich die Arbeit noch weiter abrunden konnte.

Zum Schluss spreche ich meinen Eltern und meinem Bruder meinen herzlichen Dank aus für die moralische Unterstützung während der manchmal nicht ganz einfachen Phasen dieses Projektes. Ihr unerschütterlicher Glaube an meine Fähigkeiten auch zu Zeiten, in denen ich der Verzweiflung nahe war, haben mir die Fertigstellung dieser Arbeit erst ermöglicht.

Hamburg, im Juli 2009

Wem das Wasser bis zum Halse steht,
der soll den Kopf nicht hängen lassen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Lastverhalten der Verbraucher im Elektrostahlwerk 5
2.1 Elektrolichtbogenofen 6
2.1.1 Technik von Elektrolichtbogenöfen 6
2.1.2 Modellierung des Lastganges eines Drehstrom-Elektrolichtbogenofens 12
2.2 Pfannenofen 23
2.3 Grundlast des Stahlwerkes 26
2.3.1 Modellierung von Zeitreihen mittels stochastischer Prozesse 27
2.3.2 Anwendung der Zeitreihenanalyse auf den Grundlastverlauf 34
2.3.3 Vereinfachte Modellierung des Grundlastverlaufs 43

3 Prädiktion der Restlaufzeit des Elektrolichtbogenofens 45
3.1 Etablierte Energiemodelle 45
3.2 Anwendungsoptimiertes Modell 47
3.2.1 Annahmen 47
3.2.2 Bestimmung der Modellparameter und Modelldiagnose 51
3.2.3 Adaption der Modellparameter 55
3.2.4 Verifikation des Modells 62

4 Lastkontrollstrategie 78
4.1 Aufgabenstellung und Ziel elektrischer Lastkontrolle 78
4.2 Herkömmliche Lastkontrollalgorithmen 85
4.3 Einsatz herkömmlicher Lastkontrollalgorithmen im Elektrostahlwerk 93
4.4 Prädiktiver Lastkontrollalgorithmus 95
4.4.1 Optimierungsansätze 95
4.4.2 Rahmenbedingungen im Stahlwerk 101
4.4.3 Aufbau des Algorithmus 104

5 Implementation und Ergebnisse 112
5.1 Technischer Aufbau im Stahlwerk 112
5.2 Betriebsergebnisse 117

6 Zusammenfassung und Ausblick 129

7 Literaturverzeichnis 134

Abkürzungsverzeichnis

AC-EAF	engl.: Alternating Current Electric Arc Furnace, Drehstrom-Elektrolichtbogenofen
AKF	Autokorrelationsfunktion
AR	Autoregressiv, Bezeichnung für eine Klasse von Prozessmodellen in der Zeitreihenmodellierung
DC-EAF	engl.: Direct Current Electric Arc Furnace, Gleichstrom-Elektrolichtbogenofen
DRI	engl.: Directly Reduced Iron, Direktreduziertes Eisen, sog. Eisenschwamm
EAF	engl.: Electric Arc Furnace, Elektrolichtbogenofen
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EVU	Energieversorgungsunternehmen
HBI	engl. Hot Briquetted Iron, Direktreduziertes Eisen
KAV	Konzessionsabgabenverordnung
LKA	Lastkontrollanlage
MA	engl.: Moving-Average, gleitender Mittelwert, Bezeichnung für eine Klasse von Prozessmodellen in der Zeitreihenmodellierung
OPC	engl.: Object Linking and Embedding for Process Control, Methode zum Verknüpfen und Einbinden von Objekten in Prozesssteuerungs- oder -regelungssoftware
PAKF	partielle Autokorrelationsfunktion
PC	engl.: Personal Computer
PT_1	Bezeichnung für ein lineares Übertragungsglied mit proportionalem, zeitverzögerndem Verhalten 1. Ordnung
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

Symbolverzeichnis

α	Parameter eines autoregressiven (AR) Prozessmodells
β	Parameter eines Moving-Average (MA) Prozessmodells
ε	Zufallsschock
ϕ	partieller Korrelationskoeffizient
φ	Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung
μ	Mittelwert einer Normalverteilung
ρ	Korrelationskoeffizient
σ	Standardabweichung einer Normalverteilung
σ^2	Varianz einer Verteilung oder eines Prozesses
$\sigma_{P\,\mathrm{elEAF}}$	Standardabweichung der elektrischen Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens
ξ	Konstante eines autoregressiven (AR) Prozessmodells
ψ	Konstante eines Moving-Average (MA) Prozessmodells
ζ	Konstante eines autoregressiven Moving-Average (ARMA) Prozessmodells
a	spezifischer Energiebedarfsparameter
a_{Mittel}	Gewichtungsparameter für die exponentielle Mittelwertbildung
a_n	spezifischer Energiebedarfsparameter für den ersten Massenanteil in Modell n
$a_{n\,\mathrm{alt}}$	vorheriger Wert des spezifischen Energiebedarfsparameters für den ersten Massenanteil in Modell n
$a_{n\,\mathrm{neu}}$	anhand der aktuellen Schmelze neu bestimmter spezifischer Energiebedarfsparameter für den ersten Massenanteil in Modell n
a_{Prog}	Gewichtungsparameter für die Prognoseberechnung
b	spezifischer Energiebedarfsparameter
b_n	spezifischer Energiebedarfsparameter für den zweiten Massenanteil in Modell n
$b_{n\,\mathrm{alt}}$	vorheriger spezifischer Energiebedarfsparameter für den zweiten Massenanteil in Modell n
$b_{n\,\mathrm{neu}}$	anhand der aktuellen Schmelze neu bestimmter spezifischer Energiebedarfsparameter für den zweiten Massenanteil in Modell n
d	Laufvariable
e	Euler-Zahl
f	Laufvariable
$g_{\mathrm{PT1}}(t)$	Gewichtsfunktion eines PT_1-Übertragungsgliedes
$G(z)$	zeitdiskrete Übertragungsfunktion
$G_{\mathrm{PT1}}(z)$	zeitdiskrete Übertragungsfunktion eines PT_1-Übertragungsgliedes
h	Laufvariable für die Bezeichnung der Zeitschritte bei zeitdiskreten Größen, in der Zukunft liegender Zeitschritt, Prognosehorizont

i	Laufvariable zur Bezeichnung der Messpunkte
k	Anzahl der Regressionsvariablen, Anzahl der Verzögerungszeitschritte, Verstärkungsfaktor eines Übertragungsgliedes
ln()	natürliche Logarithmusfunktion
m	Masse, Einsatzmasse, Anzahl der Freiheitsgrade, Anzahl der Korrelationswerte, Adaptionsmethode
m_1	Einsatzmasse des ersten Massenanteils
$m_{1\text{gemessen}\,n}$	gemessene Einsatzmasse des ersten Massenanteils entsprechend Modell n
m_2	Einsatzmasse des zweiten Massenanteils
$m_{2\,\text{gemessen}\,n}$	gemessene Einsatzmasse des zweiten Massenanteils entsprechend Modell n
m_A	Abstichmasse
m_DRI	DRI-Einsatzmasse
m_ges	Gesamteinsatzmasse
m_HBI	HBI-Einsatzmasse
m_Met	Masse des metallischen Einsatzes
$m_\text{Roh\,fl}$	Einsatzmasse an flüssigem Roheisen
$m_\text{Roh\,fe}$	Einsatzmasse an festem Roheisen
m_Schrott	Schrotteinsatzmasse
$m_\text{Schrott+DRI}$	Gesamteinsatzmasse an Schrott und DRI
$m_\text{Schrott\,shr}$	Einsatzmasse an Shredder-Schrott
m_Zu	Einsatzmasse an Zuschlagstoffen
$\tilde{m}$	prognostizierte Einsatzmasse
$\tilde{m}_\text{DRI}$	prognostizierte gesamte DRI-Einsatzmasse
$\tilde{m}_\text{DRI\,Warmfahren}$	prognostizierte DRI-Einsatzmasse beim Warmfahren
$\tilde{m}_\text{ges}$	prognostizierte Gesamteinsatzmasse
n	Laufvariable für die Bezeichnung der Zeitschritte bei zeitdiskreten Größen, momentaner Zeitschritt, Anzahl der Messpunkte, Bezeichnung des Prognosemodells, Transformatorstufe
N	Anzahl der Zeitreihenwerte
p	allgemein: Ordnung des autoregressiven (AR) Teils eines Zeitreihen-Prozessmodells
p_AR	Ordnung eines autoregressiven (AR) Prozessmodells
$p_\text{Ofen\,spez}$	spezifischer Ofenfaktor
P	Leistung
P_el	elektrische Leistungsaufnahme
$P_\text{el15\,max}$	Leistungslimit, maximale verfügbare mittlere elektrische Leistungsaufnahme in einer Messperiode
$P_\text{el\,akt}$	tatsächliche Lastkurve, in eine Viertelstundenleistung umgerechnete seit Messperiodenbeginn bezogene elektrische Energie
$P_\text{el\,EAF}$	elektrische Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens
$P_\text{el\,Grundlast}$	elektrische Leistungsaufnahme der Grundlast des Stahlwerkes

$P_{\mathrm{el\,ideal}}$	ideale Lastkurve, in eine Viertelstundenleistung umgerechnete bei einer dem Leistungslimit entsprechenden konstanten Leistungsaufnahme seit Messperiodenbeginn bezogene elektrische Energie
$P_{\mathrm{el\,korr}}$	anzuwendende gesamte Korrekturleistung zur Erreichung des Leistungslimits
$P_{\mathrm{el\,korr\,P}}$	Differenz zwischen momentaner Leistungsaufnahme und dem Leistungslimit, Anteil der gesamten Korrekturleistung
$P_{\mathrm{el\,korr\,W}}$	in eine bis Messperiodenende anzuwendende Korrekturleistung umgerechnete Leistungsdifferenz zwischen tatsächlicher und idealer Lastkurve, Anteil der gesamten Korrekturleistung
$P_{\mathrm{el\,mom}}$	momentane elektrische Leistungsaufnahme
$\overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$	gemittelte elektrische Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens, Erwartungswert
$\overline{P}_{\mathrm{el\,Grundlast}}$	gemittelte elektrische Leistungsaufnahme der Grundlast des Stahlwerkes, Erwartungswert
$\tilde{P}_{\mathrm{el}}$	prognostizierte elektrische Leistungsaufnahme bis Messperiodenende
$\tilde{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$	prognostizierte elektrische Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens
$\tilde{P}_{\mathrm{el\,Grundlast}}$	prognostizierte elektrische Leistungsaufnahme der Grundlast des Stahlwerkes
ΔP_{el15}	elektrische Leistungsdifferenz zwischen prognostizierter elektrischer Viertelstundenleistung und Leistungslimit
$\Delta P_{\mathrm{el\,akt}}$	Leistungsdifferenz zwischen tatsächlicher und idealer Lastkurve
$\Delta P_{\mathrm{el\,oben}}$	maximal zulässige obere Abweichung der tatsächlichen von der idealen Lastkurve bei der Lastkontrollmethode der idealen Lastkurve
$\Delta P_{\mathrm{el\,unten}}$	maximal zulässige untere Abweichung der tatsächlichen von der idealen Lastkurve bei der Lastkontrollmethode der idealen Lastkurve
q	allgemein: Ordnung des Moving-Average (MA) Teils eines Zeitreihen-Prozessmodells
q_{MA}	Ordnung eines Moving-Average (MA) Prozessmodells
R^2	Bestimmtheitsmaß
s	Parameter der Laplace-Transformation
$s_{\mathrm{aufschlag}}$	Sicherheitsaufschlag für die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens bis zum Abstich
$s_{P\,\mathrm{el\,EAF}}$	Streuung der elektrischen Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens
$s_{\mathrm{Prognose}\,W\,\mathrm{el}\,n,m}$	Streuung der elektrischen Energiebedarfsprognose für Modell n und Adaptionsmethode m
t	Zeit
t_{15Rest}	verbleibende Restzeit in der aktuellen Messperiode
$t_{\mathrm{ab}\,n}$	n-ter Abschaltzeitpunkt einer Lastkontrollanlage
$t_{\mathrm{DRIRück}}$	Zeitpunkt des charakteristischen Rückgangs der DRI-Zufuhrrate
$t_{\mathrm{frei}\,n}$	n-ter Freigabezeitpunkt einer Lastkontrollanlage
t_{korr}	Zeitpunkt, zu dem eine Lastkontrollanlage eine Leistungskorrektur vornimmt

t_N	Nebenzeit
t_S	Stromflusszeit
$\Delta t_{s\,mod}$	modifizierte prognostizierte noch verbleibende Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens bis zum Abstich
Δt_{sn}	mit Modell *n* prognostizierte gesamte Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens bis zum Abstich
$\Delta t_{s\,prog}$	prognostizierte noch verbleibende Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens bis zum Abstich
$\Delta t_{s\,real}$	tatsächliche noch verbleibende Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens bis zum Abstich
T	Abtastintervall für zeitdiskrete Größen
T_A	Abstichtemperatur
T_{PT1}	Zeitkonstante eines PT_1-Übertragungsgliedes
$V_{Gas\,spez}$	spezifischer Erdgaseintrag
$V_{LPG\,spez}$	spezifischer Flüssiggaseinsatz
$V_{Öl\,spez}$	spezifischer Öleinsatz
$V_{O2\,spez}$	spezifischer Sauerstoffeintrag
$V_{O2N\,spez}$	spezifischer Sauerstoffeintrag zur Nachverbrennung
$V_{O2L\,spez}$	spezifischer Sauerstoffeintrag über Lanzen
W	Arbeit, Energie
W_{el}	elektrische Energie
$W_{el15\,prog}$	prognostizierte in der aktuellen Messperiode noch benötigte elektrische Energie
$W_{el15\,Rest}$	in der aktuellen Messperiode noch verfügbare elektrische Energie bis zum Erreichen des Leistungslimits
$W_{el\,akt}$	seit Messperiodenbeginn bezogene elektrische Energie
$W_{el\,gemessen\,n}$	gemessener elektrischer Energiebedarf entsprechend Modell *n*
$W_{el\,spez}$	spezifischer elektrischer Energiebedarf
$W_{ges\,EAF\,spez}$	in die Schmelze eingebrachte spezifische Gesamtenergie
$W_{ges\,spez}$	spezifischer Gesamtenergiebedarf
$W_{kühl\,mittel\,spez}$	mittlere spezifische Kühlenergie
$W_{kühl\,spez}$	spezifische Kühlenergie
$\tilde{W}_{el\,ges\,n}$	mit Modell *n* prognostizierter elektrischer Gesamtenergiebedarf für eine Schmelze
$\tilde{W}_{el\,n}$	mit Modell *n* prognostizierter elektrischer Energiebedarf
$\tilde{W}_{el\,Warmfahren}$	prognostizierter elektrischer Gesamtenergiebedarf für das Warmfahren
$\Delta W_{el\,akt}$	Differenz zwischen tatsächlichem und idealem Energiebezug seit Messperiodenbeginn
$\Delta W_{el\,ges\,n}$	mit Modell *n* prognostizierter noch verbleibender elektrischer Energiebedarf bis zum Abstich

$\Delta W_{\mathrm{elHysterese}}$	elektrische Energiehysterese zwischen Herauf- und Herunterschaltpunkt bei der Transformatorstufenvorgabe durch den prädiktiven Lastkontrollalgorithmus
$\Delta W_{\mathrm{el}n}$	Abweichung zwischen gemessenem und mit Modell *n* prognostiziertem Energiebedarf, Energiebedarfsänderung
$\Delta W_{\mathrm{elspez}n}$	spezifische Energiebedarfsänderung entsprechend Modell *n*
$\Delta W_{\mathrm{elWarmfahren}}$	prognostizierter verbleibender elektrischer Energiebedarf für das Warmfahren bis zum Abstich
$\lvert\Delta W_{\mathrm{elspez}n}\rvert$	Betrag der spezifischen Energiebedarfsänderung entsprechend Modell *n*
$x(nT)$	Zeitreihe
z	Parameter der zeitdiskreten *z*-Transformation

1 Einleitung

Elektrostahlwerke sind Anlagen, in denen mit Hilfe von elektrischer Energie aus Stahlschrott und ggf. Roheisen Stähle in unterschiedlichsten Qualitäten erschmolzen werden. Das Kernelement eines solchen Stahlwerkes stellt der so genannte Elektrolichtbogenofen (engl. Electric Arc Furnace, EAF) dar, in welchem die Umwandlung der elektrischen Energie in die zum Schmelzen des Schrotts notwendige Wärmeenergie mit Hilfe von elektrischen Lichtbögen realisiert wird. Dieses Funktionsprinzip wurde bereits im Jahre 1880 von William Siemens [Siemens 1880] vorgestellt. Nach Weiterentwicklung durch Heroult stand der erste produktionsfähige Elektrolichtbogenofen 1904 mit einer Leistungsaufnahme von 0,24 MVA und einem Fassungsvermögen von 3 t zur Verfügung. Mit diesem Ofen konnten pro Tag ca. 6 – 7 t Stahlschrott eingeschmolzen und auf die zur Weiterverarbeitung notwendige Temperatur von über 1500 °C aufgewärmt werden [Neumann 1904]. Nach nunmehr über hundertjähriger Weiterentwicklung produzieren moderne Lichtbogenöfen bis zu 225 t flüssigen Rohstahl je Charge mit einer Durchsatzgeschwindigkeit von bis zu 150 t pro Stunde [Argenta 05]. Parallel zu der fortschreitenden technischen Entwicklung ist der Anteil des Elektrostahls im Jahre 2007 auf 31,2 % der weltweiten Rohstahlproduktion von 1344 Mio. t angestiegen [Worldsteel 08], somit kommt diesem Herstellungszweig erhebliche Bedeutung zu.

Die typischerweise in Elektrostahlwerken hergestellten Endprodukte sind Langprodukte wie z.B. Draht, die teilweise gleich zu Nägeln, Schrauben usw. weiterverarbeitet werden, aber auch Produkte wie z.B. automobile Außenhäute, die spezielle metallurgische Anforderungen stellen. Im Gegensatz zu anderen Prozessrouten, wie z.B. dem Hochofen/Konverter-Verfahren, ist die Elektrostahlproduktion kein kontinuierlicher Prozess. Vielmehr wird im Elektrostahlwerk auf Chargenbasis produziert, d.h. es können in den aufeinander folgenden Produktionszyklen des Lichtbogenofens unterschiedliche Stahlqualitäten erschmolzen werden. Somit erlaubt dieser Prozess auch die bedarfsgerechte Herstellung kleinster Mengen von Spezialstählen, während dies in den o.g. kontinuierlichen Prozessrouten nicht oder nur mit erheblich größerem Aufwand möglich ist. Elektrostahlwerke zeichnen sich daher durch die breite darstellbare Palette von Stahlqualitäten verbunden mit hoher Flexibilität aus.

Ein typisches Elektrostahlwerk besteht aus einem oder mehreren Elektrolichtbogenöfen mit Anschlussleistungen von üblicherweise je ca. 100 MW bis hin zu rund 165 MW bei modernen Hochleistungsöfen [Abel 07]. Weitere Bestandteile sind Pfannenöfen, eine Gieß- und Walzanlage, ein Schrottplatz mit den dazu gehörenden automatisierungstechnischen Anlagen sowie eventuell eine Direktreduktionsanlage, die aus Eisenerz unter Zugabe von Erdgas Roheisen in Form von porösem direktreduziertem Eisenschwamm (engl. Directly Reduced Iron, DRI) produziert. Die gesamte elektrische Anschlussleistung eines solchen Stahlwerkes kann im Bereich von bis zu einigen hundert MW liegen, so dass sich Jahresverbräuche von einigen hunderttausend MWh elektrischer Energie ergeben. Damit stellen die elektrischen Energiekosten mit 20 % einen wesentlichen Anteil der Betriebskosten eines Elektrostahlwerkes dar [Jellinghaus 94]. Bezogen auf einen typischen 125 t-Elektrolichtbogenofen beträgt dieser Anteil sogar 44 % der Verarbeitungskosten [Ameling 86a].

Die Belieferung einer Industrieanlage mit einer Anschlussleistung in der Größenordnung derjenigen eines Elektrostahlwerkes stellt hohe Anforderungen an das jeweilige Energieversorgungsunternehmen (EVU). Zum einen muss dort die gesamte elektrische Energiemenge erzeugt und zum anderen müssen für die hohe Last ausreichende Verteilungsnetze geschaffen und unterhalten werden. Letzteres beinhaltet insbesondere, dem betreffenden Großverbrau-

cher jederzeit eine Leistung im dreistelligen MW-Bereich zur Verfügung zu stellen und gleichzeitig dafür zu sorgen, dass das übrige elektrische Netz nicht vom Zu- bzw. Abschalten dieser hohen Leistung beeinträchtigt wird. Die Kosten für diese Leistungsbereitstellung sind im Vergleich zu den reinen Energieerzeugungskosten nicht unerheblich.
In der Konsequenz vereinbaren die EVUs mit industriellen Stromgroßabnehmern Sonderverträge, die nicht der Gesetzgebung der Stromgrundversorgung unterliegen und daher mittels einer besonderen Tarifstruktur den speziellen Anforderungen dieser Großkunden gerecht werden. Als Stromgroßkunden bzw. Sondervertragskunden gelten dabei im Allgemeinen laut Konzessionsabgabenverordnung (KAV) die Betreiber industrieller Anlagen, deren gemessene Leistung in mindestens zwei Monaten des Abrechnungsjahres einen Grenzwert von in Deutschland z.Zt. 30 kW überschreitet. Anders als z.B. für private Haushalte enthalten diese so genannten Sondervertragskunden-Tarife, neben dem Fixpreis für den Anschluss, nicht nur einen Arbeitsanteil für die verbrauchte Energie, sondern zusätzlich einen Leistungsanteil, der die von der Anlage bezogene Leistung widerspiegelt. Zur Bestimmung des Leistungsanteils wird im Energiebelieferungsvertrag ein Leistungslimit zwischen EVU und dem betreffenden Anlagenbetreiber vereinbart; der Anlagenbetreiber kauft gewissermaßen eine bestimmte Leistung für die Vertragslaufzeit ein. Die Höhe des Leistungslimits liegt dabei meist geringfügig unter der theoretisch möglichen maximalen Gesamtleistungsaufnahme der Industrieanlage auf dem Niveau der im Normalbetrieb bezogenen mittleren elektrischen Leistung. Damit wird einkalkuliert, dass nicht alle einzelnen elektrischen Verbraucher der Industrieanlage ständig eingeschaltet sind, sondern in Abhängigkeit von den jeweiligen Betriebsbedingungen zu- oder abgeschaltet werden.
Zur Überwachung der Einhaltung des Leistungslimits wird vom EVU nicht die Momentanleistung der jeweiligen Industrieanlage beobachtet, sondern die in Intervallen von 15 bis 90 min Dauer (sog. Bezugs- oder auch Messperioden) bestimmte Durchschnittsleistung. Die gesamte Vertragslaufzeit, die gewöhnlich ein Jahr beträgt, wird in solche unmittelbar aufeinander folgende Bezugsperioden aufgeteilt und für jede einzelne Periode wird die entsprechende Durchschnittsleistung mit Hilfe von speziellen Verbrauchszählern ermittelt. Die innerhalb der einzelnen Perioden auftretenden Maximalleistungen können dabei deutlich über dem entsprechenden Periodenmittelwert und ggf. sogar über dem Leistungslimit liegen. Das vertraglich vereinbarte Leistungslimit gilt dennoch als eingehalten, solange alle im Vertragszeitraum bestimmten Messperioden-Durchschnittsleistungen unterhalb des Limits bleiben. In diesem Fall werden nur die im Vertrag festgelegten Leistungskosten berechnet. Wird dagegen das Leistungslimit in einer oder mehreren Bezugsperioden überschritten, so wird dem Anlagenbetreiber für die volle Vertragslaufzeit der entsprechend höhere Leistungsbezug in Rechnung gestellt. Da dies auch rückwirkend gilt, können so erhebliche Mehrkosten entstehen, insbesondere wenn die Überschreitung kurz vor Ablauf des Abrechnungszeitraumes auftritt. In diesem Fall würden Kosten für einen erhöhten Leistungsbezug anfallen, der jedoch nicht mehr genutzt werden kann. Tritt die Überschreitung bereits zu Anfang des Abrechnungszeitraumes auf, so fallen zwar auch erhöhte Kosten an, der Anlagenbetreiber könnte in diesem Fall jedoch für den verbleibenden Teil des Abrechnungszeitraumes das erhöhte Leistungslimit ausnutzen.
Um dieser speziellen Tarifstruktur gerecht zu werden, kommen auf Seiten der Industrieanlage elektrische Lastkontrollanlagen (LKA) zum Einsatz. Diese sollen einerseits die Einhaltung des Leistungslimits sicher stellen und andererseits den Energiebezug so optimieren, dass die elektrischen Energiekosten pro bezogener Kilowattstunde minimiert werden. Diese Kosten setzen sich aus dem im Vertrag vorgegebenen Arbeitspreis in $\frac{€}{kWh}$ und den anteiligen

Fixkosten zusammen, wobei letztere u.a. über den vertraglichen Leistungspreis in $\frac{€}{kW}$ vom vereinbarten Leistungslimit abhängen. Da sich die Minimierung des auf die einzelne Kilowattstunde bezogenen Fixkostenanteils somit bei größtmöglichem Energiebezug einstellt, ist mit Hilfe der LKA ein vollständiges Ausschöpfen des Leistungslimits anzustreben.
Die technische Realisierung von Lastkontrollanlagen besteht meist aus einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) oder einem Embedded PC, die bzw. der sowohl an die elektrischen Verbrauchszähler der jeweiligen Anlage als auch an die Lastschalter der einzelnen Verbraucher angebunden wird. So kann der implementierte Lastkontroll-Algorithmus ein drohendes Überschreiten des Leistungslimits erkennen und durch Lastschaltungen bzw. Lastabwürfe verhindern. Zu den verschiedenen etablierten Verfahren, die in Lastkontroll-Algorithmen Anwendung finden, zählen unter anderem Vorrangschaltungen, Lastverriegelungen oder Maximumwächter [Bär 83]. Jedes dieser Verfahren weist besondere Vorteile in Bezug auf die speziellen Anforderungen der jeweiligen Industrieanlage auf, und für viele Arten von Anlagen kann so bereits eine ausreichend gute Lösung gefunden werden [Jorge 93].
Die bereits etablierten Verfahren gehen dabei davon aus, dass erstens die einzelnen Verbraucher nahezu konstante Lastcharakteristiken aufweisen und dass sich zweitens die Gesamtlast der jeweiligen Industrieanlage aus einer Anzahl von Verbrauchern mit ähnlichen Anschlussleistungen zusammensetzt. Unter diesen Bedingungen ist es relativ einfach möglich, das Leistungslimit nahezu punktgenau einzuhalten.
Für den Einsatz in Elektrostahlwerken sind die bisher auf dieser Basis erhältlichen Lastkontrollsysteme jedoch nur bedingt geeignet, da zum einen die hier vorhandenen elektrischen Verbraucher sehr unruhige Lastgänge aufweisen und zum anderen der Elektrolichtbogenofen bzw. die -öfen meist weitaus mehr als die Hälfte der gesamten elektrischen Last des Werkes ausmachen. Daher treffen die für die herkömmlichen Lastkontrollsysteme zugrunde gelegten Annahmen hier nicht zu und so kann insbesondere die o.g. Zielsetzung einer optimalen Ausnutzung des eingekauften Leistungslimits mit diesen Systemen in Elektrostahlwerken nicht erfüllt werden.
Dieser Arbeit vorangegangene Untersuchungen der Betreiber des hier betrachteten Elektrostahlwerkes der Arcelor Mittal GmbH in Hamburg zeigen, dass in einem typischen 14-tägigen Intervall knapp 30 MWh elektrischer Energie aufgrund von unzureichender Berücksichtigung der speziellen Gegebenheiten durch die installierte herkömmliche LKA ungenutzt blieben. Um das sich daraus eröffnende Optimierungspotential nutzbar zu machen, erscheint es erforderlich, die prozessbedingt zwischen 0 und bis zu 120 MW stark schwankenden Lastgänge des Elektrolichtbogenofens bzw. der -öfen und der weiteren Großverbraucher zu berücksichtigen und in das Lastmanagement mit einzubeziehen. So ist neben der Einhaltung des Leistungslimits auch eine optimierte Leistungsausnutzung erreichbar. Darüber hinaus bietet ein solcher Ansatz die Möglichkeit, auch prozessspezifische Zielsetzungen in der Lastkontrolle zu verfolgen. Dies sind im Wesentlichen eine möglichst konstante Energieeinbringung in die Schmelze sowie ein idealerweise ununterbrochenes Aufheizen der flüssigen Schmelze auf die Endtemperatur (sog. Warmfahren) bei höchstmöglicher Leistung zum Ende des Schmelzprozesses. Beides trägt zur Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs und zur Erhöhung der Produktivität bei.
Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und Implementierung einer neuartigen Lastkontrollanlage für ein Elektrostahlwerk, welche die vorgenannten Zielsetzungen mit Hilfe von dynamischen Prädiktionsmodellen in ein herkömmliches Lastmanagement-System integriert.

Im folgenden Kapitel 2 wird das Lastverhalten des Stahlwerkes näher untersucht. Dazu wird die Gesamtlast in einzelne Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen aufgeteilt und es werden mathematische Modelle zur Beschreibung und Vorhersage der jeweiligen Lastgänge hergeleitet. Dabei wird besonders darauf geachtet, die Komplexität der Modelle in einem Rahmen zu halten, der eine Berechnung mit geringem rechentechnischem Aufwand erlaubt. Zusätzlich wird die Zahl der verwendeten Parameter begrenzt, um die Portierbarkeit des Systems auf andere Werke zu erleichtern.
Daran schließt sich in Kapitel 3 zunächst die Beschreibung einiger bereits vorhandener Energiemodelle des Elektrolichtbogenofens an. Diese Modelle werden auf ihre Anwendbarkeit zur Berechnung des verbleibenden Energiebedarfs unter Echtzeitbedingungen hin untersucht. Es folgt die Entwicklung dreier in Echtzeit und unter den gegebenen Bedingungen im Stahlwerk handhabbarer mathematischer Modelle zur Prädiktion des verbleibenden Energiebedarfes und, unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Kapitel 2, der Restlaufzeit des Elektrolichtbogenofens. Anhand von Messdaten werden die entsprechenden Modellparameter identifiziert und die Modelle verifiziert. Im Weiteren werden Methoden zur dynamischen Anpassung der Modellparameter an sich verändernde Prozessbedingungen vorgestellt und verglichen. Nach der Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens werden erste Ergebnisse präsentiert und damit die praktische Nutzbarkeit bewertet.
Kapitel 4 widmet sich der detaillierten Beschreibung und Analyse von herkömmlichen Lastkontrollalgorithmen und Ansätzen, auch im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile bei der Verwendung für ein Elektrostahlwerk. Darauf aufbauend und unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Zielsetzungen wird ein prädiktiver Lastkontrollalgorithmus formuliert.
Die Implementation der prädiktiven dynamischen Lastkontrollstrategie im Stahlwerk der Arcelor Mittal GmbH in Hamburg wird schließlich in Kapitel 5 erläutert. Nach der vollständigen Inbetriebnahme werden im Langzeitversuch mit dieser Anlage erzielte Ergebnisse dargestellt und auf die erreichte Optimierung hin untersucht.
Eine Zusammenfassung mit einem Ausblick auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten schließt die Arbeit ab.

2 Lastverhalten der Verbraucher im Elektrostahlwerk

Das hier betrachtete Elektrostahlwerk der Arcelor Mittal GmbH in Hamburg ist ein typisches Ministahlwerk mit einer Jahresproduktion von über 1 Mio. t Rohstahl. Es besteht aus einem Drehstrom-Elektrolichtbogenofen (engl. Alternating Current Electric Arc Furnace, AC-EAF), einem Pfannenofen, einer Stranggussanlage und einem zweistraßigen Walzwerk. Zusätzlich befinden sich auf dem Werksgelände ein Schrottplatz mit dazugehörigen automatisierungstechnischen Anlagen, ein Schiffsanleger zur Belieferung des Werkes mit Rohstoffen sowie als Besonderheit eine Midrex-Direktreduktionsanlage zur DRI-Produktion. Derartige Anlagen werden bevorzugt dort eingesetzt und betrieben, wo sowohl günstiges Erdgas als auch natürliche Eisenerzvorkommen verfügbar sind [Lüngen 06]. Obwohl diese Standortfaktoren in Hamburg nicht gegeben sind, bietet die Direktreduktionsanlage trotz der vergleichsweise hohen Kosten für das Herantransportieren des Eisenerzes und des Erdgases große Vorteile. Diese bestehen insbesondere darin, dass neben der ggf. möglichen Reduktion des erforderlichen spezifischen Energiebedarfs, den die Zugabe von DRI in die Stahlschmelze nach [Uyen 02], [Adams 01] und [Adams 02] mit sich bringen kann, der Einsatz von DRI die Produktion hochqualitativer Sonderstähle ermöglicht [Bandusch 05]. Weiterhin schafft die Eigenproduktion von DRI einen Handlungsspielraum beim Einkauf des ebenfalls benötigten Stahlschrotts, da die Qualität des zu produzierenden Rohstahls so nicht mehr ausschließlich von der eingesetzten Stahlschrottsorte abhängt. Bestimmte Produktionsanforderungen können mittels des DRI-Anteils eingestellt werden. Somit kann auf Stahlschrottsorten geringerer Güte zurückgegriffen werden, die im Allgemeinen deutlich preisgünstiger sind. Aufgrund dieser Vorteile ist es dem hier betrachteten Stahlwerk innerhalb der letzten 30 Jahre gelungen, sein Produktportfolio von einfachen Stahlqualitäten hin zu Qualitätsstählen mit äußerst geringem Anteil unerwünschter Fremdelemente wie Kupfer, Chrom, Nickel, Molybdän und Zinn weiterzuentwickeln. Einfache Stahlqualitäten kommen dabei z.B. in Maschendrahtgeflechten und Armierungseisen zur Verstärkung von Betonbauwerken zum Einsatz, während hochqualitative Sonderstähle unter anderem in der Automobilindustrie und im Sondermaschinenbau benötigt werden. Mit einem Spezialstahl-Anteil von über 85 % an der eigenen Jahresproduktion konnte sich dieses Werk im Wettbewerb der weltweiten Stahlerzeugung eine stabile Marktposition sichern [Bandusch 05].

Der effiziente Einsatz der zur Stahlproduktion notwendigen elektrischen Energie stellt einen wesentlichen Aspekt zur Beibehaltung und Steigerung der Konkurrenzfähigkeit des Stahlwerkes dar. In diesem Zusammenhang widmet sich die vorliegende Arbeit der Verbesserung der im Werk bestehenden elektrischen Lastkontrollanlage. Ein erster Ansatzpunkt dazu ist die Identifikation und Parametrierung geeigneter mathematischer Modelle, die den elektrischen Lastgang dieses Stahlwerkes beschreiben und für die Dauer der jeweiligen Leistungsbezugsperiode auch prognostizieren können. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bilden eine der Grundlagen für die Entwicklung eines prädiktiven Lastkontrollalgorithmus.

Zur detaillierten Analyse und Identifikation von mathematischen Modellen des elektrischen Lastganges des Stahlwerkes erscheint es sinnvoll, die Gesamtlast in mehrere Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen aufzuteilen. Es bietet sich an, dabei zum einen der anlagentechnisch gegebenen Aufteilung weitestgehend zu folgen und zum anderen diejenigen Aggregate gesondert zu betrachten, die charakteristische Besonderheiten in ihren Lastgängen aufweisen. Des Weiteren soll die Aufteilung so gewählt werden, dass eine Modellierung mit den vorhandenen Messsignalen aus dem Stahlwerk möglich ist. Im Prozessleitsystem des Wer-

kes liegen Einzelmesswerte für die momentanen Leistungsaufnahmen des Elektrolichtbogenofens und des Pfannenofens sowie weitere prozessspezifische Werte vor. Zusätzlich dazu kann aus den Zählerwerten der elektrischen Verbrauchszähler die gesamte momentane Leistungsaufnahme der übrigen Verbraucher des Stahlwerkes errechnet werden.
Unter diesen Voraussetzungen werden im Folgenden die Lastcharakteristiken des Elektrolichtbogenofens, des Pfannenofens sowie der übrigen im Stahlwerk vorhandenen Verbraucher betrachtet. Die übrigen Verbraucher werden dabei als so genannte Grundlast bezeichnet, die somit neben der Stranggussanlage, dem zweistraßigen Walzwerk und der Direktreduktionsanlage alle weiteren vergleichsweise kleinen Verbraucher zusammenfasst.
Neben der Betrachtung der Lastcharakteristiken ist im Hinblick auf die zu entwickelnde Lastkontrollstrategie auch die Beschreibung und Evaluierung bereits bestehender oder zusätzlich dazu implementierbarer Möglichkeiten des Lastkontrollsystems zur Beeinflussung der Leistungsaufnahme der einzelnen Verbraucher notwendig. Dies wird in den folgenden Unterkapiteln ebenfalls behandelt.

2.1 Elektrolichtbogenofen

Mit dem Elektrolichtbogenofen ist ein elektrischer Verbraucher gegeben, der den Großteil der gesamten Anschlussleistung eines Elektrostahlwerkes ausmacht. Diese besondere Lastverteilung innerhalb des Stahlwerkes ist es, welche die Anwendung herkömmlicher Lastkontrollanlagen an ihre Grenzen stoßen lässt, da hier üblicherweise von einer Aufteilung der Gesamtlast eines Werkes in eine Reihe von gleichartigen Verbrauchern mit ähnlichen Anschlussleistungen ausgegangen wird. Eine Berücksichtigung der Lastcharakteristik von Elektrolichtbogenöfen ist daher mit diesen herkömmlichen Systemen nicht realisierbar und stellt einen Ansatzpunkt für einen neuartigen verbesserten Lastkontrollalgorithmus dar. Folglich ist die Beschreibung und Modellierung des Lastganges des Elektrolichtbogenofens im Hinblick auf die Prädiktion des bevorstehenden gesamten Leistungsbezuges des Werkes von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus kann von Seiten der Lastkontrollanlage auf die Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens eingewirkt werden, so dass er damit als Stellglied für einen möglichen prädiktiven Lastkontrollalgorithmus zu betrachten ist. Die Modellierung der Leistungsaufnahme sollte daher auch die Möglichkeit bieten, die zu erwartenden Änderungen, welche aus solchen LKA-bedingten Einwirkungen resultieren, im Vorhinein abzuschätzen. Bevor ein geeignetes mathematisches Modell gefunden werden kann, wird zunächst der prinzipielle Aufbau, die Funktionsweise und der Prozessablauf des Lichtbogenofens näher beschrieben.

2.1.1 Technik von Elektrolichtbogenöfen

Der von William Siemens im Jahre 1880 vorgestellte erste Elektrolichtbogenofen wurde mit Gleichstrom betrieben [Siemens 1880]. Aufgrund der Schwierigkeit, Gleichstrom über weite Strecken verlustarm zu übertragen und somit leistungsfähige elektrische Gleichstrom-Versorgungsnetze zu errichten, hat sich in der flächendeckenden elektrischen Energieversorgung die Drehstromtechnik durchgesetzt. Um das von Siemens erdachte Prinzip elektrothermischer Energieeinbringung mittels Lichtbögen auch an Drehstromnetzen nutzbar zu machen, entwickelte Heroult die ersten Drehstrom-Elektrolichtbogenöfen. Diese wurden Anfang des 20. Jahrhunderts zunächst hauptsächlich für die Sonderstahlproduktion industriell eingesetzt [Kriz 1929] [Riecke 1926]. Der Einsatz der Gleichstromofentechnik (engl.: Direct

Current Electric Arc Furnace, DC-EAF) konnte erst viele Jahrzehnte später in den 1980er Jahren mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Halbleiter für die benötigten Gleichrichteranlagen erfolgen. Heute stehen beide Ausführungsvarianten gleichwertig mit ähnlichen möglichen Anschlussleistungen nebeneinander [Bowman 95] [Köhle 94]. Die Vorteile des AC-EAF liegen dabei im vergleichsweise einfachen Aufbau und der langen Erfahrungsgeschichte, die einen optimalen Betrieb ermöglicht. Als Nachteile sind hier die nicht zu vernachlässigenden Netzrückwirkungen anzuführen, die der AC-EAF im versorgenden Netz verursacht. Mit der Entwicklung der DC-EAF erhoffte man sich eine Verbesserung dieser Situation, da diese Elektrolichtbogenöfen durch die benötigte Gleichrichteranlage vom versorgenden Netz nahezu abgekoppelt sind. Dies legte die Vermutung nahe, dass die Netzrückwirkungen dieser Aggregate deutlich weniger belastend ausfallen und sie somit insbesondere für den Betrieb an so genannten schwachen Netzen prädestiniert sind. Schwache Netze sind dabei solche elektrischen Versorgungsnetze, in denen der gesamten angeschlossenen Verbraucherleistung eine relativ geringe gesamte Erzeugerleistung gegenübersteht. Tatsächlich ist zwar im Normalfall der Einsatz einer Kompensationsanlage sowohl für AC- als auch für DC-EAF notwendig, um die durch das induktive Verhalten des AC-EAF bzw. von der Gleichrichteranlage des DC-EAF hervorgerufene Blindleistung zu eliminieren. Die als Flicker bezeichneten langsamen Schwankungen in der Versorgungsspannung des Anschlussnetzes gehen jedoch beim DC-EAF im Vergleich zum AC-EAF zurück, da diese hauptsächlich von Schwankungen der Impedanzen der angeschlossenen Verbraucher verursacht werden. Als neuer, störender Effekt treten mit dem Betrieb der Gleichrichteranlagen hochfrequente Störungen im Versorgungsnetz auf, die auf das Schaltverhalten der Leistungshalbleiter zurückzuführen sind, sich jedoch mittels geeigneter Filteranlagen gut dämpfen lassen. Für den Betrieb auch an schlecht stabilisierten schwachen Netzen erscheinen DC-EAF besser geeignet, da diese schwachen Netze empfindlicher auf die von AC-EAF hervorgerufenen, möglicherweise unkompensierten Blindströme und niederfrequente Flickereffekte reagieren als auf die hochfrequenten Störeffekte durch AC-EAF [Arlt 06] [Köhle 94]. Im Vergleich zum AC-EAF liegen für den DC-EAF weniger langfristige Erfahrungswerte vor und auch der technische Aufbau ist bedingt durch die Gleichrichteranlage um einiges komplexer.

Bild 2.1 zeigt den Aufbau eines Drehstrom- und eines Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens mit den zugehörigen elektrischen Anschlüssen. In beiden Fällen ist das Ofengefäß, in dem der Stahlschrott eingeschmolzen wird, ein annähernd zylindrischer Körper mit einem Durchmesser von ca. 4 – 7 m, einer Höhe von 3 – 4 m und einem Fassungsvermögen von üblicherweise 70 – 140 t [Kirschen 07b], der auf einer hydraulisch neigbaren Bühne montiert ist. Weiterhin ist es mit Feuerfestmaterial ausgemauert und an den Wänden und am aufschwenkbaren Deckel mit einer Wasserkühlung versehen.
Je nachdem, ob es sich um einen DC- oder AC-EAF handelt, sind eine oder drei Graphitelektroden mit Durchmessern von 75 – 80 cm (DC) [Friedrich 02] bzw. 50 – 70 cm (AC) [Friedrich 04] an beweglichen Elektrodentragarmen angebracht, so dass die Elektroden durch eine dafür vorgesehene Öffnung im Ofendeckel (sog. Deckelherz) in das Gefäß eingefahren werden können. Im Falle eines DC-EAF ist ein Teil des Gefäßbodens elektrisch leitend ausgeführt und bildet die so genannte Bodenelektrode. Über den Kontakt des Stahlschrotts zu dieser Bodenelektrode wird somit der Stromkreis von der Gleichrichteranlage über die Elektroden-Zuleitung, den Lichtbogen, den Schrott und die Bodenelektrode zurück zur Gleichrichteranlage geschlossen. Beim AC-EAF ist eine solche Bodenelektrode nicht erforderlich, da hier ein Drehstromsystem vorliegt. Der Schrott bildet dabei den freien Sternpunkt

des so genannten Hochstromkreises, d.h. des Stromkreises, der ofenseitig an den Ofentransformator angeschlossen ist. So wird der Schrott von Wechselstrom durchflossen, der je nach Phasenlage über eine bzw. zwei der drei Elektroden und die dazugehörigen Lichtbögen hinein- und über die verbleibenden Lichtbögen und Elektroden wieder abfließt. Bei Drehstromöfen werden häufig Drosselspulen zur Erhöhung der Kurzschlussreaktanz installiert, die gleichzeitig den Kurzschlussstrom begrenzen und damit sowohl die Belastung des Ofens selbst sowie des versorgenden Netzes in diesem Fall reduzieren. Die Drosselspulen werden bei AC-EAFs auf der Hochspannungsseite vor dem Ofentransformator im Dreieck zwischen die drei Phasen geschaltet. Beim Gleichstromofen kommt ebenfalls eine Drosselspule zum Einsatz, wobei diese nun auf der Hochstromseite montiert wird. Sie dient insbesondere zur Glättung des Gleichstroms [Bergmann 92].

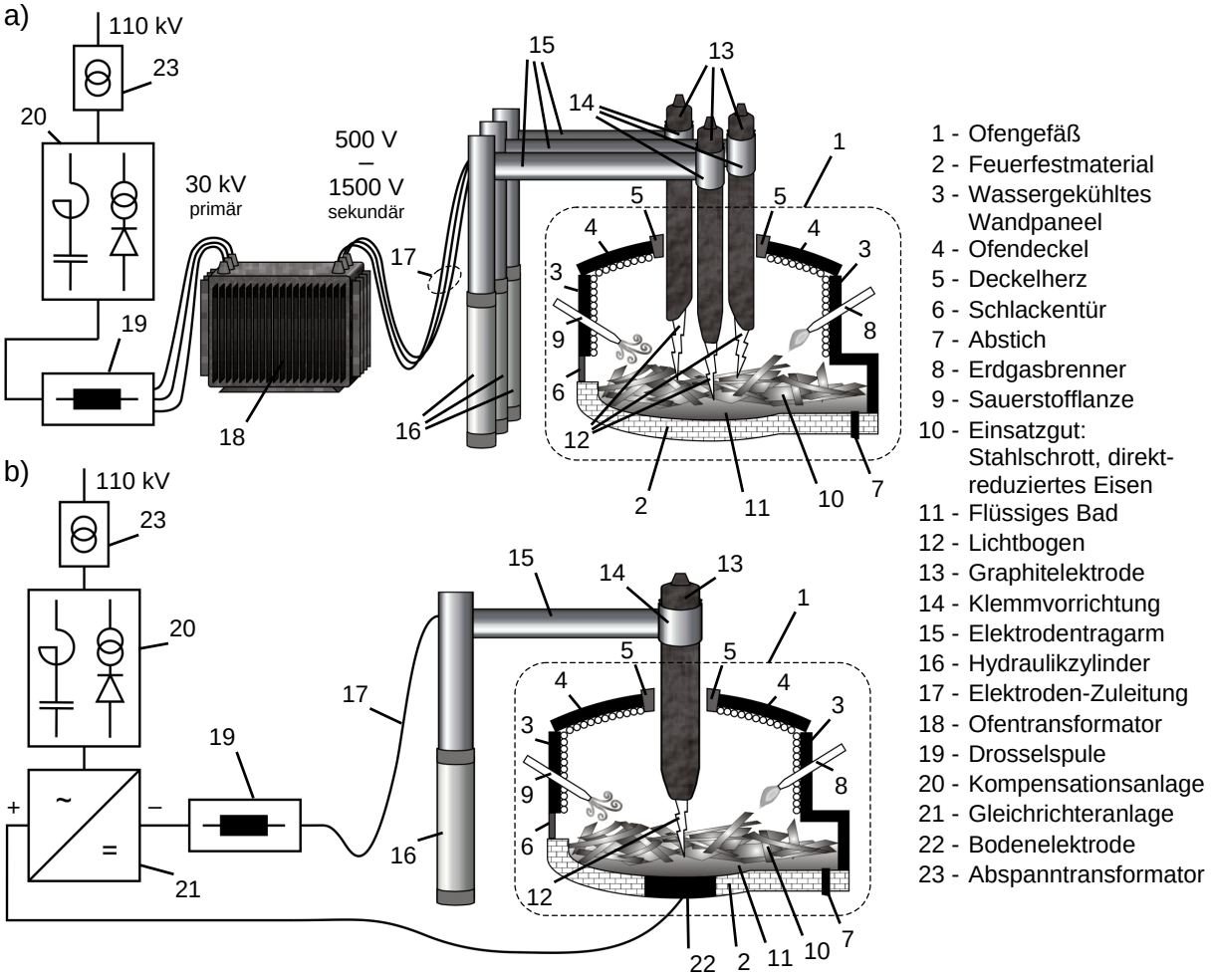


Bild 2.1: Aufbau und Prinzipschaltung
a) Drehstrom-Elektrolichtbogenofen, b) Gleichstrom-Elektrolichtbogenofen

Durch die hohen Betriebsströme und -temperaturen verbrauchen sich die Elektroden nach und nach von unten her. Dieser Effekt wird als Abbrand bezeichnet. Um ein entsprechendes Nachführen von Elektrodenmaterial zu ermöglichen, ist die Verbindung von Elektrodentragarm und Elektrode als Klemmvorrichtung ausgeführt. Die Elektroden als solche bestehen aus mehreren gleichartigen, miteinander verschraubten Einzelsegmenten. So kann der durch Abbrand während des Betriebs entstandenen Längenverlust ausgeglichen werden, indem bei ausgeschaltetem Ofen ein neues dieser Elektrodensegmente an das obere Ende ange-

schraubt und dann die gesamte Elektrode durch die Klemmvorrichtung am Tragarm nach unten verschoben wird.
Die thermische Energieeinbringung in die Schmelze erfolgt teilweise durch den Stromfluss im Stahl, der Hauptanteil der Energieumwandlung von elektrischer in thermische Energie erfolgt jedoch durch die Lichtbögen selbst. Ein elektrischer Lichtbogen erzeugt bei Plasmatemperaturen von bis zu 10000 K enorme Strahlungsleistungen [Block 95] [Nanjo 73]. Darüber hinaus gibt der Lichtbogen durch Konvektion und das Ausbilden einer Lichtbogenflamme Wärmeenergie ab [Jordan 76]. Heute erreichbare Leistungsdaten moderner Lichtbogenöfen sind Stromstärken von bis zu 130 kA für DC-EAF und 95 kA pro Phase für AC-EAF sowie Lichtbogenspannungen von bis zu 915 V für DC-EAF und bis zu 750 V für AC-EAF. Moderne Drehstromöfen erreichen damit insgesamt eine Anschlussleistung von bis zu 240 MVA und Gleichstromöfen bis zu 130 MVA.
Zusätzlich zu der elektrischen Energie, welche die Lichtbögen in den Ofen eintragen, kann je nach Ofenausführung noch Energie mit Hilfe von Erdgasbrennern (CH_4) und Sauerstofflanzen (O_2) eingebracht werden. Brenner und Lanzen sind oberhalb des Badspiegels im Ofengefäß angebracht. Die hierdurch eingebrachte Leistung liegt im Bereich von einigen 10 MW und macht daher neben den Lichtbögen nur einen geringen Anteil aus.

Die Leistungsabgabe der Lichtbögen hängt von den entsprechenden elektrischen Größen, d.h. Lichtbogenstrom und -spannung, ab. Sowohl beim Gleichstrom- als auch beim Drehstromofen können die Elektrodentragarme mitsamt der in den Klemmvorrichtungen fest eingespannten Elektroden in der Höhe verfahren werden, woraus gleichzeitig eine Längenänderung der Lichtbögen resultiert. Da die Lichtbogenspannung von der Lichtbogenlänge abhängt, ist hiermit eine Möglichkeit gegeben, auf die Leistungseinbringung in den jeweiligen Ofen einzuwirken. Dies wird in der so genannten Elektrodenregelung realisiert, die bei beiden Ofentypen die schnellveränderlichen elektrischen Größen regelt. Aufgrund der unterschiedlichen Bau- und Funktionsweisen der beiden Ofentypen unterscheiden sich die Funktionsweisen der jeweiligen Elektroden- und übergeordneten Leistungsregelung jedoch im Detail, was im Folgenden kurz erläutert wird.
Beim Gleichstromofen wird durch die Elektrodenregelung ausschließlich die Lichtbogenspannung geregelt. Darüber hinaus kann durch entsprechende Ansteuerung der Thyristoren in der Gleichrichteranlage ein bestimmter Lichtbogenstrom eingestellt werden. Damit ist es möglich, Lichtbogenstrom und -spannung weitestgehend unabhängig voneinander einzustellen bzw. zu regeln. Die durch diese beiden Eingriffsmöglichkeiten gegebenen Regelkreise sind beim DC-EAF über den Lichtbogen miteinander gekoppelt und unterscheiden sich durch ihre unterschiedlichen Zeitkonstanten; die Regelung der Spannung über die Lichtbogenlänge ist aufgrund der massiven mechanischen Komponenten der Tragarmsäule eher langsam, während die Leistungshalbleiter in der Gleichrichteranlage eine schnelle Regelung des Lichtbogenstromes erlauben [Treppschuh 08]. Für die Fahrweise eines Gleichstromofens werden Leistungsarbeitspunkte vorgegeben, die jeweils einen bestimmten Strom- und einen bestimmten Spannungssollwert enthalten.
Beim Drehstromofen dagegen wirkt die Elektrodenregelung gleichzeitig auf Strom und Spannung ein, da sich aufgrund der Kopplung der einzelnen Stränge des Drehstromsystems Änderungen der einen Größe immer auch auf die jeweils andere Größe auswirken. Daher wird hier nicht die Lichtbogenspannung als Regelgröße verwendet, sondern es wird auf Hilfsgrößen wie z.B. die Strangimpedanz zurückgegriffen. Die Impedanz kann dabei über ein Ersatzschaltbild des Hochstromkreises ausgedrückt werden. Somit ist es möglich, über die Rege-

lung der Impedanz gleichzeitig die Ströme auf den gewünschten Sollwerte einzuregeln [Krüger 98]. Zusätzlich dazu kann beim Drehstromofen eine Außenleiterspannung für den Hochstromkreis vorgegeben werden. Dies wird durch den Ofentransformator realisiert, der die Zwischenspannung von 30 kV auf die am Ofen benötigte Spannung herunter transformiert und dabei sekundärseitig, d.h. ofenseitig, über mehrere Anzapfungen verfügt. Diese können wahlweise über einen unter Last schaltbaren Stufenschalter an den Ofen angeschaltet werden. Jede Anzapfung bzw. Transformatorstufe entspricht dabei einer bestimmten Außenleiterspannung. Anders als beim Gleichstromofen werden hier die Leistungsarbeitspunkte durch eine Kombination von Außenleitersollspannung bzw. Transformatorstufe und Lichtbogensollstrom vorgegeben.

Bei beiden Lichtbogenofen-Typen stellen sich eine Reihe von Störgrößen dar, denen innerhalb der jeweiligen Elektrodenregelung adäquat begegnet werden muss. Zunächst ist hier das nach Treppschuh nicht vorhersehbare dynamische Verhalten des Schrotts während des Einschmelzvorganges zu nennen [Treppschuh 08]. Stürzt beispielsweise das Schrotthaufwerk plötzlich in sich zusammen, so verändert sich dadurch unmittelbar die Länge des Lichtbogens, was wiederum Auswirkungen auf die elektrischen Größen nach sich zieht, die es auszuregeln gilt. Weiterhin kann es vorkommen, dass Spannungsüberschläge zum Ofendeckel oder -gefäß auftreten. Dies geschieht insbesondere dann, wenn sich Schlackenanbackungen, so genannte Verbärungen, gebildet haben, die einen Stromfluss von der Elektrode zum Gefäß bzw. zwischen zwei Elektroden erlauben. Diese Spannungsüberschläge sind der Lebensdauer des Ofens sehr abträglich und müssen daher von der Elektrodenregelung schnellstmöglich erkannt und mit entsprechenden Gegenmaßnahmen beendet werden. Zuletzt soll hier noch das von Ahlers beschriebene stochastische Verhalten der Lichtbögen selbst angeführt werden [Ahlers 88]. Dies bedeutet, dass die Lichtbögen auch bei flachem Bad, d.h. wenn der Schrott bereits vollständig verflüssigt ist, nicht stetig und unbeweglich auf einem Fußpunkt brennen, sondern in höchst unvorhersehbarer Weise umherwandern, wodurch sich ihre Länge verändert. Auch diesen Längen- und die damit unmittelbar verbundenen Strom- und Spannungsänderungen muss mit der Elektrodenregelung begegnet werden.

Die Vorgabe der Leistungsarbeitspunkte geschieht häufig durch starre Fahrdiagramme, die je nach Schmelzfortschritt, der anhand der bereits eingebrachten Gesamtenergie bestimmt wird, eine bestimmte Kombination von Strom- und Spannungssollwert (für DC-EAF) bzw. von Transformatorstufen- und Impedanz- bzw. Stromsollwert (für AC-EAF) vorgeben. Neuere Entwicklungen gehen jedoch dahin, diese Fahrdiagramme durch z.T. adaptive übergeordnete Leistungsregelungen zu ersetzen, die eine Reihe von weiteren prozesstechnischen Größen für die Bestimmung des momentanen, idealen Leistungsarbeitspunktes mit berücksichtigen. Als Beispiel solcher weiteren Größen seien hier das thermische Niveau im Ofen, das sich durch die Kühlwassertemperaturen der einzelnen Kreisläufe herleiten lässt, die Schallemission des Ofens sowie der Oberwellengehalt der Ströme und Spannungen, die beide Rückschlüsse auf den Zustand der Schmelze erlauben, genannt [Grigat 86] [Pfeiler 93] [Homeyer 01]. Die Untersuchungen von Krüger und Treppschuh zeigen, dass mit solchen Leistungsregelungen erhebliche Produktivitätssteigerungen von bis zu 8,1 % für AC-EAF [Krüger 98] und 7,5 % für DC-EAF [Treppschuh 08] erreicht werden können.

Die Lastkontrollanlage des jeweiligen Stahlwerkes ist der beschriebenen Elektrodenregelung, den Fahrdiagrammen sowie den gegebenenfalls vorhandenen Leistungsregelungen übergeordnet und kann unabhängig von den Betriebsbedingungen im Ofen den maximalen Leistungsarbeitspunkt herabsetzen, wenn dies zur Einhaltung des Leistungslimits erforderlich ist. Damit ist die eingangs erwähnte Möglichkeit zur direkten Einwirkung der LKA auf die

aktuelle Leistungsaufnahme des Ofens gegeben. Im Falle von AC-EAF wird dies durch Herunterschalten der aktuellen Transformatorstufe und damit der am Ofen anliegenden Außenleiterspannung realisiert, während bei DC-EAF die Verminderung der Leistungseinbringung durch entsprechende Vorgabe des Strom- und Spannungssollwertes erfolgt.

Für die Modellierung der elektrischen Leistungsaufnahme eines Lichtbogenofens ist neben der Kenntnis der grundsätzlichen Funktionsweise auch die Betrachtung des Prozessablaufes einer Schmelze erforderlich. Dieser wird im Folgenden kurz beschrieben.
Zunächst wird der Schrott, der üblicherweise auf dem Schrottplatz des betreffenden Werkes vorgehalten, sortiert und bereitgestellt wird, mit Hilfe eines so genannten Korbes, der etwa 60 bis 80 t fasst, in das Ofengefäß eingefüllt (chargiert).
Nach dem Schrottchargieren wird der Ofendeckel geschlossen und die Elektroden durch das Deckelherz herabgesenkt. Dann werden bei kleinem Leistungsarbeitspunkt die Lichtbögen gezündet und der Schrott beginnt zu schmelzen. Dabei bilden sich direkt unter den Elektroden Krater im Schrotthaufwerk aus, so dass sie sich gewissermaßen in den Schrott hineinbohren. Diese erste Phase wird daher auch als Bohrphase bezeichnet. Charakteristisch hierfür ist eine stark schwankende Leistungsaufnahme des Ofens, da es in dieser Phase häufig zu Sprüngen des Lichtbogenfußpunktes auf der inhomogenen Schrottoberfläche bis hin zum Abreißen der Lichtbögen kommt.
Ist der Hauptteil des Schrottes verflüssigt, schließt sich die Hauptschmelzphase an. In dieser Phase kann der Schmelzprozess je nach Produktionsanforderungen unterbrochen werden, um einen weiteren Schrottkorb zu chargieren. Die Vorgänge des Aufschmelzens und Nachchargierens werden ggf. noch mehrmals wiederholt. Wenn schließlich der gesamte Schrott nach und nach in den Ofen eingesetzt ist, werden in der letzten Hauptschmelzphase, je mehr sich die Vorgänge im Ofen und damit die Leistungsaufnahme beruhigen, immer höhere Leistungsarbeitspunkte angefahren. Gleichzeitig werden die chemischen Brenner abgeschaltet.
In der Hauptschmelzphase wird die Schrottoberfläche mit zunehmendem Anteil bereits aufgeschmolzenem Materials immer planer, so dass die Lichtbögen nun immer weniger von Schrott umhüllt werden. Um dennoch ein direktes Auftreffen der von den Lichtbögen abgegebenen Strahlungsenergie auf die Ofenwände und ein dadurch verursachtes Überhitzen der Wandpaneele zu verhindern, werden auf der Schmelze aufschwimmende Elemente wie Kalzium-, Magnesium-, Silizium- und Eisenoxid (CaO, MgO, SiO_2, FeO_n) unter Zugabe von Feinkohle und Sauerstoff (O_2) zu einer so genannten Schaumschlacke aufgeschäumt. Diese nimmt die Strahlungsenergie auf und gibt sie indirekt als Wärme wieder an die Schmelze ab, wodurch sich der thermische Wirkungsgrad der Lichtbögen erhöht [Ameling 86b].
Mit dem Aufschäumen der Schlacke wird, soweit im jeweiligen Stahlwerk verfügbar, mit der kontinuierlichen Förderung von direktreduziertem Eisenschwamm begonnen. Durch diese Maßnahme wird die Schaumschlacke stabilisiert, da der im Eisenschwamm enthaltene Kohlenstoff ebenso wie die zugegebene Feinkohle für die zum Aufschäumen der Schlacke notwendigen chemischen Reaktionen erforderlich sind [Homeyer 01]. Die Eisenschwammzugabe dient darüber hinaus zur Einstellung der Qualität des erschmolzenen Stahls auf die gewünschten metallurgischen Eigenschaften. Insbesondere kann so relativ betrachtet der Anteil eventuell im Schrott vorhandener Fremdelemente wie z.B. Kupfer vermindert werden.
Zum Ende des Schmelzprozesses hin fällt die Schaumschlacke langsam wieder in sich zusammen und wird über die Schlackentür aus dem Ofengefäß abgelassen. Daraufhin erfolgt das so genannte Warmfahren, wobei die Schmelze gezielt auf eine Temperatur von ca. 1640 °C gebracht wird. Wenn diese Zieltemperatur erreicht ist, werden die Lichtbögen abge-

schaltet, die Elektroden aus dem Ofen herausgefahren und die Schmelze abgestochen, d.h. das Ofengefäß wird im Ganzen so weit gekippt, dass der flüssige Stahl durch eine verschließbare Abstich-Öffnung im unteren Teil des Ofens in eine so genannte Pfanne abfließt. Die Zeitspanne vom Abstich einer Charge bis hin zum Abstich der folgenden wird allgemein Chargenfolgezeit oder auch Tap-to-Tap-Time genannt. Sie beträgt in modernen Elektrostahlwerken durchschnittlich 60 min. In dieser Zeit werden im Mittel 100 t flüssiger Stahl produziert.
Die Chargenfolgezeit oder, bezogen auf die einzelne Charge, die Chargendauer, setzt sich aus der so genannten Stromflusszeit bzw. Power-On-Time und den Nebenzeiten zusammen. Die Stromflusszeit bezeichnet dabei die Summe der Zeitspannen in einer Charge, während derer der Ofen eingeschaltet ist. Die Nebenzeiten werden genutzt, um ggf. bei ausgeschaltetem Ofen weiteren Schrott zu chargieren, Proben zur Bestimmung der Stahlqualität und -temperatur aus der Schmelze zu ziehen oder um den Abstich vorzunehmen. Der Ersatz des verbrauchten Elektrodenmaterials durch das Nachführen neuer Elektrodensegmente sowie sonstige Wartungsarbeiten am Ofen entfallen ebenfalls auf die Nebenzeiten.

2.1.2 Modellierung des Lastganges eines Drehstrom-Elektrolichtbogenofens

Im hier betrachteten Stahlwerk der Arcelor Mittal GmbH in Hamburg befindet sich ein in Drehstromtechnik ausgeführter Lichtbogenofen mit einer Anschlussleistung von 120 MVA und einem durchschnittlichen Abstichgewicht von 130 t. Der zugehörige Ofentransformator verfügt an der Sekundärseite über 18 Anzapfungen, von denen jedoch im Betrieb nur die oberen sieben genutzt werden (d.h. die Transformatorstufen 12 – 18). Die Transformator-Anzapfungen sind so gewählt, dass das Herauf- bzw. Herunterschalten um eine Stufe einer Änderung der in den Ofen eingebrachten elektrischen Wirkleistung um ca. 5 MW entspricht.
Prozesstechnisch werden in diesem Ofen die oben erläuterten Schritte in jeder Charge durchlaufen, wobei je nach Produktionsanforderungen ein bis drei Schrottkörbe chargiert werden. Für die weiteren Betrachtungen wird daher zwischen Ein-, Zwei- und Dreikorbchargen unterschieden. Vereinzelt werden auch Schmelzen mit 100 % Eisenschwamm-Einsatz, also ohne Schrottzugabe, produziert; diese werden im Folgenden als Nullkorbchargen bezeichnet. Die Anteile der einzelnen Chargenarten an der Gesamtanzahl ergeben sich aus Messreihen über ca. 2000 Chargen zu 11 % Nullkorbchargen, 56 % Einkorbchargen, 26 % Zweikorbchargen und 7 % Dreikorbchargen.
Der betrachtete Ofen war in der Vergangenheit bereits des Öfteren Ziel wissenschaftlicher Untersuchungen und verfügt im Ergebnis unter anderem über eine moderne adaptive Elektrodenregelung mit übergeordneter Leistungsregelung, wie sie im Vorigen bereits vorgestellt wurde und die insbesondere das aktuelle thermische Belastungsniveau des Ofengefäßes berücksichtigt [Krüger 98].
Für die Modellierung der Leistungsaufnahme kann daher nicht von starren Fahrdiagrammen ausgegangen werden. Vielmehr bedarf es eines dynamischen Modells, das die Zustände im Ofen anhand der aktuellen Leistungsmesswerte sowie weiterer im Prozessleitsystem des Stahlwerkes bereits vorhandener Werte berücksichtigen kann. Des Weiteren ist die Modellierung so zu gestalten, dass sich die Leistungs-Prognosewerte mit geringem rechentechnischem Aufwand bestimmen lassen.
Zunächst werden die Lastgänge der Chargen mit Schrotteinsatz näher untersucht.

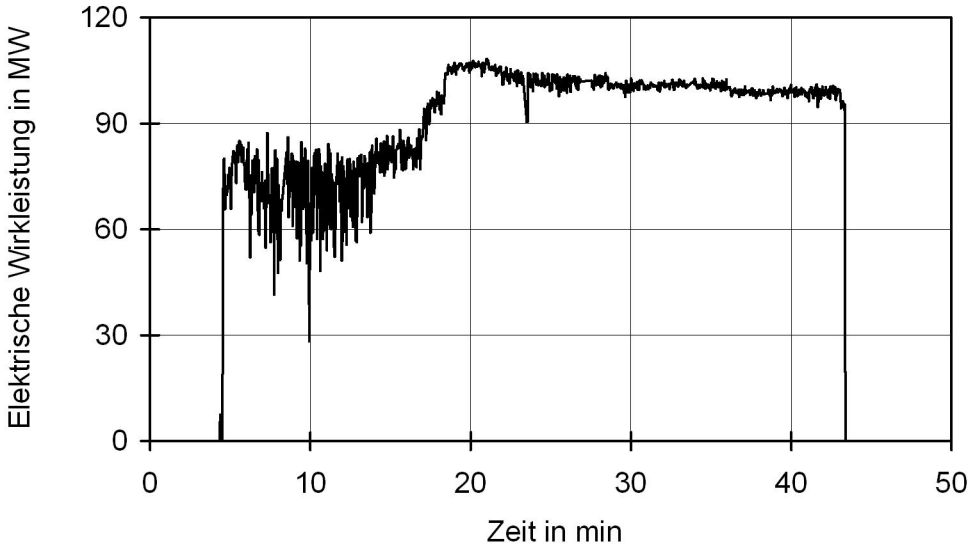


Bild 2.2: Typischer Lastverlauf des Lichtbogenofens während einer Einkorbcharge

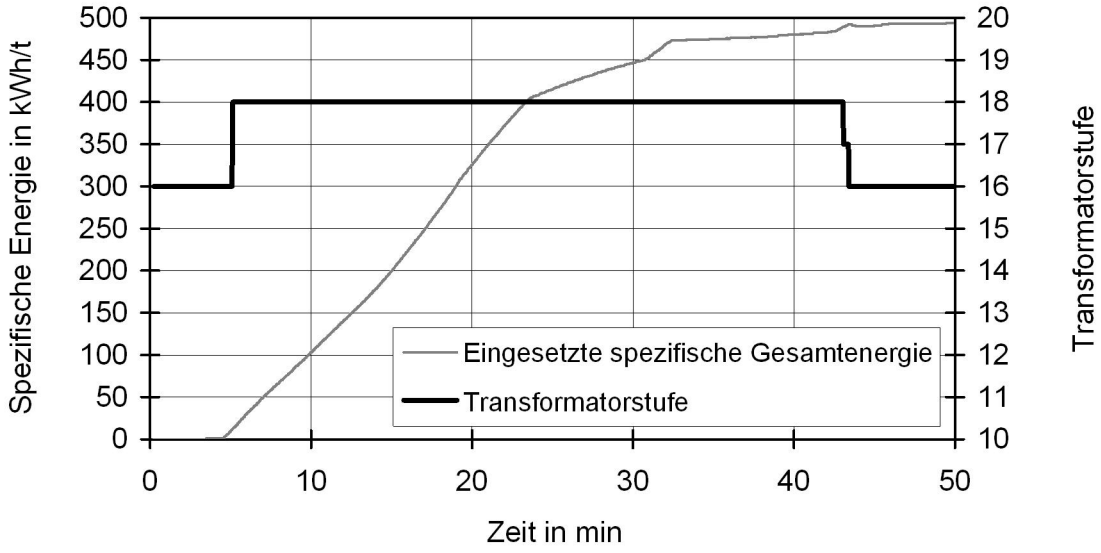


Bild 2.3: Verlauf der eingesetzten spezifischen Gesamtenergie und der Transformatorstufe während einer Einkorbcharge

Bild 2.2 zeigt einen typischen Verlauf der aufgenommenen elektrischen Wirkleistung des Lichtbogenofens während einer Schmelze, bei der ein Schrottkorb chargiert wird. Die aufgenommene Wirkleistung variiert beträchtlich, zum einen wegen der zuvor erwähnten Störgrößen, die an den Lichtbögen auftreten, und zum anderen wegen der verschiedenen Prozessabschnitte und der damit verbundenen unterschiedlichen elektrischen Arbeitspunkte, welche die Schmelze durchläuft. Bezüglich der Nebenzeiten kann festgestellt werden, dass zu Beginn ca. 4 min auf das Chargieren und zum Ende knapp 5 min auf den Abstich der Schmelze entfallen. **Bild 2.3** zeigt die zugehörigen Verläufe der Transformatorstufen und der eingesetzten spezifischen Gesamtenergie. Letztere nimmt ab ca. 24 min mit deutlich geringerer Steigung als zuvor zu, da ab diesem Zeitpunkt kontinuierlich DRI in den Ofen gefördert wird und sich somit die Bezugsmasse für diese spezifische Größe stetig erhöht. Die Bedeutung

von Transformatorstufe und spezifischer Gesamtenergie für die Modellierung des Lastganges wird im Folgenden näher erläutert.

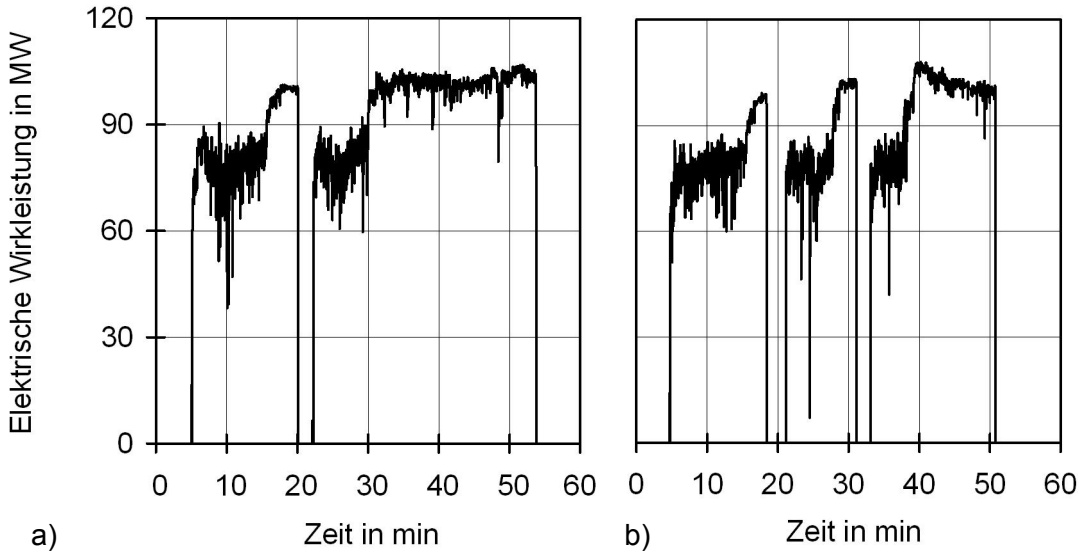


Bild 2.4: Typischer Lastverlauf des Lichtbogenofens während einer Charge, a) zwei Schrottkörbe, b) drei Schrottkörbe

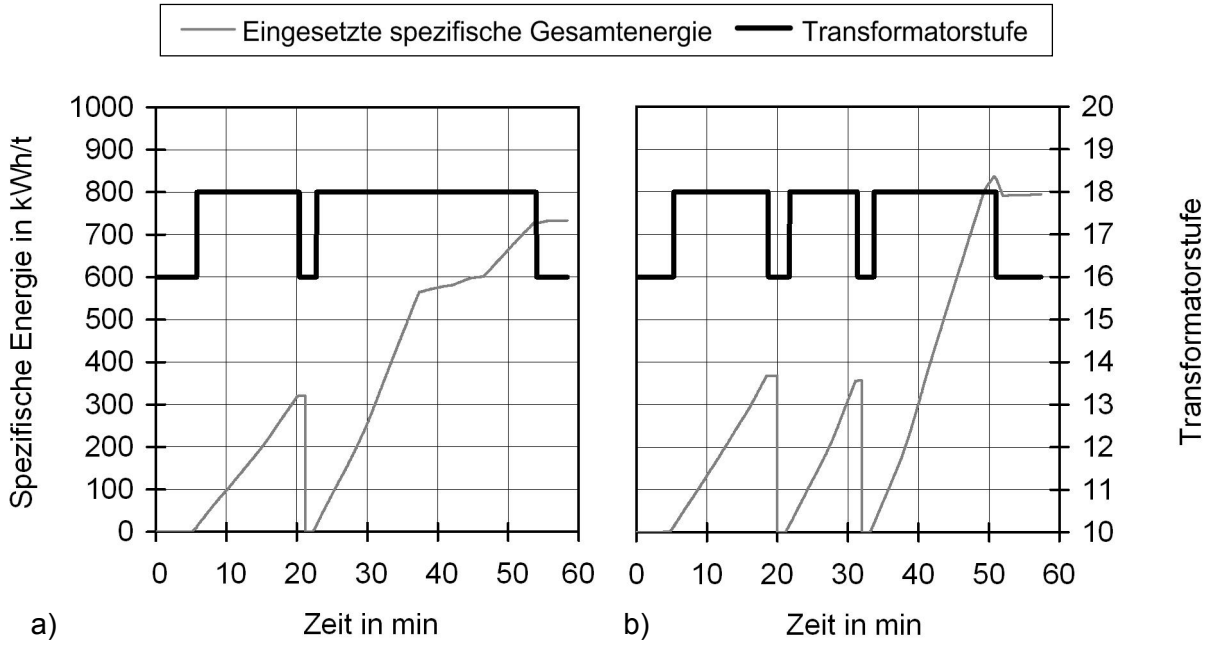


Bild 2.5: Verlauf der eingesetzten spezifischen Gesamtenergie pro Korb und der Transformatorstufe, a) zwei Schrottkörbe, b) drei Schrottkörbe

Der Verlauf der Wirkleistung des Ofens für jeweils eine typische Zwei- und eine Dreikorbcharge sowie die Transformatorstufen und die eingebrachte spezifische Gesamtenergie pro Korb sind in **Bild 2.4** und **Bild 2.5** dargestellt.

Die bei Mehrkorbchargen im Vergleich zu Einkorbchargen zusätzlich erforderlichen Nebenzeiten zum Chargieren der weiteren Körbe sind in Bild 2.4 (in Teilbild a) zwischen 20 und 23 min, in Teilbild b) zwischen 18 und 21 min sowie zwischen 31 und 34 min) deutlich zu erkennen. Weiterhin zeigen die Diagramme, dass bei Mehrkorbchargen die Lastcharakteris-

tik beim Einschmelzen des ersten Korbs derjenigen einer vergleichbaren Einkorb-Charge entspricht. Danach erfolgt das Einschmelzen der weiteren Schrottkörbe mit etwas weniger Lastveränderungen und -sprüngen gleichmäßiger und mit jedem weiteren Korb auch bei höherer Leistung. Dies ist dadurch erklärlich, dass sich bereits flüssiger Stahl aus vorherigen Körben im Ofen befindet, wodurch sich der Lastgang tendenziell beruhigt und somit ein höheres Leistungsniveau erlaubt.
Für eine umfassende Modellierung und Prognose der Lastgänge in den verschiedenen Chargen wäre es notwendig, sowohl den zeitlichen Verlauf der Wirkleistung während der Stromflusszeit zu beschreiben, als auch die Zeitpunkte und -dauern der auftretenden Nebenzeiten ohne Leistungsaufnahme vorherzusagen.
Die Auswertung mehrerer tausend Chargen aller Arten zeigt jedoch, dass es mit den für die Modellierung zur Verfügung stehenden Messwerten kaum vorhersehbar ist, wann und ggf. wie lange die Stromflusszeit während einer Schmelze unterbrochen wird. Dies liegt zum einen darin begründet, dass einige Nebenzeiten ursächlich als Reaktion auf unvorhersehbare Ereignisse auftreten. Zum anderen wäre es für die Prädiktion der planbaren Nebenzeiten, wie z.B. zum Elektroden-Nachführen, notwendig, eine große Menge weiterer Prozessdaten in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Dies würde jedoch die Komplexität der Modellierung weit über das angestrebte Maß hinaus erhöhen.
Des Weiteren erscheint eine solche umfassende Modellierung inklusive aller Nebenzeiten im Hinblick auf die angestrebte Optimierung der Leistungsausnutzung innerhalb der vom EVU vorgegebenen Leistungsmessperioden auch nicht zielführend. Ein Optimierungspotential ergibt sich grundsätzlich nur in den Messperioden, in denen der Prozessablauf einen vollständigen Bezug der durch das Leistungslimit zur Verfügung stehenden elektrischen Energie erlaubt. Eine solche Konstellation kann sich am ehesten während der Einkorbchargen ergeben, da hier die größte Wahrscheinlichkeit besteht, dass der Ofen eine ganze Messperiode hindurch seine maximale Leistung bezieht. Folglich ist hier das größte Optimierungspotential zu erwarten. Treten dagegen innerhalb der Bezugsperiode prozesstechnisch erforderliche Nebenzeiten auf, so kann das Leistungslimit unabhängig von der verfolgten Lastkontrollstrategie kaum mehr erreicht werden. Dies ist insbesondere bei Mehrkorb-Chargen der Fall, denn hier kommt es bedingt durch das wiederholte Chargieren und Einschmelzen häufig zu Phasen des Ofenstillstands bzw. niedriger Leistungseinbringung. Auf eine Modellierung der Chargier-Nebenzeiten bei Mehrkorbchargen sowie die o.g. sonstigen Nebenzeiten während einer Charge wird daher verzichtet.
Die Unterbrechung der Stromflusszeit beim Abstich einer jeden Charge stellt jedoch einen im Weiteren noch gesondert zu betrachtenden Fall dar, für den die gerade getroffenen Aussagen bezüglich der Nebenzeiten innerhalb einer Charge nicht uneingeschränkt übernommen werden können. Das Warmfahren bis hin zum Abstich erfolgt üblicherweise bei hoher Leistungseinbringung. Daher kann das Leistungslimit in den Messperioden, in denen der Abstich erfolgt, trotz der auf den Abstich folgenden Nebenzeit ohne Stromfluss erreicht oder sogar überschritten werden. Daraus ergibt sich für die Bezugsoptimierung die Notwendigkeit, den Abstichzeitpunkt einer jeden Charge zu prognostizieren. Dieser Problemstellung widmet sich Kapitel 3.
Zur Modellierung des Lastganges des Lichtbogenofens während der Stromflusszeit werden Messreihen über jeweils mehrere hundert Chargen aufgezeichnet. Daran kann gezeigt werden, dass die Transformatorstufe und der Schmelzfortschritt die wesentlichen Parameter darstellen, von denen die aktuelle elektrische Leistungsaufnahme des Ofens abhängt. Sowohl mit steigender Transformatorstufe als auch mit Fortschreiten des Prozesses erhöht sich

die Leistungsaufnahme. Dies ist in Bild 2.2 in Zusammenhang mit Bild 2.3 sowie in Bild 2.4 zusammen mit Bild 2.5 zu erkennen. Es bietet sich an, ein entsprechendes Kennfeld bestehend aus Erwartungswerten für die jeweilige aktuelle Kombination von Transformatorstufe und Prozessfortschritt aus Messungen zu ermitteln und der Modellbildung zugrunde zu legen. Der Schmelzfortschritt lässt sich anhand der seit Chargenbeginn bereits in die Schmelze eingebrachten spezifischen Gesamtenergie $W_{\text{ges EAF spez}}$ in $\frac{\text{kWh}}{\text{t}}$ quantifizieren, wobei mit Gesamtenergie die Summe der eingebrachten chemischen und elektrischen Energie gemeint ist. Um das Kennfeld und damit die für die Berechnung der Prognoseleistung anhand des Modells vorzuhaltende Parameteranzahl überschaubar zu halten, werden drei relevante Bereiche des Schmelzfortschrittes identifiziert. Damit lassen sich quantitativ die drei Abschnitte Bohrphase ($0 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} < W_{\text{ges EAF spez}} < 100 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$), Hauptschmelzphase ($100 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \leq W_{\text{ges EAF spez}} \leq 300 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$) und Flachbadphase bzw. Warmfahren ($W_{\text{ges EAF spez}} > 300 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$) unterscheiden.

Die Verwendung der spezifischen, d.h. auf die Einsatzmasse bezogenen, Energie als Erkennungsmerkmal für die verschiedenen Prozessabschnitte erlaubt gleichzeitig auch die richtige Zuordnung der wiederholt auftretenden Bohr- und Hauptschmelzphasen nach dem Chargieren weiterer Körbe bei Mehrkorbchargen. Ab dem Moment des Nachchargierens wird die Aufsummation der eingebrachten Gesamtenergie im Prozessleitsystem des Stahlwerkes wieder bei Null begonnen und die spezifische Gesamtenergie als Quotient dieser Summenenergie und der Einsatzmasse des aktuellen Schrottkorbs, ggf. plus der aktuellen DRI-Einsatzmasse, berechnet. Somit fallen dann die Werte der spezifischen Gesamtenergie wieder in den kleinsten, der Bohrphase entsprechenden Wertebereich zurück und die sich wiederholenden Vorgänge im Ofen können richtig erkannt werden.

Dennoch erscheint darüber hinaus die Berücksichtigung der Anzahl der bereits in die Schmelze eingesetzten Schrottkörbe notwendig, da die Leistungsniveaus in den Bohr- und Hauptschmelzphasen wie zuvor bereits festgestellt mit jedem weiteren chargierten Korb ansteigen. Würde die Anzahl der bereits chargierten Schrottkörbe nicht berücksichtigt und statt dessen unabhängig davon für jeden Chargenabschnitt nur ein Erwartungswert aus den auftretenden Leistungswerten ermittelt, so fiele dieser zumindest für die Einkorbchargen bzw. den ersten Korb der Mehrkorbchargen tendenziell zu hoch aus. Die jeweils aktuelle Anzahl Schrottkörbe wird daher als dritte Dimension des zu bestimmenden Leistungskennfeldes vorgesehen.

Die Lastcharakteristik der Nullkorbchargen, in denen reiner Eisenschwamm ohne Schrotteinsatz eingeschmolzen wird, unterscheidet sich vom Vorgenannten, da hier ein anderer Prozessablauf vorliegt. Im Gegensatz zu den Schrottchargen wird bei den Nullkorbchargen das Einsatzgut kontinuierlich zugeführt, so dass keine ausgeprägte Bohrphase auftritt. Das Leistungsniveau ist über die gesamte Chargendauer relativ konstant hoch, was in **Bild 2.6** zu sehen ist. Demzufolge ergibt sich auch für diese Chargenart im Hinblick auf den Messperioden-Leistungsbezug ein gewisses Optimierungspotential, das jedoch aufgrund des geringen Anteils der Nullkorbchargen an der Gesamtanzahl aller produzierten Schmelzen vernachlässigbar erscheint. Die kontinuierliche Eisenschwamm-Zufuhr führt auch dazu, dass der Verlauf der eingebrachten spezifischen Gesamtenergie sich stark von dem der Schrottchargen unterscheidet, da der eingebrachten Energiemenge nun eine sich zeitlich ändernde Einsatzmasse gegenübersteht.

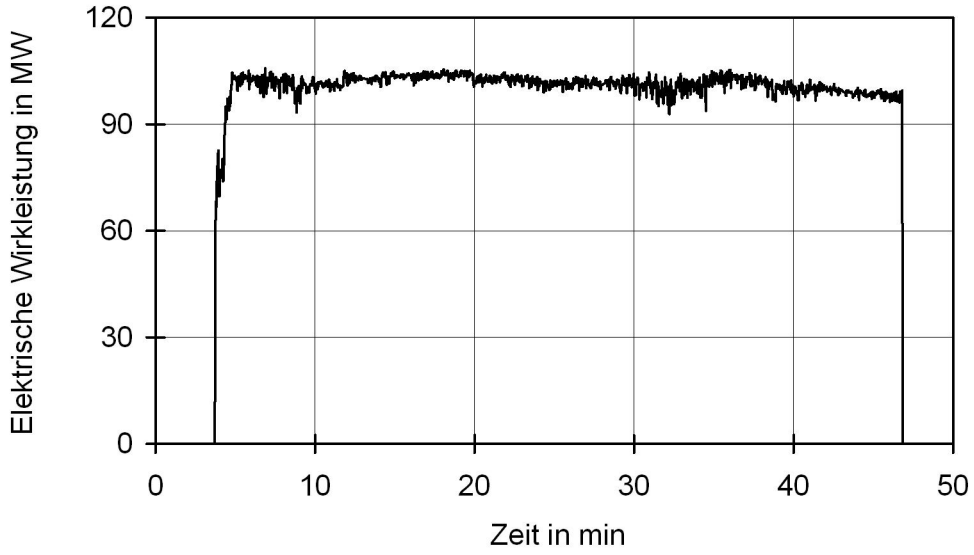


Bild 2.6: Typischer Lastverlauf des Lichtbogenofens während einer Nullkorbcharge

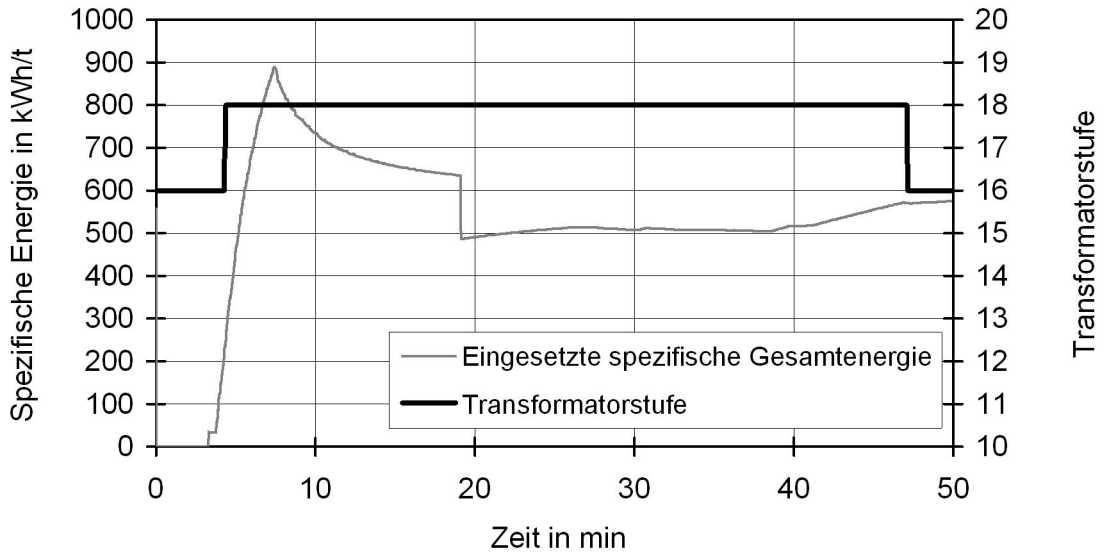


Bild 2.7: Verlauf der eingesetzten spezifischen Gesamtenergie und der Transformatorstufe während einer Nullkorbcharge

Bild 2.7 zeigt, dass insbesondere zu Beginn des Schmelzprozesses ein steiler Anstieg der Kurve der eingesetzten spezifischen Gesamtenergie zu verzeichnen ist, da hier die Einsatzmenge noch relativ gering ist, der Ofen jedoch bereits fast seine volle Leistung erreicht. Die Wertebereiche für die Bohr- und Hauptschmelzphasen werden demnach sehr schnell durchschritten. Eine Aufteilung des Chargenverlaufs in die drei vorgenannten Phasen ist für die Nullkorbchargen daher zwar nicht unbedingt erforderlich, führt jedoch auch nicht zu falschen bzw. unbrauchbaren Erwartungswerten. Deshalb wird der Einfachheit halber für die Nullkorbchargen keine gesonderte Modellierung verfolgt, sondern es werden die Leistungs-Erwartungswerte in Analogie zu den Schrottchargen ermittelt und in dem selben Kennfeld hinterlegt.

Tabelle 2.1 und **Tabelle 2.2** zeigen die jeweils zweidimensionalen Ausschnitte des Kennfeldes der Leistungs-Erwartungswerte für die vier möglichen Anzahlen bereits chargierter Schrottkörbe. Die Werte geben die gemittelte Leistung für die entsprechende Konstellation von Transformatorstufe und Schmelzfortschritt wieder und werden aus den Daten einer Messkampagne ermittelt, die mit insgesamt 417 Einzelchargen 43 Null-, 195 Ein-, 116 Zwei- und 63 Dreikorbchargen umfasst. Ein Gedankenstrich steht jeweils für eine in den Messungen nicht oder nicht über ausreichende Zeit auftretende Kombination.

Tabelle 2.1: Leistungs-Erwartungswerte-Kennfeld für Null- und Einkorbchargen

	Nullkorbchargen			Einkorbchargen		
	$\overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$ in MW			$\overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$ in MW		
	Wertebereich $W_{\mathrm{ges\,EAF\,spez}}$ in $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$			Wertebereich $W_{\mathrm{ges\,EAF\,spez}}$ in $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$		
Transformatorstufe	0 – 100	100 – 300	> 300	0 – 100	100 – 300	> 300
12	-	-	79,2	-	67,5	71,9
13	-	-	84,0	59,8	70,8	75,8
14	-	-	88,1	64,1	65,7	84,4
15	-	-	91,9	67,4	68,0	88,3
16	-	-	93,6	65,7	64,5	89,8
17	-	-	99,6	76,2	72,7	96,9
18	-	-	105,1	76,6	82,1	103,4

Tabelle 2.2: Leistungs-Erwartungswerte-Kennfeld für Zwei- und Dreikorbchargen

	Zweikorbchargen			Dreikorbchargen		
	$\overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$ in MW			$\overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$ in MW		
	Wertebereich $W_{\mathrm{ges\,EAF\,spez}}$ in $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$			Wertebereich $W_{\mathrm{ges\,EAF\,spez}}$ in $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$		
Transformatorstufe	0 – 100	100 – 300	> 300	0 – 100	100 – 300	> 300
12	-	-	70,1	64,1	-	-
13	-	-	83,3	64,5	71,1	73,3
14	-	-	86,0	68,2	76,7	81,8
15	-	69,7	90,2	68,9	79,8	86,0
16	67,5	62,4	87,9	68,3	72,9	83,5
17	76,4	75,1	95,5	76,8	81,4	91,3
18	77,8	82,2	101,7	78,2	81,8	100,7

Die aus Messungen ermittelten Erwartungswerte in den Tabellen bestätigen die vorgenannten Annahmen, d.h. steigende Leistungsaufnahme mit höherer Transformatorstufe und fortschreitendem Prozess. Im Wertebereich von $0\ \frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}} < W_{\mathrm{ges\,EAF\,spez}} < 100\ \frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$ ist wie erwartet eine Leistungssteigerung mit der Anzahl der bereits chargierten Schrottkörbe zu beobachten. Die vergleichsweise hohe Leistungsaufnahme bei Nullkorbchargen ist ebenfalls gut zu erkennen, wobei hier für die ersten beiden Wertebereiche von $W_{\mathrm{ges\,EAF\,spez}}$ aufgrund der sehr kurzen Zeit, welche die entsprechenden Abschnitte der Schmelze bei dieser Chargenart einnehmen, keine Erwartungswerte aus den Messungen angegeben werden können. Die mittlere Streuung der Leistungsmittelwerte beträgt ca. 3 MW. Gelegentliche Ausreißer in den Erwartungswerte-Kennfeldern sind damit zu begründen, dass einige Kombinationen von Schmelzfortschritts-Wertebereich und Transformatorstufe nur selten auftreten und daher nur

eine geringe Anzahl an Messwerten aufgezeichnet werden kann. Die aus diesen wenigen Werten bestimmten Erwartungswerte entsprechen daher ggf. einem auf langfristiger Mittelung basierenden Erwartungswert nicht.
Die im Kennfeld enthaltenen Erwartungswerte erlauben dem neu zu entwickelnden Lastkontrollsystem die geforderte vorausschauende Abschätzung der zu erwartenden Auswirkung einer gegebenenfalls notwendigen LKA-bedingten Veränderung der Transformatorstufe. Somit wird die direkte Auswahl einer geeigneten Stufe ermöglicht, bei der das Leistungslimit voraussichtlich eingehalten wird.

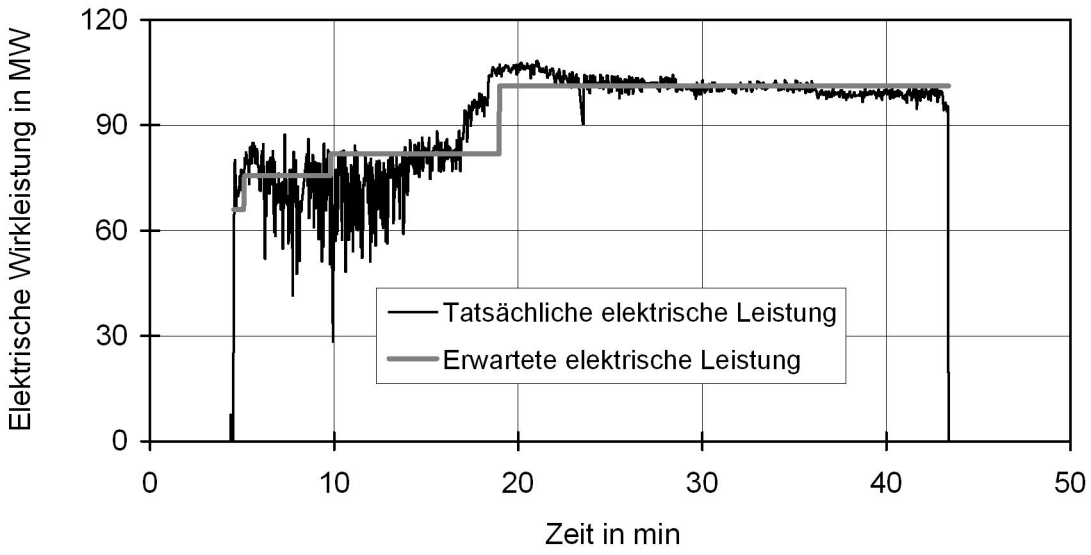


Bild 2.8: Verlauf der tatsächlichen aufgenommenen Wirkleistung und der erwarteten mittleren elektrischen Leistung für eine Einkorbcharge

Die Prognose der Leistungsaufnahme bei der aktuellen Transformatorstufe lässt sich jedoch noch weiter verbessern, was anhand von **Bild 2.8** verdeutlicht werden soll. Dargestellt ist hier der aus Bild 2.2 bekannte beispielhafte Verlauf der tatsächlich aufgenommenen Wirkleistung des Lichtbogenofens während einer Einkorbcharge im Vergleich mit der erwarteten Leistung, die sich aus dem für die entsprechende Messkampagne ermittelten Leistungsmittelwerte-Kennfeld ergibt. Besonders zu Beginn der Schmelze (zwischen 4 und 10 min) sowie in der späten Hauptschmelz- und der Warmfahrphase (zwischen 19 und 43 min) stimmt der in diesem Fall auf 195 Einzelchargen basierende Erwartungswert mit der tatsächliche Leistung im Mittel gut überein. Die auftretenden stochastischen Veränderungen der tatsächlichen Leistungsaufnahme können durch den Erwartungswert nicht wiedergegeben werden. Im Übergang zwischen Bohrphase und Hauptschmelzphase (zwischen 10 und 19 min) findet sich ein aufsteigender Trend in der tatsächlich aufgenommenen Leistung, der jedoch durch den zugehörigen Erwartungswert nicht angenähert werden kann. Weder Transformatorstufe noch der durch die eingebrachte spezifische Gesamtenergie quantifizierte Schmelzfortschritt ändern sich während dieser Zeit, so dass durch den entsprechenden im Kennfeld hinterlegten Erwartungswert hier nur der langfristige Mittelwert, nicht jedoch der Trend berücksichtigt werden kann. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Modellierung der Leistungsaufnahme auch die tatsächliche Momentanleistung und damit prozessbedingte Abweichungen vom Langzeitmittelwert mit einzubeziehen.

Gleichung (2.1) beschreibt eine Möglichkeit, neben der erwarteten elektrischen Leistung $\overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$ auch die aktuelle Leistung $P_{\mathrm{el\,EAF}}$ für die Prognose der Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens $\tilde{P}_{\mathrm{el\,EAF}}$ in den unmittelbar bevorstehenden Minuten heranzuziehen:

$$\tilde{P}_{\mathrm{el\,EAF}} = a_{\mathrm{Prog}} \cdot P_{\mathrm{el\,EAF}} + \left(1 - a_{\mathrm{Prog}}\right) \cdot \overline{P}_{\mathrm{el\,EAF}}. \tag{2.1}$$

Dabei werden die Gewichtungsfaktoren mit $a_{\mathrm{Prog}} = \left(1 - a_{\mathrm{Prog}}\right) = 0{,}5$ empirisch so ausgewählt, dass zum einen etwaige trendartige Verläufe wie der zuvor beschriebene gut wiedergegeben werden und zum anderen die stochastischen Abweichungen nicht allzu stark in die prognostizierte Leistung eingehen. Letzteres ist von Bedeutung, da diese stochastischen Abweichungen sich in die in den folgenden Kapiteln näher zu beschreibende Vorhersage der für den Lichtbogenofen benötigten elektrischen Energie fortpflanzen. Diese Energieprognosen beziehen sich auf den für eine Bezugsperiode relevanten Zeitraum und bedürfen daher kaum der Berücksichtigung kurzzeitiger stochastischer Leistungsschwankungen, die sich innerhalb weniger Sekunden ergeben. Vielmehr könnten die folgenden Energie-Prognosemodelle und Regelalgorithmen durch zu starke stochastische Schwankungen beeinträchtigt werden, was durch die oben stehende Wahl der Gewichtungsfaktoren verhindert wird.

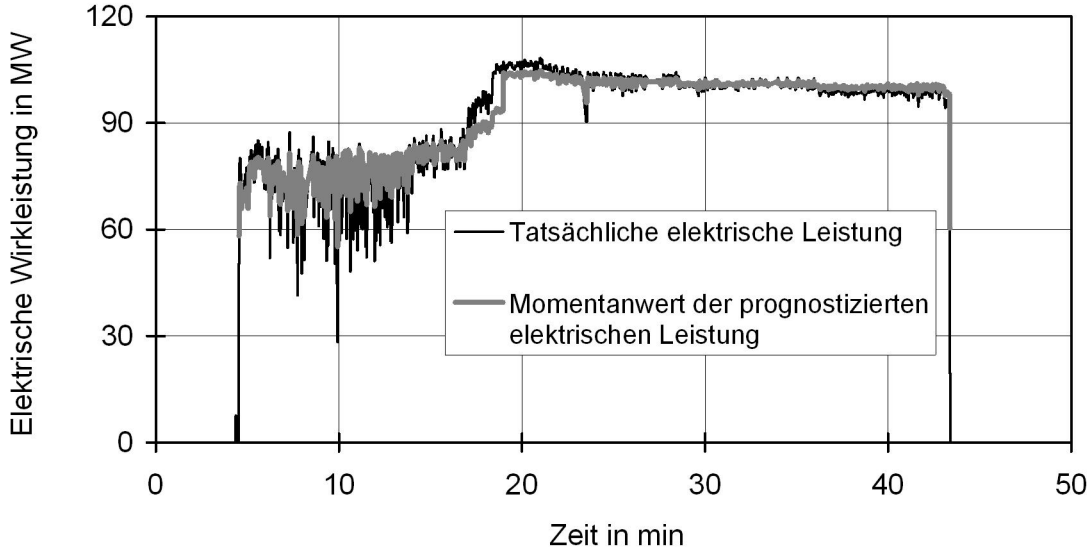


Bild 2.9: Vergleich zwischen tatsächlichem und prognostiziertem Lastverlauf des Lichtbogenofens

In **Bild 2.9** ist der Verlauf der Momentanwerte der mit Gleichung (2.1) zum jeweiligen Zeitpunkt prognostizierten elektrischen Leistungsaufnahme im Vergleich zum tatsächlichen Lastverlauf für die zuvor betrachtete Einkorbcharge zu sehen. Diese momentanen Prognosewerte stellen diejenige Leistung dar, die bis zur nächsten Prognoseberechnung als konstante Leistung angenommen wird. Bis auf den Zeitbereich zwischen 17 und 19 min stimmt die tatsächlich aufgenommene Leistung gut mit dem zum jeweiligen Zeitpunkt prognostizierten Leistungswert überein. Die weniger gute Übereinstimmung der beiden Verläufe zwischen 17 und 19 min liegt darin begründet, dass in dieser Charge ungewöhnlich früh die höchste Leistungsstufe angefahren wird, so dass die tatsächliche Leistungsaufnahme hier deutlich über dem mit einem Gewichtungsfaktor von 0,5 in die Prognose eingehenden langfristigen Leistungserwartungswert für diesen Prozessabschnitt liegt. Dennoch zeigt sich auch in diesem

Bereich durch die Einbeziehung der tatsächlichen aktuellen Leistung eine besser zutreffende Prognose als die auf der reinen langfristigen Mittelwertbildung basierende (vgl. Bild 2.8).

Für den langfristigen Einsatz des Prognose-Algorithmus ist es notwendig, die im Kennfeld vorgehaltenen Langzeit-Erwartungswerte während der Laufzeit zu aktualisieren. Dies erlaubt die Berücksichtigung von Veränderungen der erreichten Leistungsniveaus, die sich unter anderem langfristig durch den Fortgang der Ofenabnutzung (sog. Ofenreise), durch Verschleiß in der elektrischen Anlage oder plötzlich, d.h. von Charge zu Charge, durch abweichende Schrottqualitäten sowie durch Änderung der Stromsollwerte-Vorgabe ergeben können. Basierend auf Erfahrungswerten des Bedienpersonals des Ofens erscheint es sinnvoll, die Erwartungswerte über eine rund drei Schmelzen entsprechende Zeitspanne von ca. 170 min Dauer zu ermitteln. So kann auf der einen Seite ein guter langfristiger Mittelwert abgebildet werden, auf der anderen Seite ermöglicht die nicht zu lang gewählte Mittelungsdauer eine zügige Reaktion auf plötzliche Änderungen, wie sie z.B. durch die Schrottqualität verursacht werden können.
Zur Berechnung arithmetischer gleitender Leistungsmittelwerte ist die Zwischenspeicherung aller zurückliegenden aktuellen Leistungswerte über die gewählte Mittelungsdauer erforderlich. Bei einer Abtastrate von 1 Hz ergeben sich über 170 min etwa 10000 Werte, die gespeichert und für die Mittelwertbildung herangezogen werden müssen. Dies erscheint im Hinblick auf die geforderte geringe rechentechnische Komplexität des zu entwickelnden Systems wenig praktikabel. Eine bessere Alternative stellt die einfache exponentielle Glättung dar, die von Brown in [Brown 63] bereits 1963 wegen der formalen Einfachheit und des geringen Speicherplatzbedarfes vorgeschlagen wurde. In Verbindung mit einem Gleichung (2.1) entsprechenden Algorithmus hat dieses Verfahren als eigenständiges Prognosemodell weite Verbreitung gefunden und bietet sich auch an dieser Stelle an. Statt des gleitenden arithmetischen Mittels wird daher in jedem Zeitschritt ein exponentieller Mittelwert $\overline{P}_{\mathrm{elEAF}}(nT)$ gemäß Gleichung (2.2) berechnet, wozu lediglich der vorherige Leistungsmittelwert $\overline{P}_{\mathrm{elEAF}}\big((n-1)T\big)$ sowie der aktuelle Messwert $P_{\mathrm{elEAF}}(nT)$ erforderlich sind:

$$\overline{P}_{\mathrm{elEAF}}(nT) = a_{\mathrm{Mittel}} \cdot \overline{P}_{\mathrm{elEAF}}\big((n-1)T\big) + \big(1 - a_{\mathrm{Mittel}}\big) \cdot P_{\mathrm{elEAF}}(nT). \tag{2.2}$$

Diese exponentielle Mittelung hat darüber hinaus den Vorteil, dass die jüngsten zurückliegenden Messwerte mit dem größten Gewicht in den neuen Erwartungswert eingehen, so dass die Reaktion auf plötzliche Änderungen des Leistungsniveaus im Vergleich zum arithmetischen Mittel schneller erfolgen kann.
Zur Bestimmung der in Gleichung (2.2) angegebenen Gewichtungsfaktoren a_{Mittel} und $(1 - a_{\mathrm{Mittel}})$ wird zunächst mit Hilfe der *z*-Transformation über den Zwischenschritt

$$\overline{P}_{\mathrm{elEAF}}(z) = a_{\mathrm{Mittel}} \cdot z^{-1} \cdot \overline{P}_{\mathrm{elEAF}}(z) + \big(1 - a_{\mathrm{Mittel}}\big) \cdot P_{\mathrm{elEAF}}(z) \tag{2.3}$$

die entsprechende diskrete Übertragungsfunktion

$$G(z) = \frac{\overline{P}_{\mathrm{elEAF}}(z)}{P_{\mathrm{elEAF}}(z)} = \big(1 - a_{\mathrm{Mittel}}\big) \cdot \frac{z}{z - a_{\mathrm{Mittel}}} \tag{2.4}$$

aufgestellt. Weiterhin wird die zeitkontinuierliche Gewichtsfunktion

$$g_{\mathrm{PT1}}(t) = \frac{1}{T_{\mathrm{PT1}}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\mathrm{PT1}}}} \tag{2.5}$$

eines PT_1-Gliedes herangezogen. Durch Multiplikation dieser Gewichtsfunktion mit dem Abtastintervall T und anschließender z-Transformation ergibt sich die zeitdiskrete Übertragungsfunktion eines PT_1-Gliedes zu

$$G_{\mathrm{PT1}}(z) = \frac{T}{T_{\mathrm{PT1}}} \cdot \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_{\mathrm{PT1}}}}}, \tag{2.6}$$

was der Form der Übertragungsfunktion der exponentiellen Mittelung in Gleichung (2.4) entspricht. Der Gewichtungsfaktor a_{Mittel} kann demnach durch die Koeffizientenvergleiche

$$a_{\mathrm{Mittel}} \overset{!}{=} e^{-\frac{T}{T_{\mathrm{PT1}}}} \tag{2.7}$$

und

$$1 - a_{\mathrm{Mittel}} \overset{!}{=} \frac{T}{T_{\mathrm{PT1}}} \quad \Leftrightarrow \quad a_{\mathrm{Mittel}} \overset{!}{=} 1 - \frac{T}{T_{\mathrm{PT1}}} \tag{2.8}$$

berechnet werden. Bei einer gewünschten Mittelungsdauer von $T_{\mathrm{PT1}} = 170\ \mathrm{min} \approx 10000\ \mathrm{s}$, einer Abtastrate von 1 Hz und dem dazugehörigen Abtastintervall $T = 1\,\mathrm{s}$ ist daher

$$a_{\mathrm{Mittel}} = e^{-\frac{1\,\mathrm{s}}{10000\ \mathrm{s}}} \approx 0{,}9999 \tag{2.9}$$

bzw.

$$a_{\mathrm{Mittel}} = 1 - \frac{1\,\mathrm{s}}{10000\ \mathrm{s}} = 0{,}9999 \tag{2.10}$$

zu wählen.

Mit Hilfe der genannten Algorithmen steht dem zu entwickelnden Lastkontrollalgorithmus nun eine Prognose der für den Elektrolichtbogenofen zu erwartenden elektrischen Leistungsaufnahme nicht nur für die aktuelle, sondern für alle möglichen Transformatorstufen zur Verfügung. Für die Prognose des zukünftigen Energiebezugs des Schmelzofens in der aktuellen Bezugsperiode bedürfen die Algorithmen jedoch einer Erweiterung, mit der die verbleibende Stromflusszeit des Ofens für die aktuelle Schmelze prognostiziert werden kann. Nur so ist es möglich, aus der prognostizierten Leistungsaufnahme und der zu erwartenden Stromflussdauer den zu erwartenden Energiebezug zu berechnen. Dies wird in Kapitel 3 behandelt.

2.2 Pfannenofen

Der Pfannenofen stellt einen weiteren elektrischen Verbraucher im Stahlwerk dar, dessen Lastverhalten im Hinblick auf eine Prognose der Gesamtleistungsaufnahme des Werkes näher zu betrachten ist. Die Anschlussleistung des Pfannenofens ist deutlich geringer als die des Schmelzofens und macht nur einen geringen Anteil der Gesamtleistung des Stahlwerkes aus. Unter diesem Gesichtspunkt fällt die Lastcharakteristik dieses Ofens schon eher in den von herkömmlichen Lastkontrollanlagen abgedeckten Bereich. Der Lastgang des Pfannenofens weist jedoch die Besonderheit auf, dass hier Stromfluss- und Nebenzeiten in nahezu gleicher Häufigkeit und Dauer im stochastischen Wechsel auftreten. Diese Tatsache widerspricht der für bisher erhältliche Lastkontrollanlagen zugrunde gelegten Annahme gleichmäßiger Lastcharakteristiken. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Beeinflussung der Leistungsaufnahme des Pfannenofens durch die Lastkontrollanlage nicht möglich ist. Ein zielgerichtetes Abschalten dieses Verbrauchers ist bisher ebenso wenig vorgesehen. Ein Ansatzpunkt für eine Verbesserung der bisherigen Lastkontrollstrategie besteht daher darin, dem Lastkontrollsystem bei ausgeschaltetem Pfannenofen die Möglichkeit zu geben, unter bestimmten Bedingungen das erneute Zuschalten um einige Minuten bis in die nächste Bezugsperiode hinein zu verschieben. Auf diese Weise steht die demzufolge vom Pfannenofen in der aktuellen Periode nicht verbrauchte Energie für andere Verbraucher zur Verfügung, so dass hier weitere Schalthandlungen durch das Lastkontrollsystem vermieden werden können.
Im Folgenden werden die Funktionsweise sowie der sich ergebende Lastgang des Pfannenofens näher erläutert und es wird eine Methode zur adäquaten Abschätzung des einzuplanenden Energiebezugs gefunden.

Der Pfannenofen ist ähnlich wie der Schmelz-Elektrolichtbogenofen aufgebaut und basiert auf dem selben Funktionsprinzip. Die typische elektrische Anschlussleistung von Pfannenöfen liegt in der Größenordnung von 20 bis 30 MVA. Die Stromversorgung des Pfannenofens erfolgt ebenfalls über einen unter Last schaltbaren Transformator, so dass auch hier ein Betrieb auf unterschiedlichen Leistungsniveaus möglich ist.
Produktionstechnisch bildet der Pfannenofen das Bindeglied zwischen dem Schmelzofen und der Gießanlage mit dem sich daran anschließenden Walzwerk. Der im Schmelzofen produzierte flüssige Rohstahl wird nach dem Abstich mit Hilfe einer Pfanne in den Pfannenofen verfahren, wo in sekundärmetallurgischen Prozessen, wie z.B. Legieren, Desoxidieren oder Homogenisieren die gewünschte Stahlqualität eingestellt wird. Des Weiteren dient der Pfannenofen dazu, die Schmelze bis zur Weiterverarbeitung in der Gießanlage vorzuhalten und genau auf die erforderliche Temperatur aufzuheizen bzw. auf dieser Temperatur zu halten. Die Einstellung der Gießtemperatur erfolgt dabei mit Hilfe der elektrothermischen Energieeinbringung auf wenige Grad Celsius genau.
Während der gesamten im Pfannenofen stattfindenden Prozesse liegt bereits eine flüssige Schmelze vor, so dass aufgrund der nicht vorhandenen Einschmelzphasen während der Stromflusszeiten mit einem deutlich weniger stochastischen und damit gleichmäßigeren Verlauf der Leistungsaufnahme als beim Schmelzofen zu rechnen ist.

Im hier untersuchten Stahlwerk wird ein in Drehstromtechnik ausgeführter Pfannenofen mit einer nominellen Anschlussleistung von 25 MVA verwendet. In **Bild 2.10** ist ein typischer 50-minütiger Ausschnitt der elektrischen Leistungsaufnahme dieses Ofens dargestellt.

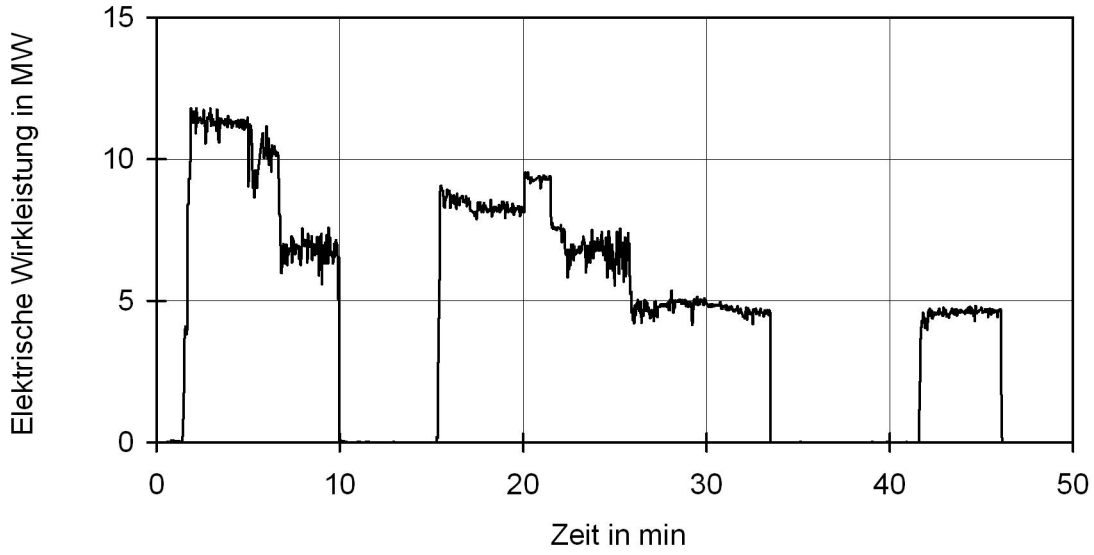


Bild 2.10: Typischer Lastverlauf des Pfannenofens

Im gemessenen Lastgang des Pfannenofens sind während der Stromflusszeit unterschiedliche Leistungsniveaus zu erkennen. Innerhalb dieser Niveaus ist die beobachtete Streuung wesentlich geringer als beim Schmelzofen und beträgt maximal 1 bis 2 MW. Die Sprünge zwischen den Leistungsniveaus werden ähnlich wie beim Schmelzofen durch das Anfahren unterschiedlicher Arbeitspunkte und insbesondere durch Umschaltung der Transformatorstufen verursacht, wobei jedoch die aktuelle Transformatorstufe des Pfannenofens in den für diese Arbeit zu verwendenden Messwerten nicht enthalten ist. Daher ist eine Transformatorstufen-abhängige Modellierung des Lastganges wie beim Schmelzofen hier nicht durchführbar. Etwaige weitere Prozessvariablen, die eine Modellierung auf anderer Basis ermöglichen würden, stehen ebenfalls nicht zur Verfügung, so dass von einer prozessbegleitenden Prognose des für den Pfannenofen zu erwartenden Leistungsniveaus abgesehen werden muss. Die durch das Fehlen einer solchen präzisen Modellierung im Hinblick auf die Prognose- und Regelgenauigkeit des gesamten Lastkontrollsystems zu erwartenden Einschränkungen erscheinen jedoch vertretbar, da die Schwankungsbreite der vom Pfannenofen aufgenommenen Wirkleistung über alle Transformatorstufen mit 10 MW im Vergleich zur Leistungsaufnahme des Schmelzofens gering ausfällt.
Bezüglich der im Lastverlauf auftretenden Nebenzeiten stellt sich eine ähnliche Problematik wie für die nicht auf den Abstich zurückzuführenden Nebenzeiten des Schmelzofens dar. Die Durchführung der vorgenannten Legierungs- und Veredelungsprozesse sowie die Temperaturführung im Pfannenofen erfordern eine bestimmte Abfolge von Stromfluss- und Nebenzeiten, die in diesem Fall durch das Ofenbedienpersonal oder durch ein unabhängiges Prozessleitsystem koordiniert werden. Hierbei ergibt sich gegebenenfalls im Bezug auf die Dauer der Nebenzeiten ein gewisser Spielraum, der, wie zuvor bereits angedeutet, durch das Lastkontrollsystem nutzbar gemacht werden kann. Eine mögliche Realisierung besteht darin, auf einem Prozessleitbildschirm in der Ofenwarte eine Meldung anzuzeigen, welche die Empfehlung des Lastkontrollsystems zum Verschieben des erneuten Zuschaltens enthält. Ob dieser Empfehlung entsprochen werden kann, unterliegt der unter den jeweiligen prozesstechnischen Bedingungen zu treffenden Entscheidung des Ofenbedienpersonals. Somit kann die Lastkontrollanlage zwar indirekt versuchen, Einfluss auf den Lastgang des Pfannenofens zu

nehmen, aufgrund der zwischengeschalteten menschlichen Entscheidung muss die Abfolge von Stromfluss- und Nebenzeiten jedoch trotzdem aus Sicht der LKA als eher stochastisch eingeschätzt werden. Grundsätzlich handelt es sich damit für das Lastkontrollsystem beim Zu- oder Abschalten des Pfannenofens um unvorhersehbare Ereignisse, die sich ebenso wenig modellieren oder prognostizieren lassen wie das Auftreten der nicht Abstich-bedingten Nebenzeiten, die beim Schmelzofen im Verlauf der einzelnen Chargen auftreten.
Ein Ansatz zur Prognose der chargenabhängigen Stromflusszeit, wie sie für den Schmelzofen in Kapitel 3 vorgestellt wird, kann hier ebenfalls nicht verfolgt werden, da die Prozesse im Pfannenofen bedingt durch die enge Verknüpfung mit dem kontinuierlichen Gießprozess nicht chargenbasiert ablaufen.
Eine genaue Vorhersage des zukünftigen Lastverlaufs des Pfannenofens für die aktuelle Bezugsperiode oder einen beliebigen anderen Zeitabschnitt erscheint daher unter den gegebenen Bedingungen kaum möglich. Um dem zu entwickelnden Lastkontrollsystem dennoch ein Maß für den zu erwartenden Energiebedarf des Pfannenofens zur Verfügung zu stellen, bietet es sich in einem ersten Ansatz als sicherste Lösung an, für den zu erwartenden Energiebezug des Pfannenofens eine Maximalabschätzung in Abhängigkeit vom Einschaltzustand vorzunehmen.
Ist der Pfannenofen eingeschaltet, so lässt sich dessen Leistungsaufnahme vom Lastkontrollsystem nicht weiter beeinflussen und es wird in diesem Fall eine der maximalen Leistung des Ofens entsprechende Energiemenge für die restliche Zeit in der aktuellen Bezugsperiode vorgesehen. Auf diese Weise lässt sich auf der einen Seite weitestgehend sicherstellen, dass der tatsächliche Energiebezug des Pfannenofens die so getroffene Abschätzung nicht überschreitet und dass damit eventuell zur Einhaltung des Leistungslimits notwendige Schalthandlungen an anderen Verbrauchern frühzeitig und zielgerichtet erfolgen können. Auf der anderen Seite wird durch die Maximalabschätzung gegebenenfalls zu viel Energie für den Pfannenofen vorgesehen, die von den anderen Verbrauchern im ungünstigsten Fall auch nicht mehr bezogen werden kann. Um die durch diesen prinzipbedingten Nachteil der Maximalabschätzung verursachten Verluste möglichst gering zu halten, wird für die zugrunde gelegte Maximalleistung nicht die theoretisch mögliche größte Wirkleistungsaufnahme des Pfannenofens herangezogen, sondern die größte innerhalb der zurückliegenden 24 h aufgetretene Leistungsaufnahme. Der Zeitraum von 24 h erscheint basierend auf Erfahrungswerten des Bedienpersonals repräsentativ für die maximale zukünftig zu erwartende Leistungsaufnahme des Pfannenofens. Somit ist hier eine Anpassung an die aktuellen Produktionsbedingungen gegeben.
Im ausgeschalteten Zustand wird keine Energie für den Pfannenofen vorgesehen, d.h. es wird davon ausgegangen, dass der Pfannenofen für die verbleibende Dauer der aktuellen Bezugsperiode ausgeschaltet bleibt. So steht in diesem Fall die bis zum Erreichen des Leistungslimits beziehbare Energie für die anderen Verbraucher zur Verfügung und unnötige, verfrühte Schalthandlungen können vermieden werden. Gegebenenfalls kann ein verbessertes Lastkontrollsystem mit Hilfe der zuvor genannten Methode dies sogar durch das aktive Verschieben des Zuschaltzeitpunktes des Pfannenofens forcieren, wenn die jeweiligen prozesstechnischen Bedingungen es dem Ofenbedienpersonal erlauben, der Empfehlung nachzukommen.

Durch diese vom Einschaltzustand abhängige Energieprognose für den Pfannenofen ist es nun möglich, mit dem zu entwickelnden Lastkontrollsystem auf die stochastisch auftretenden Stromfluss- und Nebenzeiten zu reagieren. Eventuell durch den Energiebezug dieses Ofens

notwendig werdende Lastkontrolleingriffe an den anderen Verbrauchern können so gestaltet werden, dass einerseits möglichst wenig Energie als nicht mehr beziehbar in der Bezugsperiode verbleibt und andererseits die Eingriffe in die Leistungsaufnahmen frühzeitig und damit weniger drastisch als mit einer herkömmlichen Lastkontrollanlage ausgeführt werden können. Dennoch erscheint die Beobachtung des tatsächlichen Energiebezugs und die entsprechende Anpassung von LKA-Eingriffen erforderlich, um dem zuvor genannten prinzipbedingten Nachteil der im eingeschalteten Zustand angewandten Maximalabschätzung zu begegnen. Darauf wird ausführlicher in Kapitel 4 eingegangen.

2.3 Grundlast des Stahlwerkes

Zuletzt wird die so genannte Grundlast des Stahlwerkes näher betrachtet. Darin sind alle weiteren Verbraucher zusammengefasst, insbesondere die Direktreduktionsanlage, die Stranggussanlage sowie das zweistraßige Walzwerk. Als kleinere Verbraucher sind hier die Entstaubungsanlage, der Schiffsentlader sowie verschiedene im Werk vorhandene Transformatoren und Motoren und die informationstechnischen Anlagen zu nennen. Die Leistungsaufnahme der Grundlast liegt zwischen der des Pfannenofens und der des Schmelzofens und unterliegt je nach Zustand der angeschlossenen Anlagen einer gewissen Schwankung. Für die Lastkontrollstrategie ist die Grundlast als nicht zu beeinflussende Größe anzusehen, deren Energiebedarf unter Einhaltung des Leistungslimits gegebenenfalls durch Einsparungen bei den anderen Verbrauchern gedeckt werden muss. Der Modellierung und Prognose der Grundlast kommt insofern die Bedeutung zu, den Spielraum für die anderen Verbraucher möglichst genau abzuschätzen.

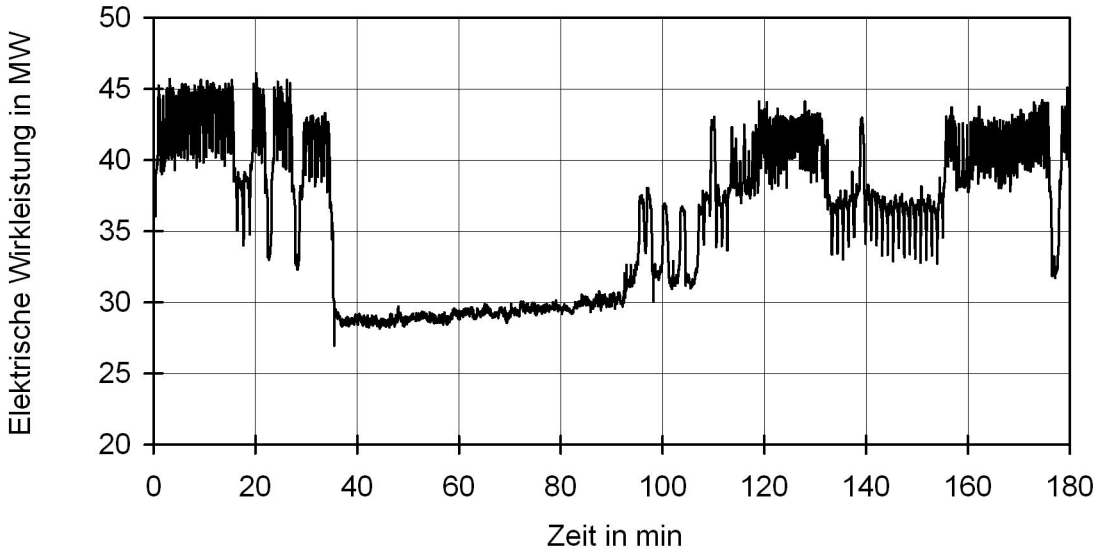


Bild 2.11: Typischer Lastverlauf der Grundlast

Bild 2.11 zeigt einen typischen dreistündigen Ausschnitt aus dem Lastverlauf der Grundlast. Verschiedene Lastniveaus, die von etwa 25 MW bis 45 MW reichen, sind deutlich zu erkennen. Jedes dieser Lastniveaus entspricht einem bestimmten Zustand des Walzwerkes (z.B. ausgeschaltet, eine oder beide Straßen eingeschaltet) und der anderen Werksanlagen. Da bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen kein Zugriff auf die entsprechenden Regler- und Steuerungssysteme besteht, kann weder eine Zuordnung der einzelnen Lastniveaus

zu den jeweiligen Betriebszuständen der Anlagen erfolgen noch sind die exakten Zeitpunkte geplanter Zu- oder Abschaltungen bekannt. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur mathematischen Modellierung des gemessenen Lastverlaufs beschrieben und auf ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf eine unter Echtzeitbedingungen zu berechnende Prognose untersucht.

2.3.1 Modellierung von Zeitreihen mittels stochastischer Prozesse

Bei den in regelmäßigen Zeitschritten aufgezeichneten Leistungsmesswerten handelt es sich um eine chronologisch geordnete Folge von Werten, die als Zeitreihe bezeichnet wird. Die Modellierung und Prognose solcher Zeitreihen ist ein Schwerpunkt der theoretischen und angewandten Statistik, so dass hier eine große Anzahl von möglichen Verfahren zur Verfügung steht, die im Folgenden kurz skizziert werden sollen. Auf die formale Herleitung der Zusammenhänge wird dabei weitestgehend verzichtet, da diese den einschlägigen Fachbüchern, auf die im jeweiligen Zusammenhang verwiesen wird, zu entnehmen ist.

Bild 2.12 zeigt die Vorgehensweise zur Modellierung und der darauf basierenden Prognose von Zeitreihen so wie sie in den 1970er Jahren erstmals von Box und Jenkins in [Box 70a] vorgestellt wurde und seitdem als Grundlage dient. Dennoch sind die in den einzelnen Schritten verwendeten mathematischen Verfahren ständiger Weiterentwicklung und Verbesserung unterworfen und in vielen Fällen stehen unterschiedliche Verfahren nebeneinander, die je nach Anwendungsfall mehr oder weniger geeignet sind. Bei der weiteren Vorstellung dieser Verfahren wird eine Auswahl getroffen, die für die Analyse der in dieser Arbeit vorliegenden Aufgabenstellung sinnvoll erscheint.

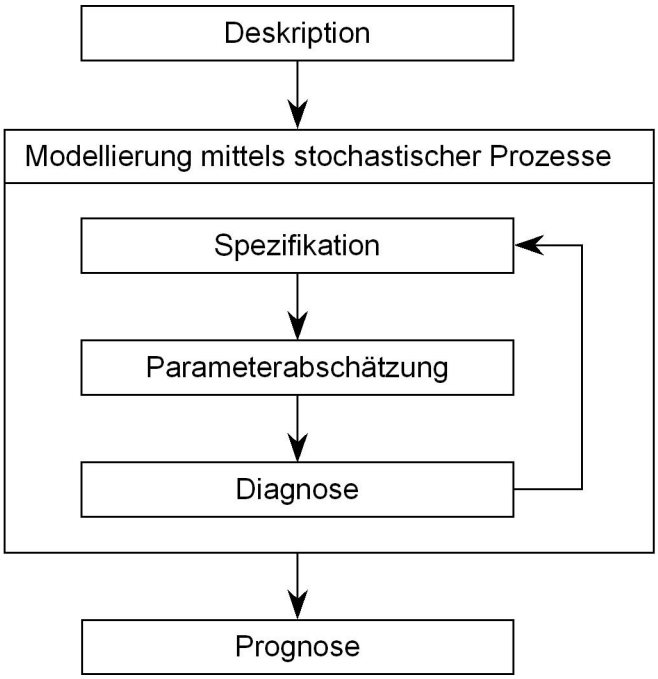


Bild 2.12: Verfahrensschritte zur Modellierung von Zeitreihen (nach Box und Jenkins)

Wie in Bild 2.12 zu sehen, ist der erste der in der Zeitreihenanalyse üblichen Schritte von der Datenerhebung bis hin zum Prognosemodell die Deskription, d.h. die Beschreibung der Reihe anhand konservativer Methoden wie z.B. Regressionsmodellen, Berechnung statistischer

Kennzahlen oder Transformationen. Ziel der Deskription ist es, offensichtliche äußere Eigenschaften wie Regelmäßigkeiten, sich wiederholende Ereignisse oder Trends der jeweiligen Zeitreihe zu erkennen und ggf. zu bereinigen.

Im Anschluss daran erfolgt die eigentliche Modellierung, wobei die Zeitreihe, ggf. von etwaigen Trends oder Periodizitäten bereinigt, als eine Realisierung eines zugrunde liegenden stochastischen Prozesses aufgefasst wird. Zur Beschreibung solch stochastischer Prozesse stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Die gebräuchlichsten sind dabei die autoregressiven Prozessmodelle und die Modellierung durch so genannte Moving-Average Prozesse (AR- bzw. MA-Modelle). Durch autoregressive Prozessmodelle (AR) wird der gegenwärtige Wert einer Zeitreihe $x(nT)$ durch eine lineare Verknüpfung von p_{AR} vergangenen Werten der Zeitreihe $x\big((n-1)T\big)$ bis $x\big((n-p_{\mathrm{AR}})T\big)$, einer Konstante ξ und eines gegenwärtigen zufälligen Schocks $\varepsilon(nT)$ als

$$x(nT) = \xi + \alpha_1 x\big((n-1)T\big) + \ldots + \alpha_{p\,\mathrm{AR}}\, x\big((n-p_{\mathrm{AR}})T\big) + \varepsilon(nT) \tag{2.11}$$

beschrieben. Im Moving-Average Prozess (MA) dagegen werden die vergangenen Werte der Zeitreihe nicht berücksichtigt, sondern der gegenwärtige Wert der Zeitreihe $x(nT)$ wird als Linearkombination einer Konstante ψ, q_{MA} gewichteter vergangener Zufallsschocks $\varepsilon\big((n-1)T\big)$ bis $\varepsilon\big((n-q_{\mathrm{MA}})T\big)$ sowie des gegenwärtigen Schocks $\varepsilon(nT)$ in der Form

$$x(nT) = \psi + \varepsilon(nT) - \beta_1 \varepsilon\big((n-1)T\big) - \ldots - \beta_{q\,\mathrm{MA}}\, \varepsilon\big((n-q_{\mathrm{MA}})T\big) \tag{2.12}$$

dargestellt. Die so genannten Zufallsschocks stellen bei beiden Prozessmodellen eine Realisation eines White-Noise-Prozesses dar, der durch die zu schätzende Varianz σ^2 bestimmt ist. Damit sind für ein AR-Modell $p_{\mathrm{AR}} + 2$ Parameter zu schätzen und für ein MA-Modell $q_{\mathrm{MA}} + 2$ Parameter, nämlich jeweils die p_{AR} bzw. q_{MA} Gewichtungsfaktoren, die Konstanten ξ bzw. ψ sowie die Varianz der Zufallsschocks. Nach Rinne [Rinne 02] sind stationäre Prozesse grundsätzlich entweder autoregressiv oder in der Moving-Average-Form modellierbar, doch die für eine gute Approximation erforderliche Anzahl an Parametern kann gegebenenfalls sehr hoch ausfallen. Dies widerspricht dem von Box und Jenkins in [Box 70a] geforderten Gebot der Sparsamkeit, nach dem im Sinne der Handhabbarkeit für eine gleichbleibend gute Annäherung des Prozesses immer das Modell der geringsten Ordnung bzw. mit der geringsten Parameteranzahl zu wählen ist. Eine Mischform aus autoregressivem und Moving-Average Prozess (ARMA) kommt oft mit weniger Parametern als ein einfacher AR- oder MA-Prozess aus und bietet sich daher zur effizienten Modellierung an [Rinne 02]. Zur Darstellung des gegenwärtigen Zeitreihenwertes ergibt sich im ARMA-Prozessmodell der Ausdruck

$$\begin{aligned} x(nT) = {} & \zeta + \alpha_1 x\big((n-1)T\big) + \ldots + \alpha_{p\,\mathrm{ARMA}}\, x\big((n-p_{\mathrm{ARMA}})T\big) \\ & + \varepsilon(nT) - \beta_1 \varepsilon\big((n-1)T\big) - \ldots - \beta_{q\,\mathrm{ARMA}}\, \varepsilon\big((n-q_{\mathrm{ARMA}})T\big) \end{aligned} \tag{2.13}$$

und damit $p_{\mathrm{ARMA}} + q_{\mathrm{ARMA}} + 2$ zu schätzende Parameter. Dabei sind die Ordnungen p_{ARMA} und q_{ARMA} im Allgemeinen wesentlich kleiner als die Ordnungen der vergleichbaren einfachen AR- oder MA-Prozesse, so dass sich für den kombinierten ARMA-Prozess insgesamt in vielen Fällen die geringste Anzahl zu bestimmender Parameter ergibt.

Zur Anpassung eines ARMA-Modells an eine vorliegende Zeitreihe erfolgt zunächst die Modellspezifikation, d.h. die Abschätzung der benötigten Ordnungen *p* und *q*. Auch hier gibt es eine Reihe von Methoden, die hauptsächlich auf der Berechnung der gewöhnlichen und der partiellen Autokorrelationsfunktionen der gemessenen Zeitreihe basieren. Die gewöhnliche Autokorrelationsfunktion (AKF) ordnet dabei jeder möglichen Zeitverzögerung kT einen Koeffizienten $\rho(k)$ zu, der den linearen Zusammenhang zwischen den ursprünglichen Zeitreihenwerten $x(nT)$ und den um *k* Zeitschritte verschobenen Zeitreihenwerten $x\big((n+k)T\big)$ wiedergibt. Die partiellen Autokorrelationskoeffizienten $\phi(k)$ dagegen messen den linearen Zusammenhang zwischen $x(nT)$ und $x\big((n+k)T\big)$ unter Ausschaltung des Einflusses, den die dazwischen liegenden Werte $x\big((n+1)T\big)$, …, $x\big((n+k-1)T\big)$ auf $x(nT)$ und $x\big((n+k)T\big)$ ausüben. Dazu werden u.a. in [Rinne 02] verschiedene, z.T. rekursive Algorithmen zur Berechnung der $\phi(k)$ genannt. Die partielle Autokorrelationsfunktion (PAKF) ordnet jeder Verzögerung kT den entsprechenden Koeffizienten $\phi(k)$ zu. Anhand bestimmter Eigenschaften von AKF und PAKF, die beispielsweise in [Rinne 02] und [Schlittgen 99] näher ausgeführt sind, kann auf die erforderlichen Modellordnungen geschlossen werden. Diese Zuordnung fällt jedoch je nach Verlauf der AKF und PAKF nicht immer eindeutig aus. Somit erfordert die Interpretation der Graphen der Autokorrelationsfunktionen bei dieser Methodik einen gewissen Erfahrungsschatz des Anwenders und lässt sich kaum automatisiert bewerkstelligen. Eine besser automatisierbare Methode zur Modellspezifikation ist die Vektorkorrelation nach Streitberg [Schlittgen 99], die hier ergänzend herangezogen werden soll. Bei dieser Methode wird aus der vorliegenden Zeitreihe eine Korrelationstafel ermittelt, in der die möglichen *p*- und *q*-Ordnungen und die sich bei der jeweiligen Kombination aus der Zeitreihe ergebenden Werte der AKF und PAKF (für $p = 0$ bzw. $q = 0$) oder der entsprechenden Vektorkorrelation aufgeführt werden. Zur Berechnungsvorschrift für die Korrelationstafel sei auf [Schlittgen 99] verwiesen. Die Besonderheit dieser Tafel liegt darin, dass sie das auffällige Muster eines unendlichen Nullblocks aufweist. Anhand der Position der linken oberen Ecke dieses Blocks kann die Modellordnung abgelesen werden. Dies wird in **Tabelle 2.3** verdeutlicht. Hier beginnt der Nullblock bei $q = q'$ und $p = p'$ und die zugrunde liegende Zeitreihe kann daher durch einen ARMA-Prozess mit einem AR-Anteil der Ordnung *p*' und einem MA-Anteil der Ordnung *q*' (kurz: ARMA[*p*'; *q*']-Prozess) modelliert werden.

Tabelle 2.3: Struktur einer Korrelationstafel für einen ARMA[*p*'; *q*']-Prozess nach [Schlittgen 99]

q / *p*	0	1	…	*q*' – 1	*q*'	*q*' + 1	*q*' + 2	…
0								
1								
⋮			⋱	⋮	⋮	⋮	⋮	⋰
p' – 1			…	≠ 0	≠ 0	≠ 0	≠ 0	…
p'			…	≠ 0	0	0	0	…
p' + 1			…	≠ 0	0	0	0	…
p' + 2			…	≠ 0	0	0	0	…
⋮			⋰	⋮	⋮	⋮	⋮	⋱

Zur Abschätzung der Parameterwerte $\alpha_1 \ldots \alpha_p$ und $\beta_1 \ldots \beta_q$ sowie der Varianz σ^2 des White-Noise-Prozesses bietet die Zeitreihenanalyse unterschiedliche Methoden, die sich durch den erforderlichen Rechenaufwand und die Genauigkeit der sich ergebenden Prozessmodelle erheblich unterscheiden. Von den etablierten Methoden seien hier die so genannten Momentenmethode, die Kleinste-Quadrate-Methode und die Maximum-Likelihood-Methode genannt, da diese nach Rinne [Rinne 02] besonders für die Anwendung bei ARMA-Prozessmodellen geeignet sind. **Bild 2.13** zeigt eine entsprechende Übersicht.
Die Momentenmethode dient hauptsächlich als Ausgangspunkt für die grobe Abschätzung der Parameterwerte, die dann wiederum als Startwerte für die komplexeren, meist iterativen Schätzmethoden weiterverwendet werden können. Das allgemeine Prinzip der Momentenmethode ist es, so viele statistische Momente der Stichprobe wie es Parameter zu bestimmen gilt mit den entsprechenden Momenten der Gesamtheit zu vergleichen. Im Falle der Zeitreihenmodellierung stellt die gemessene Zeitreihe die Stichprobe dar, während das Prozessmodell die Gesamtheit der möglichen Prozessvariablen wiedergibt. Unter Anwendung verschiedener Methoden können daher aus der Modellgleichung Formeln für die statistischen Momente der Gesamtheit hergeleitet werden. Durch Gleichsetzen mit den Momenten der Stichprobe lässt sich daraufhin ein Gleichungssystem mit ebenso vielen Gleichungen wie Unbekannten aufstellen, das nach den gesuchten Modellparametern auflösbar ist. Für einfache MA-Prozesse ist dabei die iterative Berechnung der Autokorrelationsfunktion über die Yule-Walker-Gleichungen [Yule 1927] [Walker 1931] von besonderer Bedeutung, während für die MA-Prozesse mit dem Wilson-Algorithmus [Wilson 69] eine rasch konvergierende Methode zur Parameterbestimmung gegeben ist. Diese beiden Methoden finden in der in [Box 94] beschriebenen Vorgehensweise zur Anpassung kombinierter ARMA-Prozessmodelle an gegebene Zeitreihen durch die getrennte Bestimmung der AR- und der MA-Parameter ebenfalls Anwendung.

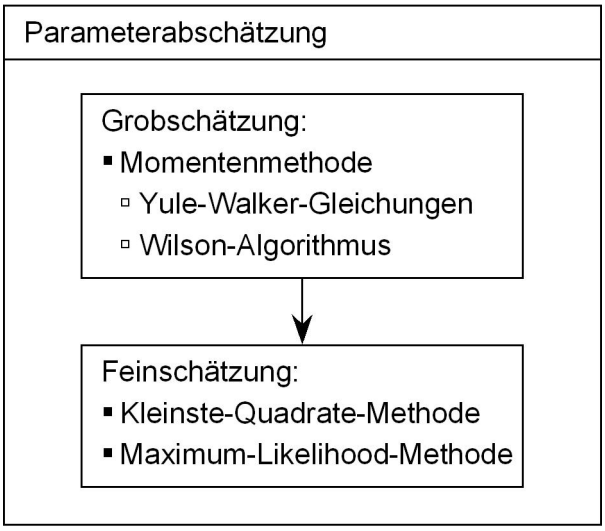


Bild 2.13: Methoden der Parameterabschätzung

Neben der Momentenmethode existieren noch eine Reihe weiterer vergleichsweise einfacher Verfahren, bei denen die gesuchten Parameter jeweils nach einem bestimmten Prinzip bzw. einer bestimmten Rechenvorschrift gewonnen werden können. Nach Rinne [Rinne 02] ist die Anpassung der Parameter und die damit erreichbare Güte des Modells mit diesen Methoden oftmals nicht optimal. Deutlich bessere Güten der geschätzten Parameter lassen sich mit

komplexeren Methoden erzielen, wobei diese jedoch den offensichtlichen Nachteil eines teilweise erheblich höheren Rechenaufwandes aufweisen.
Eine der gebräuchlichsten dieser komplexeren Vorgehensweisen stellt die Kleinste-Quadrate-Methode dar. Ziel ist es hierbei, die Prozessparameter so zu wählen, dass die Summe der Residuenquadrate zwischen tatsächlich gemessener Zeitreihe und modelliertem Prozess minimiert wird. Nach der Definitionsgleichung des ARMA-Prozessmodells ergibt sich dabei die Problematik, dass für die Berechnung der ersten Residuenwerte nicht beobachtbare Startwerte $x(nT)$ und $\varepsilon(nT)$ für $n \leq 0$ benötigt werden. Um diesem Problem zu begegnen, werden zwei Ansätze unterschieden, zum einen der bedingte und zum anderen der unbedingte Kleinste-Quadrate-Ansatz. Bei ersterem werden die Startwerte der Einfachheit halber vernachlässigt und zu Null gesetzt, während beim unbedingten Kleinste-Quadrate-Ansatz eine Schätzung der Startwerte erfolgt, so dass diese formal berücksichtigt werden können. Dazu kommt z.B. die rekursive Backforecasting-Technik von Box und Jenkins zum Einsatz, die auf der Annahme basiert, dass stationäre Prozesse zeitreversibel sind. Damit erlaubt das Backforecasting eine "Zurücksage", d.h. eine Prognose der benötigten Vergangenheitswerte aus den vorhandenen Zeitreihenwerten. Sowohl der bedingte als auch der unbedingte Kleinste-Quadrate-Ansatz kann zu einem iterativen Verfahren ausgebaut werden.
Zuletzt soll hier noch die Maximum-Likelihood-Methode angeführt werden, da diese ebenfalls zu den heutigen Standardmethoden zu zählen ist. Das grundlegende Prinzip besteht hier darin, für die gegebenen Beobachtungen (d.h. die gemessene Zeitreihe) die wahrscheinlichsten Parameterwerte zu berechnen. Es wird also versucht, diejenigen Parameterwerte zu finden, welche die gegebene Beobachtung mit der größten Wahrscheinlichkeit reproduzieren und damit am plausibelsten erscheinen. Mathematisch wird dazu zunächst die so genannte Likelihood-Funktion aus den beobachteten Zeitreihenwerten bestimmt. Diese Funktion ordnet jedem möglichen Parameterwert die Wahrscheinlichkeit zu, mit der dieser Wert im Modell eingesetzt genau die tatsächlich beobachtete Zeitreihe liefert. Die Bestimmung der Parameterwerte erfolgt dann, indem die Likelihood-Funktion durch Nullsetzen der ersten Ableitung maximiert wird. Die sich ergebenden Likelihood-Funktionen sind häufig hochkomplexer Natur und lassen sich daher oft nur schwer differenzieren. Deshalb wird in vielen Fällen nicht die Likelihood-Funktion selbst, sondern die logarithmierte Funktion zur Maximierung herangezogen. Durch das Logarithmieren bleiben die Maxima der Funktion an der selben Stelle bestehen, die Ableitung der logarithmierten Funktion ist jedoch einfacher zu berechnen.
Trotz der Komplexität der zuletzt beschriebenen zwei Methoden stehen heute eine Reihe von Statistik-Software-Lösungen zur Verfügung, in denen die entsprechenden Algorithmen zur Parameterabschätzung implementiert sind. Für eine gegebene Zeitreihe ist es daher mit Hilfe moderner Computer problemlos möglich, ein ARMA-Prozessmodell anzupassen. Eine Berechnung in Echtzeit, wie sie z.B. für eine dem beobachteten Prozess folgende Prognose notwendig wäre, muss jedoch aufgrund des erheblichen Rechenaufwandes als problematisch angesehen werden.

Nachdem das Modell spezifiziert ist und die benötigten Parameter mit Hilfe der genannten Schätzverfahren bestimmt wurden, gilt es in der Modelldiagnose festzustellen, ob und wie gut das gefundene Prozessmodell die tatsächlichen Beobachtungen wiedergibt. Falls die Modelldiagnose eine nicht ausreichende Güte des Prozessmodells offenbart, ist gegebenenfalls eine verbesserte Modellspezifikation und eine erneute Parameteranpassung erforderlich, so lange bis das Modell den Anforderungen genügt. Im Folgenden werden die drei in **Bild 2.14** dargestellten Ansätze skizziert, die in der Modelldiagnose Anwendung finden.

Als erster, vergleichsweise einfacher Ansatz ist die Gegenüberstellung statistischer Kenngrößen des Modells und der tatsächlich beobachteten Zeitreihe zu nennen. In den meisten Fällen wird dabei die Autokorrelation als Maß herangezogen, d.h. wenn die Autokorrelation des Modells mit derjenigen der Messwerte übereinstimmt, wird davon ausgegangen, dass das Modell den stochastischen Prozess, der die gemessene Zeitreihe als eine mögliche Realisierung hervorruft, hinreichend gut beschreibt.
In einem zweiten Ansatz, der Residualanalyse, werden nicht die Zeitreihen- und Prozessmodellwerte selbst, sondern die sich zwischen beiden ergebenden Differenzen bzw. Residuen näher untersucht. Zu jedem Beobachtungszeitpunkt wird die Differenz zwischen beobachteter Zeitreihe und modelliertem Prozess berechnet, so dass die Residuen als eigene Zeitreihe dargestellt werden können. Zur Analyse der Residuenreihe gibt es wiederum zwei wichtige Vorgehensweisen. Die erste zielt darauf ab, zu überprüfen, ob die Residuen einem White-Noise-Prozess entsprechen. Ist dies der Fall, so enthalten die Residuen keine Informationen mehr und es kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche in der ursprünglichen Zeitreihe enthaltenen Informationen auch im Prozessmodell enthalten sind. Die zweite Vorgehensweise erlaubt es, aus der statistischen Analyse der Residuen direkt auf die Gültigkeit des verwendeten Prozessmodells zu schließen.

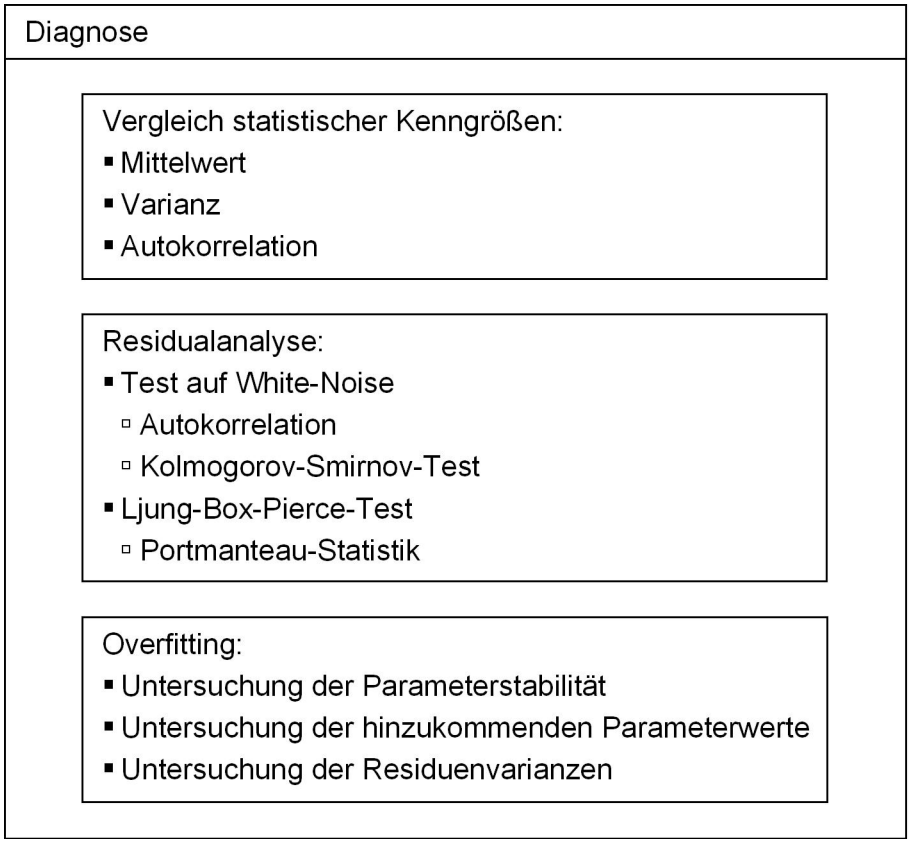


Bild 2.14: Methoden der Modelldiagnose

Zum Test auf Vorliegen eines White-Noise-Prozesses in der Residuenreihe finden verschiedene Testverfahren Anwendung. Zunächst lassen sich die Autokorrelationen der Residuenreihe mit denen eines theoretischen White-Noise-Prozesses vergleichen, indem wie z.B. in [Schlittgen 99] beschrieben in Abhängigkeit von der Anzahl der in der Zeitreihe enthaltenen Werte ein oberer und ein unterer Grenzwert für die Residualkorrelationen bestimmt wird. Demnach kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % festgestellt werden, dass es sich um

einen White-Noise-Prozess handelt, wenn 95 % der Korrelationen der Residuenreihe in den Bereich ±1,96 $\frac{1}{\sqrt{N}}$ fallen, wobei *N* die Anzahl der Zeitreihenwerte ist.
Des Weiteren kann der Kolmogorov-Smirnov-Test herangezogen werden. Dieser Test erlaubt die Feststellung, ob eine gegebene Stichprobe einer bestimmten Verteilung entspricht. Im Falle der Residualanalyse ist damit eine Prüfung der Verteilung der Residuen auf White-Noise möglich. Dazu wird für jeden Reihenwert die relative Summenhäufigkeit bestimmt, indem die Anzahl von in der Zeitreihe enthaltenen Werten, die kleiner als der gerade betrachtete Wert sind, zur Gesamtanzahl der Zeitreihenwerte in Relation gesetzt wird. Die relativen, über die Residuenwerte abgetragenen Summenhäufigkeiten der Residuenreihe werden dann mit den theoretischen Summenhäufigkeiten der White-Noise-Verteilung verglichen. Bleibt der maximale Abstand bzw. die maximale Differenz zwischen beobachteter und theoretischer Summenhäufigkeit unter einem zu einem bestimmten Konfidenzniveau gehörigen Grenzwert, so bestätigt dies mit der dem Konfidenzniveau entsprechenden Wahrscheinlichkeit die Hypothese, dass eine White-Noise-Verteilung vorliegt. Der Grenzwert ist dabei den Tabellen der Kolmogorov-Smirnovschen λ-Verteilung zu entnehmen und durch die Anzahl der verwendeten Messpunkte zu dividieren. Laut [Schlittgen 99] wird häufig zum Test einer Stichprobe auf White-Noise mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests statt der relativen Summenhäufigkeit auch das kumulierte Periodogramm herangezogen. Darin werden die kumulierten und auf Eins normierten spektralen Anteile der Fourierfrequenzen für die zu untersuchende Zeitreihe dargestellt. Bei einem White-Noise-Prozess ergibt sich das kumulierte Periodogramm zu einer Geraden mit der Steigung Eins, da hier alle Frequenzen mit gleicher Intensität enthalten sind. Zum Vergleich der empirischen Zeitreihe mit dem White-Noise-Prozess wird der maximale Abstand zwischen deren kumuliertem Periodogramm und dieser Geraden bestimmt. Diese Prüfgröße erlaubt dann wiederum durch Vergleich mit einem zum gewünschten Konfidenzniveau gehörenden Grenzwert die Beurteilung, ob die Stichprobe einer White-Noise-Verteilung entspricht. Der Grenzwert für den Hypothesentest anhand des kumulierten Periodogramms berechnet sich mit Hilfe der in [Schlittgen 99] gegebenen Näherungsformel.
Für die bereits angesprochene zweite in der Residualanalyse verwendete Vorgehensweise hat sich ein auf der Portmanteau-Statistik beruhendes Testverfahren etabliert, das 1970 erstmals von Box und Pierce in [Box 70b] beschrieben wurde und heute meist in seiner weiterentwickelten Form, dem so genannten Ljung-Box-Pierce-Test [Ljung 78], angewandt wird. Dazu wird nach der Definition der Portmanteau-Tests ein Q-Statistik genannter Kennwert aus den Residualautokorrelationen berechnet und mit dem zu einem bestimmten Konfidenzniveau gehörigen oberen Quantil der χ^2-Verteilung verglichen. Die Anzahl der Freiheitsgerade der heranzuziehenden χ^2-Verteilung ergibt sich aus der Anzahl der verwendeten Korrelationswerte *m* und den Ordnungen *p* und *q* des zu überprüfenden ARMA-Modells zu $m - p - q$. Liegt der berechnete Kennwert über dem oberen Quantil dieser $\chi^2[m - p - q]$-Verteilung, so beschreibt das ARMA-Modell den in der Zeitreihe realisierten stochastischen Prozess mit einer dem Konfidenzniveau entsprechenden Wahrscheinlichkeit nicht adäquat und das Modell muss verworfen werden.
Der dritte gebräuchliche Modelldiagnoseansatz ist das so genannte Overfitting. Hierbei werden probehalber ein oder mehrere ARMA-Modelle höherer Ordnung aufgestellt und parametriert. Diese werden dann hinsichtlich der Parameterstabilität und der zu erfüllenden Gütekriterien mit dem ursprünglichen Modell verglichen. Die Modellgüte lässt sich dabei z.B. anhand der Residuenvarianz beziffern oder auch mit Hilfe der zuvor genannten Diagnosewerkzeuge feststellen. Hinsichtlich der Modellparameter selbst ist zu beachten, dass starke Änderungen

in den Parameterwerten zwischen Modellen benachbarter Ordnungen, z.B. zwischen [*p*; *q*] und [*p* + 1; *q*] oder [*p*; *q* + 1], auf eine nicht ausreichende Modellordnung hinweisen können. Auch deutlich von Null verschiedene Parameterwerte in den Modellen höherer Ordnung sollten Zweifel an der Gültigkeit des Ursprungsmodells auftreten lassen. Stellt sich beim Vergleich jedoch heraus, dass die höheren Modellordnungen zu keiner signifikanten Verbesserung führen, so ist vor dem Hintergrund des Gebots der Sparsamkeit das ursprünglich spezifizierte Modell beizubehalten. Neben den Parameterwerten selbst ist für die Auswahl des am besten zutreffenden Modells auch die jeweilige, sich für die Modelle verschiedener Ordnungen ergebende Residuenvarianz von Bedeutung. Werden mehrere Modelle gefunden, bei denen aufgrund der Eigenschaften der Parameterwerte keine klare Entscheidung bezüglich der benötigten Ordnung getroffen werden kann, so ist hier das Modell mit der geringsten Residuenvarianz zu wählen.

Letztendlich erfolgt die Anwendung des stochastischen Prozessmodells zur Prognose von zukünftigen Werten. Um eine Prognose für einen um *h* Zeitschritte in der Zukunft liegenden Wert der Zeitreihe zu berechnen, wird das so genannte *h*-Schritt-Prinzip nach Box und Jenkins angewandt. Dies ergibt sich aus der Umstellung der Definitionsgleichung des ARMA-Prozesses (Gleichung (2.13)) in die Form

$$\begin{aligned} x\big((n+h)T\big) = \zeta + \alpha_1 x\big((n+h-1)T\big) + \ldots + \alpha_{p\,\mathrm{ARMA}}\, x\big((n+h-p_{\mathrm{ARMA}})T\big) \\ + \varepsilon\big((n+h)T\big) - \beta_1 \varepsilon\big((n+h-1)T\big) - \ldots - \beta_{q\,\mathrm{ARMA}}\, \varepsilon\big((n+h-q_{\mathrm{ARMA}})T\big). \end{aligned} \tag{2.14}$$

Dabei werden für alle Zeitreihenwerte $x\big((n+h-d)T\big)$ mit $1 \le d \le p_{\mathrm{ARMA}}$, für die $h-d \le 0$ gilt, d.h. die Werte $x(nT)$, $x\big((n-1)T\big)$, …, die bereits bekannten Zeitreihenwerte eingesetzt und für die verbleibenden Werte $x\big((n+1)T\big)$, …, $x\big((n+h-1)T\big)$, für die $h-d > 0$ gilt, die jeweiligen Prognosewerte. Die Zufallsschocks $\varepsilon\big((n+h-f)T\big)$ mit $0 \le f \le q_{\mathrm{ARMA}}$, für die $h-f \le 0$ gilt, also $\varepsilon(nT)$, $\varepsilon\big((n-1)T\big)$, …, können über die Abweichungen vorheriger Prognosewerte zu den tatsächlich aufgetretenen Zeitreihenwerten bestimmt werden, während die zukünftigen Schocks $\varepsilon\big((n+1)T\big)$, …, $\varepsilon\big((n+h-1)T\big)$, für die $h-f > 0$ ist, entsprechend dem Erwartungswert eines White-Noise-Prozesses zu Null gesetzt werden. Die Berechnung des Wertes $x\big((n+h)T\big)$ erfolgt also rekursiv über die Prognose aller zwischen dem momentanen Zeitschritt *n* und dem zukünftigen Zeitschritt *h* liegenden Prognosewerte sowie über die fortlaufende Beobachtung der Zufallsschocks. Es ergibt sich eine prozessbegleitende Prognose, die durch die Einbeziehung der tatsächlich auftretenden Zeitreihenwerte laufend an die aktuelle Entwicklung des Prozesses angepasst wird. Noch weiter verbessern lässt sich die Anpassung an den Prozess, indem auch die ARMA-Modellparameter laufend an eine repräsentative Anzahl aktueller Zeitreihenwerte adaptiert werden. Diese Vorgehensweise erfordert jedoch einen hohen Rechenaufwand, da die Parameterschätzung wie bereits erwähnt auf z.T. sehr aufwändigen rekursiven Verfahren beruht.

2.3.2 Anwendung der Zeitreihenanalyse auf den Grundlastverlauf

Der Verlauf der Grundlast des Stahlwerkes zeichnet sich vor allem durch eine Anzahl verschiedener Leistungsniveaus aus. Diese treten in Abhängigkeit von den Schaltzuständen der angeschlossenen Verbraucher auf. Während die Direktreduktionsanlage nahezu ununterbrochen eine gleichbleibende Leistung aufnimmt, kann die Leistungsaufnahme des Walzwerkes je nachdem, ob keine, eine oder beide Walzstraßen in Betrieb sind, unterschiedliche Werte

annehmen. Ähnliches gilt für die Stranggussanlage und die weiteren, zuvor bereits genannten Verbraucher. Um diese verschiedenen Leistungsniveaus der Grundlast abbilden zu können, erscheint die Modellierung mit nur einem ARMA-Prozessmodell wenig erfolgversprechend. Es wird daher im Folgenden versucht, die einzelnen Leistungsniveaus jeweils als eigenen stochastischen Prozess zu beschreiben. Da die für diese Arbeit verwendeten Prozessdaten keine Informationen über die Schaltzustände der in der Grundlast zusammengefassten Verbraucher enthalten, ist eine darauf basierende Zuordnung des jeweils aktuellen Leistungsniveaus zu einem dieser einzelnen Prozessmodelle nicht möglich. Daher werden zunächst quantitativ charakteristische Kennzahlen für jeden Zeitreihenprozess festgelegt, so dass die aktuellen Leistungsmesswerte dem jeweiligen Prozess entsprechend zugeordnet werden können. Als Kennzahlen werden hierbei die Erwartungs- bzw. Mittelwerte, die Varianzen sowie jeweils die oberen und unteren Leistungsgrenzwerte zur Unterscheidung der Teilprozesse herangezogen. Darüber hinaus wird für jeden Prozess noch festgestellt, ob ein trendartiger Verlauf vorliegt, da dieser vor der Anpassung des entsprechenden ARMA-Prozessmodells durch Differentiation bzw. bei den hier vorliegenden zeitdiskreten Messwerten durch Differenzenbildung aus den Ursprungsdaten beseitigt werden muss. Durch qualitative Betrachtung einer 14-tägigen Messreihe können, wie in **Bild 2.15** dargestellt, sechs verschiedene Teilprozesse unterschieden werden. In der Darstellung ist jeder Prozess exemplarisch jeweils nur einmal gekennzeichnet. Die markierten Störungen werden als Ausreißer vom üblichen Verlauf angesehen und für die weitere Modellierung nicht betrachtet.
Bei diesem langen Beobachtungszeitraum kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche möglicherweise auftretenden Grundlastzustände aufgetreten sind und dass somit die herangezogene Datenreihe eine repräsentative Ausgangsbasis für die Modellierung darstellt.

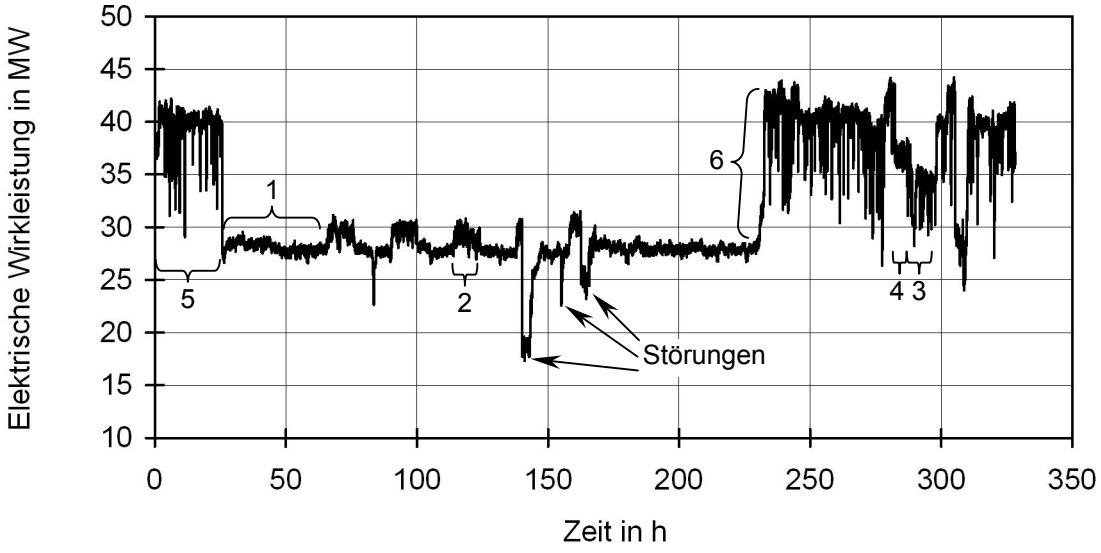


Bild 2.15: Lastverlauf der Grundlast über 14 Tage, 1 min-Mittelwerte

In **Tabelle 2.4** sind die ermittelten Kenndaten für die sechs identifizierten Einzelprozesse aufgeführt. Für während des Messzeitraums mehrfach auftretende Einzelprozesse werden Kennzahlbereiche angegeben, sofern die Kennzahlen bei verschiedenen Vorkommen des selben Prozesses unterschiedlich sind. Das Vorhandensein etwaiger trendartiger Verläufe wird mit Hilfe der Regressionsanalyse untersucht. Wenn diese eine Steigung der Ausgleichsgeraden von nahe Null ergibt, wird von einer trendfreien Zeitreihe ausgegangen.

Tabelle 2.4: Kenndaten der Grundlast-Einzelprozesse, 1 min-Mittelwerte

Prozess Nr.	Trend	Mittelwert in MW	Varianz in (MW)²	Minimalwert in MW	Maximalwert in MW
1	-	27,0 – 28,0	0,3	23,3	30,6
2	-	29,5	0,5 – 0,8	26,1	32,4
3	-	34,0	3,0	28,6	38,3
4	-	37,0	3,5	30,7	40,6
5	-	39,0 – 40,0	5,0 – 8,0	26,0	46,7
6	0,17 $\frac{MW}{min}$	-	-	23,0	46,0

Durch Aufteilung der gemessenen Zeitreihe in die Einzelprozesse anhand der Kennzahlen wird festgestellt, dass die Prozesse 1 und 6 jeweils zweimal, die Prozesse 2 und 5 jeweils dreimal und die Prozesse 3 und 4 jeweils nur einmal auftreten. Die Modellspezifikation erfolgt für jedes Auftreten eines Einzelprozesses gesondert. Somit stehen für diejenigen Prozesse, die mehrfach beobachtet werden, eine Anzahl von Modellspezifikationen zur Verfügung, welche miteinander verglichen werden können. Dies erlaubt die Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, im Idealfall sollten für verschiedene Vorkommen des selben Prozesses immer die selben Ordnungen spezifiziert werden.

Bild 2.16 zeigt exemplarisch die Beträge der gewöhnlichen und der partiellen Autokorrelationsfunktion für ein Auftreten des Prozesses 1 bei einer Zeitschrittweite von 1 min. Der Verlauf der AKF zeigt ein oszillierendes Abklingen nach dem höchsten Wert bei der Zeitverzögerung Eins. Dies deutet nach Rinne [Rinne 02] und Schlittgen [Schlittgen 99] auf die Ordnung $p = 1$ für den AR-Teil des anzupassenden Prozessmodells hin. Gleiches lässt sich aus der PAKF für die Ordnung q des MA-Teils schlussfolgern, da hier ebenfalls ein oszillierendes Abklingen nach der Verzögerung Eins zu erkennen ist.

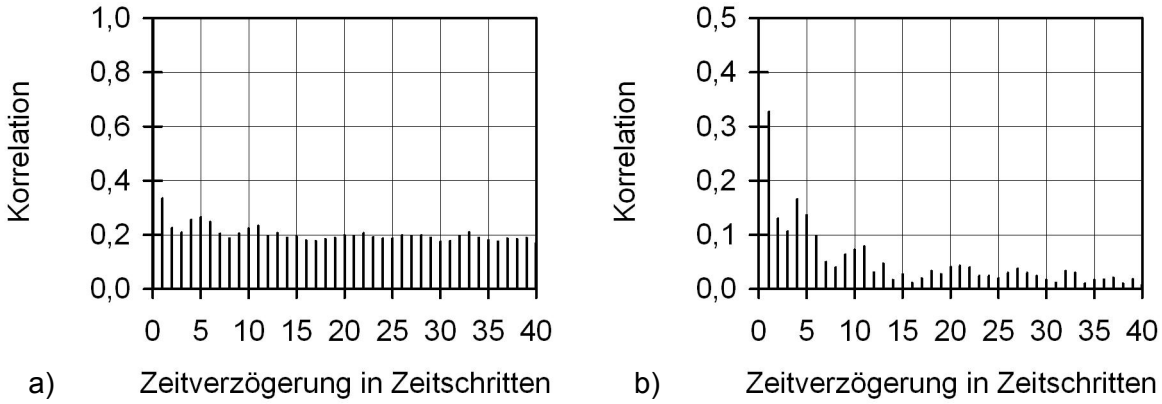


Bild 2.16: Autokorrelationsfunktion des Grundlast-Prozesses 1, a) gewöhnlich (AKF), b) partiell (PAKF)

Zur Bestätigung dieses Ergebnisses wird zusätzlich für dieses Auftreten des Prozesses die zuvor erwähnte Korrelationstafel nach Streitberg aufgestellt und in **Tabelle 2.5** dargestellt.

Tabelle 2.5: Korrelationstafel des Grundlast-Prozesses 1

p \ *q*	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-0,33	-0,22	-0,20	-0,25	-0,26	-0,24	-0,20	-0,19
1	-0,13	-0,02	-0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	-0,01
2	-0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-0,16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	-0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Zur Interpretation dieser Korrelationstafel werden die Koeffizienten bei der Ordnung $p = 1$ vernachlässigt, da diese sehr viel geringer ausfallen als diejenigen der Ordnung $p = 0$. Damit kann der erwartete Nullblock ab den Ordnungen $p = 1$ und $q = 1$ identifiziert werden, was die Erkenntnisse aus der Analyse der AKF und PAKF bestätigt. Diese Ergebnisse sind auch bei dem zweiten Auftreten des Prozesses 1 in vergleichbarer Form zu beobachten. Somit ist dieser Prozess mit einem ARMA[1;1]-Modell zu beschreiben. Gleiches kann auch für die Prozesse 2 und 6 festgestellt werden, bei letzterem jedoch erst nach Beseitigung des trendartigen Verlaufs aus den Messdaten durch einfache Differenzenbildung.
Die Prozesse 3, 4 und 5 zeigen weniger aussagekräftige Verläufe der AKF und PAKF, was in **Bild 2.17** exemplarisch für den Prozess 5 dargestellt ist.

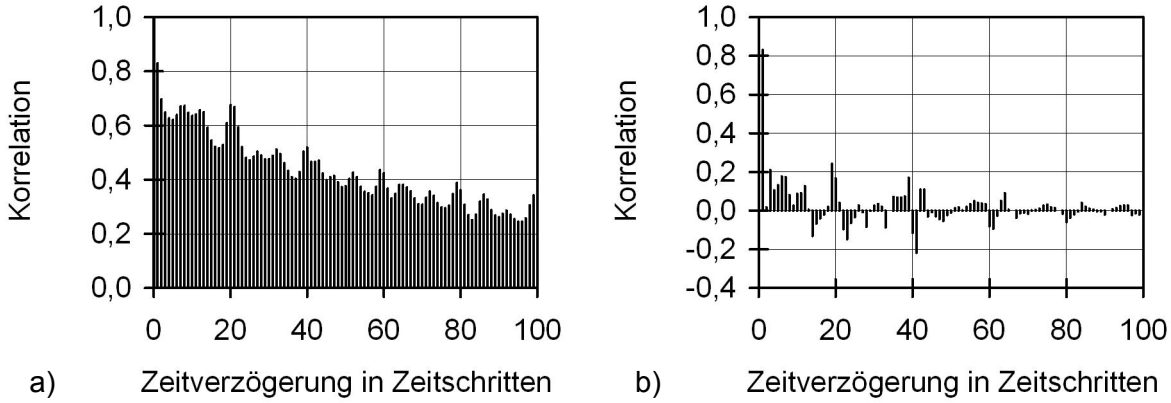


Bild 2.17: Autokorrelationsfunktion des Grundlast-Prozesses 5, a) gewöhnlich (AKF), b) partiell (PAKF)

Das oszillierende Abklingen der AKF ab den Zeitverzögerungen größer als Eins lässt zwar auch hier auf die Ordnung $p = 1$ schließen, die PAKF jedoch weist bei der Zeitverzögerung Eins einen verschwindend geringen Wert auf, was auf die Ordnung $q = 0$ hindeutet. Die Korrelationstafel in **Tabelle 2.6** lässt hingegen keinen eindeutigen Nullblock ab $p = 1$ und $q = 0$ erkennen, da z.B. für $p = 2$ und $q = 0$ oder für $p = 1$ und $q = 1$ deutlich größere Werte auftreten als im Nullblock in Tabelle 2.5.

Tabelle 2.6: Korrelationstafel des Grundlast-Prozesses 5

p \ q	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-0,83	-0,70	-0,65	-0,62	-0,62	-0,64	-0,67	-0,67
1	-0,02	-0,17	-0,05	-0,03	-0,05	-0,02	0,06	0,06
2	-0,21	-0,04	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
3	-0,11	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	-0,18	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	-0,18	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	-0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nach dem Prinzip der Sparsamkeit wird hier daher zunächst von einem ARMA[1;0]-Modell ausgegangen, dies ist jedoch in der anschließenden Modelldiagnose kritisch zu prüfen. Die damit für den Prozess 5 gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf die Prozesse 3 und 4 übertragen, da diese ähnliche Verläufe zeigen.
Zur Parameterschätzung für die spezifizierten Prozessmodelle werden vorgefertigte Funktionen des Statistiksoftware-Paketes R in der Version 2.0.1 genutzt, die sich der bedingten Kleinste-Quadrate-Methode sowie der Maximum-Likelihood-Methode bedienen. So können die Parameter $\alpha_1 \ldots \alpha_p$ und $\beta_1 \ldots \beta_q$ sowie die Varianz σ^2 des White-Noise-Prozesses bestimmt werden. Der Erwartungswert der jeweiligen Zeitreihe wird mit dem entsprechenden arithmetischen Mittel gemäß Tabelle 2.4 gleichgesetzt. Auch hier erfolgt die Schätzung für jedes Auftreten der einzelnen Prozesse gesondert, um die Parameter untereinander vergleichen zu können. Das Ergebnis ist **Tabelle 2.7** zu entnehmen.

Tabelle 2.7: Geschätzte Parameter für die Grundlast-Einzelprozesse

Prozess Nr.	Auftreten	α_1	β_1	σ^2
1	1	1,00	-0,94	0,22
1	2	0,99	-0,92	0,22
2	1	0,95	-0,64	0,34
2	2	0,79	-0,38	0,35
2	3	0,91	-0,45	0,39
3	1	0,83	-	0,89
4	1	0,65	-	0,95
5	1	0,83	-	1,59
5	2	0,91	-	1,41
5	3	0,88	-	1,27
6	1	0,64	-0,94	0,54
6	2	0,48	-0,81	0,68

Die auf diese Weise ermittelten Parameterschätzwerte nehmen auch für die Prozesse, die mehrfach auftreten, jeweils ähnliche Werte an, was auf gute Reproduzierbarkeit schließen lässt.
Zur Modelldiagnose werden nun zunächst mit Hilfe des Overfittings Parameter für Modelle höherer Ordnungen geschätzt, exemplarisch ist dies in **Tabelle 2.8** dargestellt.

Tabelle 2.8: Geschätzte Parameter für den Grundlast-Prozess 2 bei höheren Modellordnungen

Modell	α_1	α_2	β_1	β_2	σ^2
[1;1]	0,947	-	-0,635	-	0,342
[2;1]	1,341	-0,345	-0,922	-	0,320
[1;2]	0,989	-	-0,593	-0,250	0,323
[2;2]	1,339	-0,343	-0,919	-0,002	0,320

Für die Modellordnungen [2;1] und [1;2] sind die neu hinzukommenden Parameter von Null verschieden und die Residuenvarianz nimmt geringfügig ab. Daher scheinen beide Modelle den Prozess besser zu beschreiben als das Ausgangsmodell, wobei die geringste Varianz für die Ordnung [2,1] erreicht wird. Die Erweiterung des Modells bis zur Ordnung [2;2] erscheint nicht notwendig, da der Parameter β_2 für diesen Fall beinahe Null und die Varianz nicht kleiner als bei der Ordnung [2;1] ist. Letztere ist daher nach der Methode des Overfittings zu wählen.
Zur Bestätigung dieses Ergebnisses wird die Residualanalyse sowohl für das Ausgangsmodell der Ordnung [1;1] als auch für das erweiterte Modell durchgeführt, wozu wiederum die im Statistiksoftware-Paket R enthaltenen Funktionen verwendet werden.

In **Bild 2.18** sind die standardisierten Residuenreihen, die sich für die beiden unterschiedlichen Modellordnungen ergeben, gegenübergestellt.

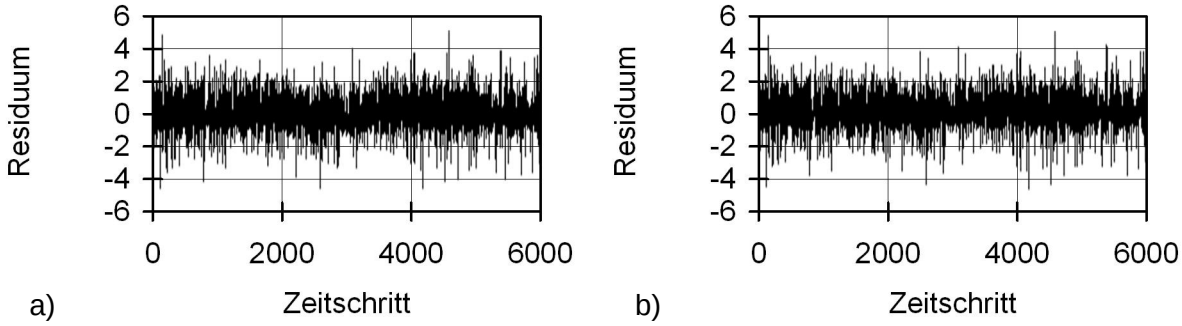


Bild 2.18: Standardisierte Residuenreihe des Grundlast-Prozesses 2, a) ARMA[1;1]-Modell, b) ARMA[2;1]-Modell

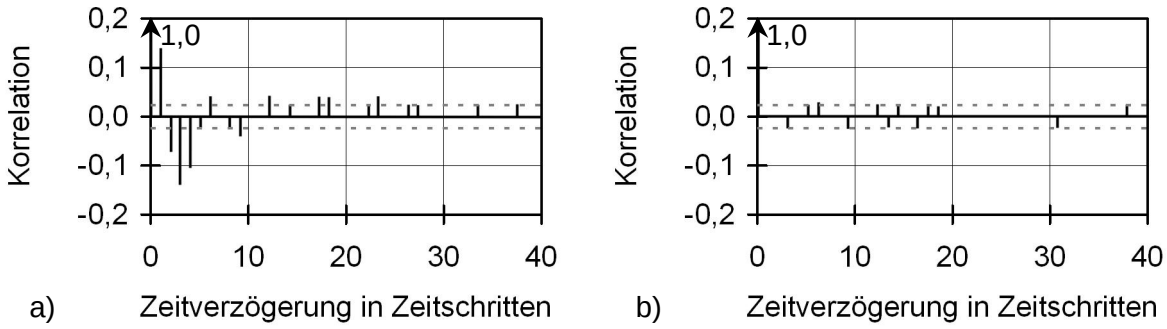


Bild 2.19: Autokorrelationsfunktion der Residuenreihe des Grundlast-Prozesses 2, a) ARMA[1;1]-Modell, b) ARMA[2;1]-Modell

Bild 2.19 zeigt zusätzlich dazu die Verläufe der entsprechenden Autokorrelationsfunktionen. Die gestrichelten Linien repräsentieren dabei die Grenzwerte, unter denen nach Schlittgen [Schlittgen 99] 95 % der Koeffizienten liegen müssen, um die Gültigkeit des jeweiligen Modells zu eben dieser Wahrscheinlichkeit bestätigen zu können. Durch die hohe Anzahl von N = 6940 Werten liegen diese Grenzewerte hier sehr dicht bei Null ($\pm 1{,}96 \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \pm 0{,}024$). Es zeigt sich, dass die Korrelationskoeffizienten für die ARMA[2;1]-Modellierung die genannte Bedingung erfüllen, während dies beim [1;1]-Modell nicht der Fall ist.

Die Anwendung des Ljung-Box-Pierce-Tests führt zu den in **Bild 2.20** dargestellten Graphen. Darin sind jedoch nicht die für den Test benötigten Q-Statistik-Kennwerte für jede Zeitverschiebung aufgeführt, sondern die dazugehörigen P-Werte. Diese Werte geben die auf Eins normierte Anzahl von Werten an, die innerhalb der für den Test heranzuziehenden χ^2-Verteilung größer als der zu der jeweiligen Zeitverzögerung gehörende Q-Statistik-Wert sind. Ist der P-Wert größer als das in diesem Falle gewünschte Konfidenzniveau von 5 %, so muss die Hypothese, dass die Residuenreihe einem White-Noise-Prozess entspricht und dass somit das untersuchte ARMA-Modell die beobachtete Zeitreihe richtig beschreibt, mit 95 % Sicherheit nicht abgelehnt werden. Es muss hier zur Bestätigung der Hypothese also nicht wie zuvor beschrieben der errechnete Q-Statistik-Wert unter dem entsprechenden oberen Quantil der χ^2-Verteilung liegen, sondern der errechnete P-Wert über dem Konfidenzniveau. Dies ist für den untersuchten Prozess 2 nur bei der Modellierung mit einem ARMA[2;1]-Modell bei Zeitverzögerungen größer als 900 Zeitschritte gegeben.

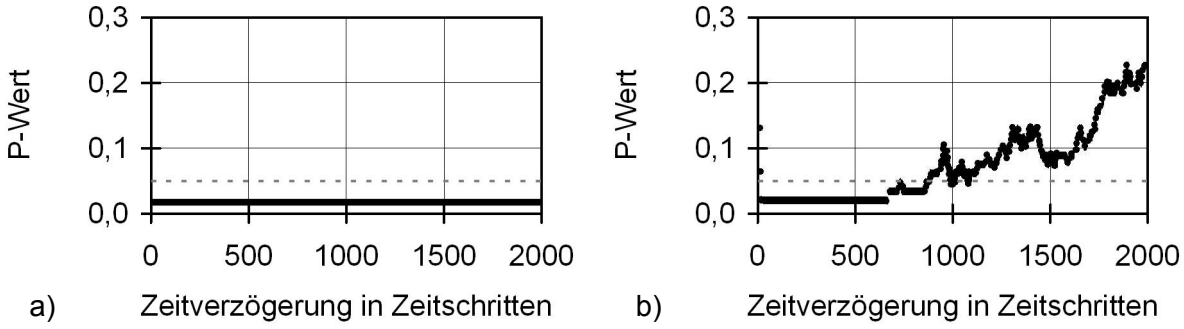


Bild 2.20: P-Werte-Verlauf der Residuenreihe des Grundlast-Prozesses 2
a) ARMA[1;1]-Modell, b) ARMA[2;1]-Modell

Abschließend wird noch das kumulierte Periodogramm der Residuenreihe für jedes der beiden Modelle erstellt, was in **Bild 2.21** zu sehen ist. Die gestrichelten Linien geben dabei den oberen und unteren Grenzwert für die maximale Differenz zwischen dem kumulierten Periodogramm der jeweiligen Residuenreihe und dem des White-Noise-Prozesses für ein Konfidenzniveau von 95 % wider. Auch hier zeigt sich, dass die bei der Modellordnung [1;1] verbleibenden Residuen keinem White-Noise-Prozess entsprechen, da das Periodogramm außerhalb der Grenzwerte liegt. Für das [2;1]-Modell kann dagegen wiederum von einer White-Noise-verteilten Residuenreihe ausgegangen werden.

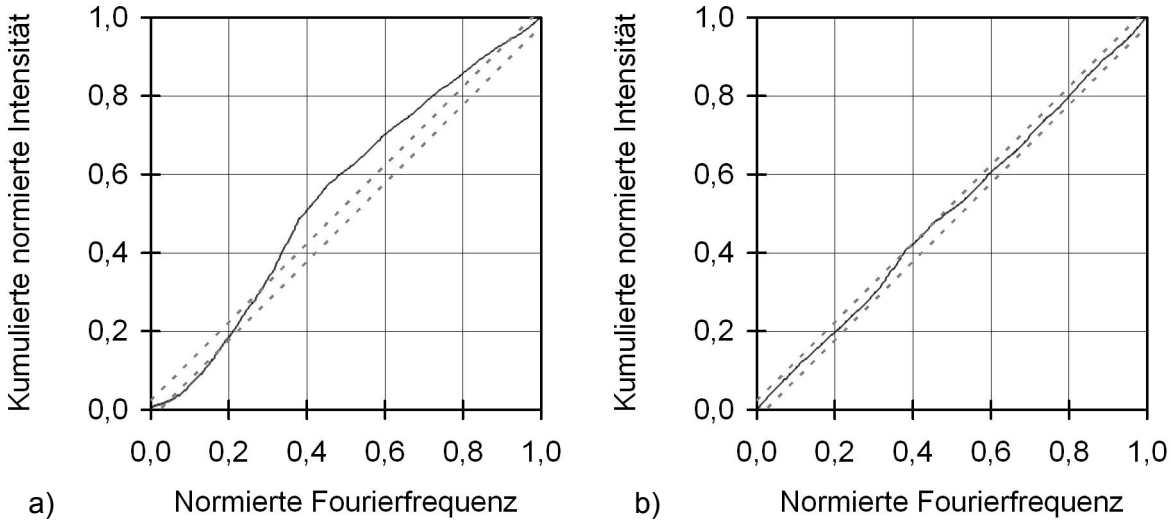


Bild 2.21: Kumuliertes Periodogramm der Residuenreihe des Grundlast-Prozesses 2, a) ARMA[1;1]-Modell, b) ARMA[2;1]-Modell

Zusammenfassend kann somit für den Prozess 2 mit Hilfe der Residualanalyse gezeigt werden, dass das ursprünglich spezifizierte ARMA[1;1]-Modell nicht ausreichend und eine Erhöhung der Modellordnung auf [2;1] erforderlich ist.
Gleichartige Modelldiagnose-Untersuchungen an den weiteren Grundlast-Prozessmodellen führen zu vergleichbaren Ergebnissen, allein die Modellspezifikation für den Prozess 6 wird als ausreichend eingeschätzt. **Tabelle 2.9** zeigt die Gegenüberstellung der Modellordnungen bei Spezifikation und nach der Modelldiagnose.

Tabelle 2.9: ARMA-Modellordnungen für die Grundlast-Einzelprozesse bei Spezifikation und nach Modelldiagnose

	Ordnung bei Spezifikation		Ordnung nach Modelldiagnose	
Prozess Nr.	*p*	*q*	*p*	*q*
1	1	1	1	2
2	1	1	2	1
3	1	0	2	2
4	1	0	2	2
5	1	0	2	2
6	1	1	1	1

Die nach Änderung der Modellordnungen erforderliche erneute Schätzung der Parameterwerte erfolgt analog zur ersten Schätzung nach der Spezifikation mit den in **Tabelle 2.10** enthaltenen Ergebnissen. Es zeigt sich, dass die Varianzen σ^2 z.T. deutlich kleiner werden. Gleichzeitig ergibt sich nach wie vor eine gute Reproduzierbarkeit der Werte, d.h. die Parameter nehmen weiterhin für jedes gesondert betrachtete Auftreten der Einzelprozesse ähnliche Werte an. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass mit diesen Modellen nun eine gute Beschreibungsmöglichkeit für die dem Grundlastverlauf zugrunde liegenden stochastischen Prozesse gefunden ist.

Tabelle 2.10: Geschätzte Parameter für die Grundlast-Einzelprozesse nach Modelldiagnose

Prozess Nr.	Auftreten	α_1	α_2	β_1	β_2	σ^2
1	1	1,00	-	-0,82	-0,13	0,22
1	2	1,00	-	-0,82	0,13	0,22
2	1	1,34	-0,35	-0,92	-	0,32
2	2	1,30	-0,32	-0,58	-	0,34
2	3	1,40	-0,40	-0,89	-	0,36
3	1	1,55	-0,52	-0,78	-0,13	0,83
4	1	1,39	-0,39	-0,74	-0,23	0,90
5	1	1,24	-0,24	-0,53	-0,31	1,39
5	2	1,22	-0,23	-0,52	-0,27	1,22
5	3	1,19	-0,19	-0,53	-0,27	1,09
6	1	0,64	-	-0,94	-	0,54
6	2	0,48	-	-0,81	-	0,68

Zur Beurteilung der Nutzbarkeit der so gefundenen Prozessmodelle zur Prognose von zukünftigen Werten der Leistungsaufnahme-Zeitreihe der Grundlast des Stahlwerkes werden die gemessenen Zeitreihen mit den modellierten verglichen. Dies erfolgt mit Hilfe des *h*-Schritt-Prinzips nach Box und Jenkins und ist in **Bild 2.22** exemplarisch für einen 30-minütigen Ausschnitt einer der Messreihen dargestellt, die als zum Prozessmodell 1 zugehörig identifiziert werden. Die ARMA-Modellparameter werden dabei aus dem Verlauf der ersten 15 Minuten geschätzt, um so eine Prognose für die nächsten 15 Minuten berechnen zu können. Des Weiteren werden die Startwerte für die Prognose ebenfalls aus diesen Daten gewonnen.

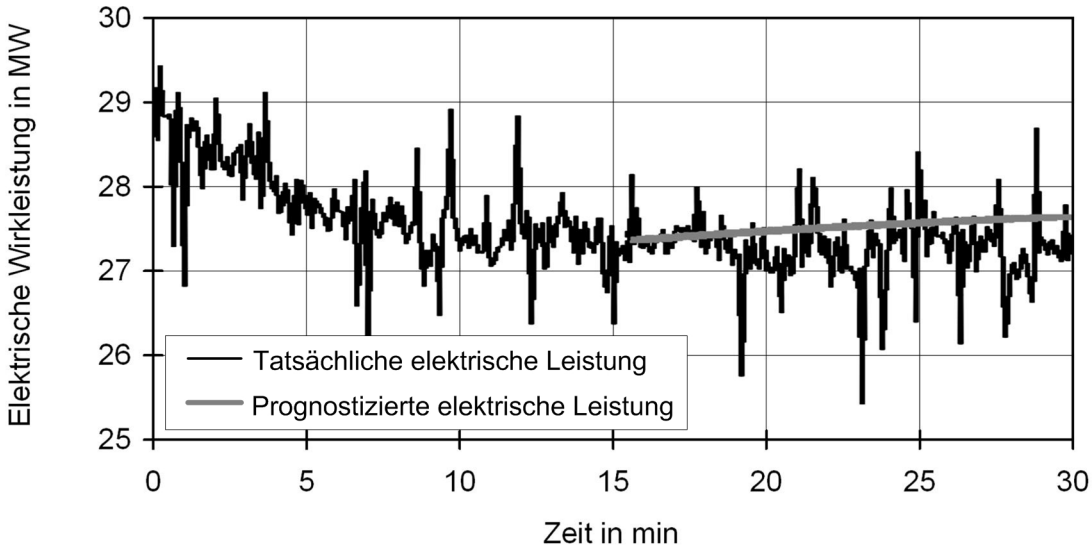


Bild 2.22: Vergleich zwischen tatsächlichem und mit ARMA-Modell prognostiziertem Lastverlauf der Grundlast

Es zeigt sich, dass zwar der grobe Trend der Zeitreihe durch das ARMA-Modell richtig prognostiziert wird, das stochastische Verhalten des Lastverlaufs wird jedoch erwartungsgemäß

nicht wiedergegeben. Ähnliche Ergebnisse werden auch für die anderen Prozessmodelle beobachtet. Die Prognosegenauigkeit der ARMA-Prozessmodelle ist somit als gering einzuschätzen. Demgegenüber steht der erhebliche Rechenaufwand, den die Spezifikation, Parameterschätzung und schließlich Prognose mit Hilfe der ARMA-Prozessmodelle erfordert. Für eine an den Prozess angepasste und sich adaptierende Prognose müssten die genannten Rechenschritte darüber hinaus in Echtzeit erfolgen, und dies nicht nur für ein, sondern für alle sechs identifizierten Einzelprozess-Modelle. Hinzu kommt die Schwierigkeit, die aktuell beobachteten Zeitreihenwerte während der Laufzeit sicher den einzelnen Prozessen zuzuordnen, damit die eigentliche Berechnung und Prognose erfolgen kann. Diese Aufteilung in die Einzelprozesse scheint bei der ARMA-Prozessmodellierung unabdingbar, da die Prognose der sich plötzlich und stufenförmig ändernden Leistungsaufnahme-Niveaus mit einem einzigen Prozessmodell nicht bewerkstelligt werden kann. Ferner ist das Zu- oder Abschalten der einzelnen Grundlast-Verbraucher aus Sicht der Lastkontrollanlage nicht vorhersehbar. Daher kann weder prognostiziert werden, welcher Prozess auf den momentanen folgt, noch wie viel Zeit bis zum Umschalten verbleibt. Gerade diese Umschaltungen führen jedoch zu signifikanten Änderungen des Leistungsniveaus der Grundlast.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Anpassung klassischer Zeitreihenmodelle an den Verlauf der Grundlast des Stahlwerkes grundsätzlich möglich ist. Zur prozessbegleitenden Prognose des Lastverlaufs sind diese Modelle jedoch kaum geeignet, und aufgrund des hohen Rechenaufwands und der damit möglicherweise einhergehenden Fehleranfälligkeit ist eine einfachere Modellierung zu bevorzugen. Im Folgenden wird daher versucht, den Grundlastverlauf mit einfacheren Methoden zu beschreiben und zu modellieren.

2.3.3 Vereinfachte Modellierung des Grundlastverlaufs

Rückblickend auf die Modellierung des Lastganges des Elektrolichtbogenofens lässt sich auch für die Grundlast ein ähnliches Modell formulieren, das ebenfalls auf der exponentiellen Mittelung nach Brown basiert. Die Zeitkonstante dieser exponentiellen Mittelung wird ebenfalls auf $T_{\mathrm{PT1}} \approx 170\ \mathrm{min}$ gesetzt, so dass sich der Erwartungswert für die Leistungsaufnahme der Grundlast analog zu den Formeln (2.2) und (2.8) zu

$$\overline{P}_{\mathrm{el\,Grundlast}}(nT) = 0{,}9999 \cdot \overline{P}_{\mathrm{el\,Grundlast}}\big((n-1)T\big) + 0{,}0001 \cdot P_{\mathrm{el\,Grundlast}}(nT) \tag{2.15}$$

ergibt. Daraus wird, entsprechend Formel (2.1), die vom aktuellen Leistungsniveau abhängige Prognoseleistung

$$\tilde{P}_{\mathrm{el\,Grundlast}} = a_{\mathrm{Prog}} \cdot P_{\mathrm{el\,Grundlast}} + (1 - a_{\mathrm{Prog}}) \cdot \overline{P}_{\mathrm{el\,Grundlast}} \tag{2.16}$$

berechnet, wobei die Gewichtungsfaktoren a_{Prog} und $\left(1 - a_{\mathrm{Prog}}\right)$ ebenfalls empirisch zu 0,5 gesetzt werden. Zu beachten ist hierbei, dass im Gegensatz zur Modellierung der Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens nur ein Leistungserwartungswert für die Grundlast im Algorithmus vorgesehen wird, der während der Laufzeit adaptiert wird. Die Hinterlegung von beispielsweise sechs Erwartungswerten wäre zwar auch denkbar, da dies der zuvor beschriebenen Aufteilung des Grundlastverlaufs in die sechs Einzelprozesse entspräche. Dieser Ansatz ist jedoch immer unmittelbar mit der Problematik verknüpft, die Zuordnung zu den

Einzelprozessen während der Laufzeit vorzunehmen. Bei sich ggf. ändernden Leistungsniveaus würde diese Zuordnung nach und nach keine korrekten Ergebnisse mehr liefern und müsste somit bei der Systemwartung überprüft und ggf. korrigiert werden. Dies ist im Hinblick auf die anzustrebende lange wartungsfreie Betriebszeit des zu entwickelnden Systems nicht wünschenswert und wird deshalb nicht implementiert.

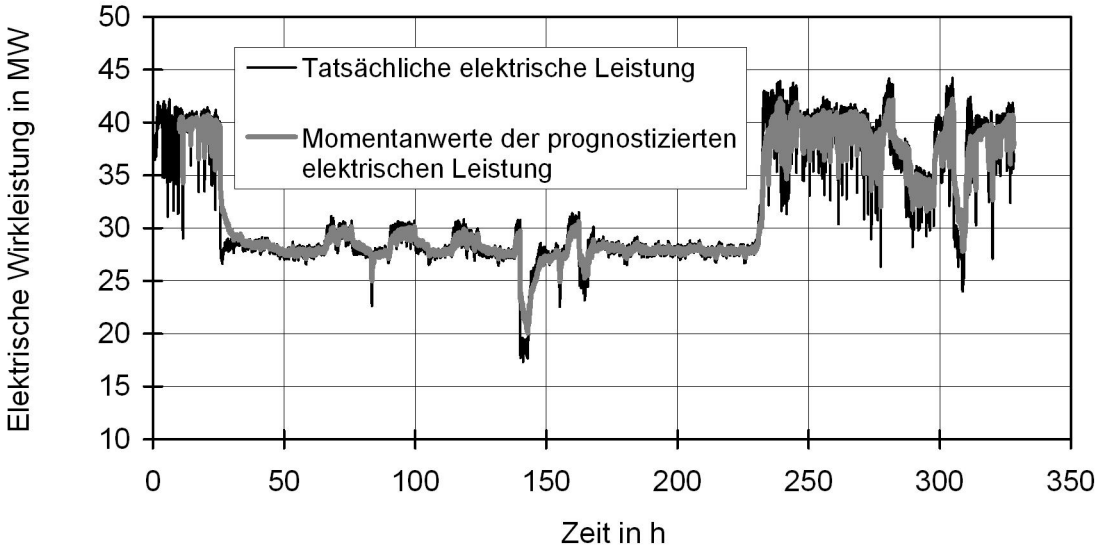


Bild 2.23: Vergleich zwischen tatsächlichem und mit exponentieller Glättung prognostiziertem Lastverlauf der Grundlast

Bild 2.23 zeigt analog zu Bild 2.9 das Ergebnis dieser einfachen Modellierung anhand des auch für die Zeitreihenmodellierung herangezogenen Lastverlaufs. Die ersten 10 h der Messung werden dabei zur Bestimmung eines anfänglichen Leistungserwartungswerts herangezogen, mit dem ab diesem Zeitpunkt die exponentielle Mittelung fortgeführt wird. Es ist erkennbar, dass die zum jeweiligen Zeitpunkt prognostizierten Leistungswerte gut mit dem Mittelwert des kurzfristig darauf folgenden tatsächlichen Lastverlaufs übereinstimmen, lediglich bei großen Sprüngen zwischen den Lastniveaus weicht die Prognose zunächst von den tatsächlich gemessen Werten ab. Dies ist damit zu begründen, dass der zugrunde liegende exponentielle Mittelwert bei derartigen Sprüngen nur langsam ansteigt bzw. abfällt.

Letztendlich erlaubt die exponentielle Mittelung im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen ARMA-Modellen keine Prognose eines Leistungsaufnahme-Verlaufs über einen längeren Zeitraum, sondern ausschließlich die Abschätzung der mittleren, bis zum nächsten Zeitschritt zu erwartenden Leistungsaufnahme. Für die Prognose des in der Lastkontrollstrategie einzuplanenden Energiebezugs der Grundlast erscheint eine solche Mittelwertabschätzung jedoch ebenso geeignet wie die Voraussage des zeitlichen Verlaufs der zukünftigen Leistungsaufnahme mittels der komplexeren Zeitreihenmodellierung. Insbesondere gibt letztere, wie zuvor gezeigt, den tatsächlich eintretenden Lastverlauf nur ansatzweise wieder und bietet daher trotz erheblich größerem rechentechnischem Aufwand kaum mehr Prognosegenauigkeit als die einfache Mittelwertabschätzung.
In einem ersten Schritt wird daher auch für die Grundlast ein auf exponentieller Mittelung basierendes Prognosemodell angewandt. Die Notwendigkeit etwaiger weiterer Verbesserungen des Modells kann erst bei einer auf der so zur Verfügung gestellten Prognose basierenden Anwendung des zu entwickelnden Lastkontrollsystems beurteilt werden.

3 Prädiktion der Restlaufzeit des Elektrolichtbogenofens

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erwähnt, ist die Prognose der verbleibenden Stromflusszeit des Lichtbogenofens bis zum Abstich einer der wichtigsten Aspekte bei der Entwicklung einer prädiktiven Lastkontrollanlage für Elektrostahlwerke. Da die benötigte Zeit zur Produktion einer Schmelze über die eingebrachte Wirkleistung unmittelbar mit dem Energiebedarf verknüpft ist, bietet es sich an, die Prädiktion der Restlaufzeit auf die Prognose der für die aktuelle Schmelze erforderlichen Energie zu stützen. Zur Abschätzung des Energiebedarfs wurden in der Vergangenheit in der Forschung und Industrie die im Folgenden kurz beschriebenen empirische Modelle entwickelt.

3.1 Etablierte Energiemodelle

Die Bilanzierung der in das System Elektrolichtbogenofen eingesetzten Massen und Energieströme ist im Sinne einer betrieblichen Optimierung von großer Bedeutung. Insbesondere Köhle und Adams haben sich seit den 1990er Jahren mit der Entwicklung empirischer Modelle zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs auseinandergesetzt. Zielsetzung dieser Modellierung ist es, den Einfluss verschiedener Prozessparameter wie z.B. der Einsatzmengen, Abstichtemperatur, Schlackenfahrweise oder auch bestimmter technischer Verbesserungen am Aggregat selbst auf den Energiebedarf vorherzusagen. Diese Modelle dienen daher zur vorausschauenden Beurteilung, ob eine geplante Änderung der Fahrweise oder bestimmte Umbau- bzw. Modernisierungsarbeiten an dem betreffenden Lichtbogenofen eine verbesserte Energieeffizienz und damit eine erhöhte Produktivität erhoffen lassen.
Für eine erleichterte Handhabbarkeit der Modellbildung wird die empirische Parametrierung gewählt, da die Komplexität eines theoretischen, auf den thermodynamischen Vorgängen im Lichtbogenofenprozess basierenden Energieprozessmodells aufgrund der Vielzahl von Einflussparametern zu groß erscheint. Eine Auflistung der in den Modellen betrachteten Einflussgrößen inklusive der verwendeten Formelzeichen findet sich in **Tabelle 3.1**. Das Modell von Köhle laut Gleichung (3.1), zuletzt aktualisiert in [Köhle 02], bezieht den spezifischen elektrischen Energiebedarf $W_{\mathrm{el\,spez}}$ auf die Abstichmasse m_{A}, während in Adams' Modell nach [Adams 02] der gesamte Energiebedarf $W_{\mathrm{ges\,spez}}$ im Verhältnis zur Masse des metallischen Einsatzes m_{Met} gemäß Gleichung (3.2) beschrieben wird:

$$\begin{aligned} W_{\mathrm{el\,spez}} &= 375\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}} + 400\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\left(\frac{m_{\mathrm{Met}}}{m_{\mathrm{A}}} - 1\right) + 1000\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{Zu}}}{m_{\mathrm{A}}} + 0{,}3\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t\,°C}}\left(T_{\mathrm{A}} - 1600\,°\mathrm{C}\right) \\ &\quad + 1{,}0\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t\,min}}\left(t_{\mathrm{S}} + t_{\mathrm{N}}\right) - 8\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}V_{\mathrm{Gas\,spez}} - 4{,}3\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}V_{\mathrm{O2L\,spez}} - 2{,}8\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}V_{\mathrm{O2N\,spez}} \\ &\quad + 80\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{DRI/HBI}}}{m_{\mathrm{A}}} - 350\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{Roh\,fl}}}{m_{\mathrm{A}}} - 50\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{Schrott\,shr}}}{m_{\mathrm{A}}} \\ &\quad - p_{\mathrm{Ofen\,spez}}\left(W_{\mathrm{kühl\,spez}} - W_{\mathrm{kühlmittel\,spez}}\right), \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned} W_{\mathrm{ges\,spez}} &= W_{\mathrm{el\,spez}} + 110\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{Roh\,fe}}}{m_{\mathrm{Met}}} - 100\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{DRI/HBI}}}{m_{\mathrm{Met}}} + 450\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}\frac{m_{\mathrm{Roh\,fl}}}{m_{\mathrm{Met}}} \\ &\quad + 10{,}5\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}V_{\mathrm{Gas\,spez}} + 11\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{l}}V_{\mathrm{Öl\,spez}} + 8\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{l}}V_{\mathrm{LPG\,spez}} \\ &\quad + 5{,}2\,\tfrac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}\left(V_{\mathrm{O2\,spez}} - 2{,}0V_{\mathrm{Gas\,spez}} - 2{,}0V_{\mathrm{Öl\,spez}} - 1{,}5V_{\mathrm{LPG\,spez}}\right). \end{aligned} \tag{3.2}$$

Tabelle 3.1: Einflussparameter und Formelzeichen der Energiemodelle von Köhle und Adams

$W_{ges\,spez}$	spez. Gesamtenergiebedarf in $\frac{kWh}{t}$	$p_{Ofen\,spez}$	spezifischer Ofenfaktor (0,2 – 0,4), dimensionslos
$W_{el\,spez}$	spez. elektrischer Energiebedarf in $\frac{kWh}{t}$	m_A	Abstichmasse in t
$W_{kühl\,spez}$	spez. Kühlenergie in $\frac{kWh}{t}$	m_{DRI}	Masse DRI in t
$W_{kühl\,mittel\,spez}$	mittlere spez. Kühlenergie in $\frac{kWh}{t}$	m_{HBI}	Masse HBI in t
$V_{Gas\,spez}$	spez. Erdgaseintrag in $\frac{m^3}{t}$	m_{Met}	Masse metallischer Einsatz in t
$V_{LPG\,spez}$	spez. Flüssiggaseinsatz in $\frac{l}{t}$	$m_{Roh\,fl}$	Masse flüssiges Roheisen in t
$V_{Öl\,spez}$	spez. Öleinsatz in $\frac{l}{t}$	$m_{Roh\,fe}$	Masse festes Roheisen in t
$V_{O2\,spez}$	spez. Sauerstoffeintrag in $\frac{m^3}{t}$	$m_{Schrott\,shr}$	Masse Shredder-Schrott in t
$V_{O2N\,spez}$	spez. Sauerstoffeintrag zur Nachverbrennung in $\frac{m^3}{t}$	m_{Zu}	Masse Zuschlagstoffe in t
		T_A	Abstichtemperatur in °C
		t_S	Stromflusszeit in min
$V_{O2L\,spez}$	spez. Sauerstoffeintrag über Lanzen in $\frac{m^3}{t}$	t_N	Nebenzeit in min

Beide Modelle sind grundsätzlich sowohl für Drehstrom- als auch für Gleichstrom-Elektrolichtbogenöfen einsetzbar. Die Bestimmung der Parameter erfolgt jeweils mit Hilfe der Regressionsrechnung über eine Datenbasis von mehreren Elektrolichtbogenöfen und einer großen Anzahl Einzelschmelzen.

In der Anwendung stellt Kirschen in [Kirschen 07a] fest, dass aufgrund dieser großen Datenbasis die Modelle zur Vorhersage der mittleren zu erwartenden Energieverbräuche einzelner Öfen gut geeignet sind, die Prognose für einzelne Chargen dagegen auf dieser Basis jedoch kaum möglich erscheint. Dieses Ergebnis entspricht der grundsätzlichen Intention dieser Modellbildung, da hier zur betrieblichen Optimierung des Gesamtprozesses weniger die Betrachtung einzelner Chargen, sondern vielmehr die durch bestimmte Maßnahmen erreichbare mittlere Verbesserung der Energieeffizienz und der Produktivität im Vordergrund stehen. Die Modelle repräsentieren damit die aus den Betriebsergebnissen etlicher Werke gemittelten Erfahrungswerte.

Eine auf einzelne Stahlwerke spezialisierte Modellierung stellt Sandberg mit der Auswertung von Betriebsdaten einer Reihe von Einzelstahlwerken vor, die es ermöglicht, eine für das jeweilige Stahlwerk zugeschnittene Parametrierung des Regressionsmodells zu erhalten. Damit gelingt die Prognose der prozesstechnisch relevanten Kenngrößen Abstichzusammensetzung, metallische Ausbeute und elektrischer Energiebedarf auch für Einzelchargen des betreffenden Stahlwerkes recht gut [Sandberg 05].

Beim Vergleich der empirisch mittels linearer Regression parametrierten Modelle mit der thermodynamischen Prozessanalyse der zugrunde liegenden Vorgänge im Elektrolichtbogenofen bestätigt Kirschen die Größenordnungen der einzelnen Parameter [Kirschen 07a]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass diese vergleichsweise einfache lineare Modellierung die Thermodynamik im für den normalen Schmelzbetrieb relevanten Bereich richtig beschreibt, ohne dass dazu die einzelnen Wärme- Massen- und Energieströme im Detail betrachtet werden müssen.

Für die in dieser Arbeit anzustrebende Modellbildung erscheint daher ebenfalls eine auf Regression basierende Vorgehensweise sinnvoll. Die große Anzahl der in den vorhandenen Modellen enthaltenen Einflussgrößen bedeutet jedoch einen nicht zu vernachlässigenden re-

chentechnischen Aufwand. Erschwerend kommt hinzu, dass die benötigten Größen zum Teil nur in sehr großen Abtastintervallen oder gar nicht als Messwerte zur Verfügung stehen. Weiterhin werden einige Größen, wie z.B. die Abstichtemperatur, nur einmalig am Ende der jeweiligen Charge bestimmt, so dass diese zur vorausschauenden Prognose nicht herangezogen werden können. Im Folgenden wird daher ein Regressionsmodell auf Basis der Prozessgrößen hergeleitet und verifiziert, die in dem in dieser Arbeit betrachteten Stahlwerk während des Chargenverlaufs regelmäßig bestimmt werden.

3.2 Anwendungsoptimiertes Modell

3.2.1 Annahmen

Das in dieser Arbeit zur Prognose des elektrischen Energiebedarfs einzelner Chargen entwickelte mathematische Modell basiert auf der Annahme, dass die eingesetzten Mengen an Schrott und DRI die wesentlichen Einflussgrößen sind. Diese Vereinfachung lässt sich aus den vorgestellten deutlich umfangreicheren empirischen Modellen ableiten, da die für diese Größen in diesen Modellen enthaltenen Parameter mit 80 $\frac{kWh}{t}$ und mehr die mit Abstand größten Werte aufweisen.

Weiterhin wird, in Ermangelung entsprechender Messwerte, angenommen, dass der zwischen einzelnen Chargen im Ofen verbleibende Rest flüssigen Stahls, der so genannte Flüssigsumpf, immer annähernd dieselbe Masse besitzt und darüber hinaus auch keine elektrische Energie benötigt, da er bereits in flüssiger Phase vorliegt.

Von einer Berücksichtigung der eingesetzten Zusammenstellung der unterschiedlichen Schrottsorten wird ebenfalls abgesehen, weil hierzu eine große Menge an Daten sowie die Bestimmung etlicher unterschiedlicher Modellparameter in Abhängigkeit von der jeweils vorliegenden Schrottgüte erfolgen müsste. Gleichzeitig ist nicht davon auszugehen, dass die Einbeziehung des Schrottmixes in die Modellbildung zu einer verbesserten Prognosegenauigkeit führt, da dieser zumindest in dem nachgewiesenermaßen gut zutreffenden empirischen Modell von Adams ebenso wenig berücksichtigt wird. Allein die Aufteilung des Schrotteinsatzes anhand der Stückgrößen in schweren Schrott und Shredderschrott bietet hier entsprechend Köhles Modell einen Ansatzpunkt, der jedoch in dieser Arbeit in Ermangelung diesbezüglicher Messgrößen nicht weiter verfolgt werden kann.

Eine weitere Annahme betrifft die Energie, die durch Erdgasbrenner, die Zugabe von Sauerstoff sowie durch chemische Reaktionen in der Schlacke in die Schmelze eingebracht wird. Obwohl diese Energieströme in den empirischen Modellen einbezogen werden und damit einen nachweisbaren Einfluss auf den elektrischen Energiebedarf haben, erfolgt bei der Modellierung in dieser Arbeit keine Berücksichtigung. Es wird davon ausgegangen, dass die eingebrachte chemische Energie und die Verbrennungsenergie bei vergleichbaren Chargen in ähnlichen Wertebereichen anzusiedeln sind, so dass die empirisch zu ermittelnden Parameter für den elektrischen Energiebedarf implizit auch die Reduktion dieses Energiebedarfs um die Wirkung der weiteren Energieträger enthalten werden. Durch diese Vorgehensweise wird die Anzahl der im anwendungsoptimierten Modell zu berücksichtigenden Einflussparameter möglichst gering gehalten.

Die Problematik bezüglich der Einbeziehung der Abstichtemperatur wurde zuvor bereits angedeutet. Da die tatsächliche Temperatur erst im Moment des Abstichs genau gemessen wird, kann während der Laufzeit der Charge höchstens von einer angestrebten Abstichtemperatur ausgegangen werden, die sich in die Berechnung mit einbeziehen ließe. Bei einer

auf linearer Regression beruhenden Bestimmung der Modellparameter wird jedoch implizit von einer immer gleichen bzw. ähnlichen Abstichtemperatur ausgegangen, so dass hier von einer darüber hinausgehenden Berücksichtigung dieser angestrebten Temperatur als eigenständige Modelleinflussgröße im Sinne eines möglichst kompakten Modells abgesehen wird. Da die typische Variation des Energiebedarfs bei einer Änderung der Abstichtemperatur um ±10 °C nur etwa ±3 $\frac{\text{kWh}}{\text{t}}$ beträgt [Kirschen 07a], ist der durch diese Vereinfachung zu erwartende Verlust an Prognosegenauigkeit vernachlässigbar.

Unter Einbeziehung der vorgenannten Annahmen nimmt das mittels linearer Regression anzupassende Prozessmodell zur Prognose des elektrischen Energiebedarfs $\tilde{W}_{\text{elges1}}$ die Form

$$\tilde{W}_{\text{elges1}} = a_1 m_{\text{Schrott}} + b_1 \tilde{m}_{\text{DRI}} \tag{3.3}$$

an, wobei die Parameter a_1 und b_1 jeweils den spezifischen elektrischen Energiebedarf der eingesetzten Schrott- bzw. DRI-Masse (m_{Schrott} bzw. $\tilde{m}_{\text{DRI}}$) darstellen. Da die gesamte, in die Schmelze zu fördernde DRI-Masse bei Schmelzbeginn noch nicht bekannt ist, wird diese als Schätzwert $\tilde{m}_{\text{DRI}}$ in die Gleichung eingesetzt. Auf eine Konstante in der linearen Modellgleichung wird verzichtet, da diese einen grundsätzlichen, also von den Einsatzmengen unabhängigen, Energiebedarf repräsentieren würde, auf den die zugrunde liegenden Prozessvorgänge jedoch nicht hinweisen.
Um von der Prognose des elektrischen Energiebedarfs weiter auf eine Prognose der für die aktuelle Schmelze noch verbleibenden Stromflusszeit Δt_{s1} zu schließen, wird die in Kapitel 2.1.2 hergeleitete Abschätzung der zu erwartenden elektrischen Wirkleistungsaufnahme des Lichtbogenofens herangezogen und über den Zusammenhang $W = P \cdot t$ in Gleichung (3.3) eingesetzt:

$$\Delta t_{\text{s1}} = \frac{a_1 m_{\text{Schrott}} + b_1 \tilde{m}_{\text{DRI}}}{\tilde{P}_{\text{elEAF}}}. \tag{3.4}$$

Diese Gleichung beschreibt die gesamte zu erwartende Stromflusszeit einer beliebigen Charge zu Schmelzbeginn. Mit voranschreitender Stromflusszeit muss die bis zu dem aktuellen Zeitpunkt *t* bereits eingebrachte elektrische Energie berücksichtigt und von dem gesamten erwarteten elektrischen Energiebedarf subtrahiert werden. Gleichung (3.3) ist daher um diesen Term zu erweitern, der sich als Integral des Wirkleistungsaufnahme-Verlaufs $P_{\text{elEAF}}(t)$ seit Schmelzbeginn berechnen lässt. Damit ergeben sich der zeitabhängige verbleibende Energiebedarf $\Delta W_{\text{elges1}}(t)$ zu

$$\Delta W_{\text{elges1}}(t) = a_1 m_{\text{Schrott}} + b_1 \tilde{m}_{\text{DRI}} - \int_0^t P_{\text{elEAF}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{3.5}$$

und die zeitabhängige verbleibende Stromflusszeit $\Delta t_{\text{s1}}(t)$ zu

$$\Delta t_{\text{s1}}(t) = \frac{a_1 m_{\text{Schrott}}(t) + b_1 \tilde{m}_{\text{DRI}}(t) - \int_0^t P_{\text{elEAF}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau}{\tilde{P}_{\text{elEAF}}}. \tag{3.6}$$

Hierbei ist zu beachten, dass zu Beginn der Schmelze bestenfalls die für die betreffende Charge eingesetzte gesamte Schrottmasse bereits bekannt ist, dies jedoch nur im Falle von Einkorbchargen. Ob und wie viele Schrottkörbe im weiteren Schmelzverlauf noch nachchargiert werden, ist bei Schmelzbeginn anhand der vorliegenden Prozessdaten noch nicht bekannt. Ebenso wenig ist die genaue Einsatzmenge an DRI zu diesem Zeitpunkt bereits festgelegt, da dieses während der Flachbadphase kontinuierlich zugeführt wird und die absolute Menge im Verlauf der Schmelze u.a. in Abhängigkeit von den sich ergebenden Vorgängen in der Schlacke, der zu erzielenden Abstichtemperatur und der gewünschten Stahlqualität beim Abstich noch angepasst werden muss.
Dies erschwert eine Prognose des zu erwartenden elektrischen Energiebedarfs für die Schmelze und damit auch die Abschätzung der noch verbleibenden Stromflusszeit gemäß Gleichung (3.6). Abhilfe wird geschaffen, indem die Größen m_{Schrott} und $\tilde{m}_{\text{DRI}}$ im Modell als zeitabhängig eingetragen werden. So ist es möglich, die Prognose während der Schmelze an die jeweils aktuellen Masseneinsätze anzupassen, beispielsweise wenn ein weiterer Schrottkorb eingesetzt wird.
Die vom Schmelzfortschritt abhängige Anpassung des im Modell eingesetzten Schätzwertes für $\tilde{m}_{\text{DRI}}$ kann aufgrund der kontinuierlichen Förderung nicht anhand von Körben oder anderen festgelegten Stückelungen erfolgen. Bei Schmelzbeginn wird daher zunächst ein Erwartungswert in die Modellgleichung eingesetzt, der sich wie auch schon bei den Leistungs-Erwartungswerten aus vergangenen Werten abschätzen lässt. Hier wird ebenfalls eine exponentielle Mittelung der Einsatzmengen der vergangenen Chargen derselben Art durchgeführt und dem Modell für Null- bis Dreikorbchargen jeweils ein solcher DRI-Einsatzmengen-Erwartungswert hinterlegt. Dies stellt sich als eine gute Abschätzungsmethode zur Prognose der verbleibenden Stromflusszeit bei Schmelzbeginn dar.
Da im hier betrachteten Stahlwerk in jede Schmelze auch DRI eingesetzt wird, lässt sich eine weitere Verbesserung der Prognosegenauigkeit zum Ende der Schmelze hin mit Hilfe der Beobachtung der DRI-Zufuhrrate realisieren. Messungen zeigen, dass diese Zufuhrrate kurz vor Abstich mit dem Beginn des Warmfahrens der Schmelze auf die zu erzielende Abstichtemperatur unter einen Wert von 1,5 $\frac{\text{t}}{\text{min}}$ absinkt. Mit der Detektion dieses Rückganges zum Zeitpunkt $t_{\text{DRIRück}}$ kann daher der im Modell eingesetzte Wert für die Eisenschwammmenge aktualisiert und auf die bis dahin bereits im Ofen befindliche Menge plus einen für das Warmfahren noch abzuschätzenden Erwartungswert $\tilde{m}_{\text{DRIWarmfahren}}$ gesetzt werden. Dieser neue Erwartungswert wird ebenfalls durch exponentielle Mittelung aus vergangenen Schmelzen bestimmt. Es ist davon auszugehen, dass die Abweichung dieses neuen Erwartungswertes von der tatsächlich noch hinzukommenden DRI-Menge im Allgemeinen geringer ist als die Abweichung des Erwartungswertes vom tatsächlichen Wert für die gesamte DRI-Menge bei Schmelzbeginn. Somit erscheint mit dieser neuerlichen Schätzung beim Auftreten des Rückganges der DRI-Zufuhrrate eine weitaus bessere Prognose der verbleibenden Stromflusszeit möglich.
Weiterhin erlaubt die Detektion des charakteristischen Rückganges in der DRI-Zufuhrrate die Formulierung zweier weiterer Modelle, die im Gegensatz zu dem Modell in Gleichung (3.3) die Gesamteinsatzmenge nicht in die Anteile Schrott und DRI aufteilen, sondern in den Anteil des Einsatzes an Schrott und DRI, der sich zum Zeitpunkt der Detektion bereits im Ofen befindet ($m_{\text{Schrott+DRI}}$) und die DRI-Menge, die während des Warmfahrens noch hinzu kommt:

$$\tilde{W}_{\text{elges2}} = a_2\, m_{\text{Schrott+DRI}}(t_{\text{DRIRück}}) + b_2\, \tilde{m}_{\text{DRIWarmfahren}} \,. \tag{3.7}$$

Darüber hinaus lässt sich der lineare Zusammenhang zwischen Einsatzmengen und elektrischem Energiebedarf nicht nur in Bezug auf die gesamte für die Schmelze benötigte elektrische Energie, sondern auch auf die zum Warmfahren erforderliche Energie $\tilde{W}_{\mathrm{elWarmfahren}}$ ausdrücken:

$$\tilde{W}_{\mathrm{elWarmfahren}} = a_3\, m_{\mathrm{Schrott+DRI}}(t_{\mathrm{DRIRück}}) + b_3\, \tilde{m}_{\mathrm{DRIWarmfahren}}\,. \tag{3.8}$$

Die Gültigkeit der Modelle in den Gleichungen (3.7) und (3.8) lässt sich damit untermauern, dass zum Ende des Schmelzprozesses hin nicht mehr die unterschiedlichen Eigenschaften von Schrott und Eisenschwamm den jeweiligen spezifischen Energiebedarf maßgeblich beeinflussen, sondern die vorliegenden unterschiedlichen Zustände der Einsatzanteile. Es kann davon ausgegangen werden, dass die bis zum Zeitpunkt des charakteristischen Rückganges der Eisenschwamm-Zufuhrrate in den Ofen eingesetzte Masse bereits verflüssigt ist, während der noch hinzukommende DRI-Anteil in fester Phase vorliegt. Es sollten sich hier deshalb deutlich unterschiedliche spezifische Energiebedarfs-Koeffizienten ergeben, da der Energiebedarf für das Aufheizen bereits flüssigen Einsatzes auf die Abstichtemperatur als wesentlich geringer anzunehmen ist als derjenige für das Aufschmelzen und Warmfahren des noch festen Anteils. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass der ausschließlich für die Aufheizphase erforderliche elektrische Energiebedarf ebenso wie der gesamte Bedarf in linearem Zusammenhang mit den Einsatzmengen steht.
Anhand der Modellgleichungen (3.7) und (3.8) ergeben sich damit neben dem mit aktualisierten Werten für die Größen m_{Schrott} und $\tilde{m}_{\mathrm{DRI}}$ versehenen Modell gemäß den Gleichungen (3.5) und (3.6) ab dem Zeitpunkt, zu dem der Abfall der DRI-Zufuhrrate unter 1,5 $\frac{\mathrm{t}}{\mathrm{min}}$ registriert wird, die folgenden Abschätzungsmöglichkeiten $\Delta W_{\mathrm{elges2}}(t)$ und $\Delta W_{\mathrm{elWarmfahren}}(t)$ für den verbleibenden Energiebedarf sowie $\Delta t_{\mathrm{s2}}(t)$ und $\Delta t_{\mathrm{s3}}(t)$ für die verbleibende Stromflusszeit:

$$\Delta W_{\mathrm{elges2}}(t) = a_2\, m_{\mathrm{Schrott+DRI}}(t_{\mathrm{DRI\,Rück}}) + b_2\, \tilde{m}_{\mathrm{DRIWarmfahren}}(t) - \int_0^t P_{\mathrm{elEAF}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau\,, \tag{3.9}$$

$$\Delta t_{\mathrm{s2}}(t) = \frac{a_2\, m_{\mathrm{Schrott+DRI}}(t_{\mathrm{DRI\,Rück}}) + b_2\, \tilde{m}_{\mathrm{DRIWarmfahren}}(t) - \int_0^t P_{\mathrm{elEAF}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau}{\tilde{P}_{\mathrm{elEAF}}}\,, \tag{3.10}$$

$$\Delta W_{\mathrm{elWarmfahren}}(t) = a_3\, m_{\mathrm{Schrott+DRI}}(t_{\mathrm{DRI\,Rück}}) + b_3\, \tilde{m}_{\mathrm{DRIWarmfahren}}(t) - \int_{t_{\mathrm{DRIRück}}}^t P_{\mathrm{elEAF}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau\,, \tag{3.11}$$

$$\Delta t_{\mathrm{s3}}(t) = \frac{a_3\, m_{\mathrm{Schrott+DRI}}(t_{\mathrm{DRI\,Rück}}) + b_3\, \tilde{m}_{\mathrm{DRIWarmfahren}}(t) - \int_{t_{\mathrm{DRIRück}}}^t P_{\mathrm{elEAF}}(\tau)\,\mathrm{d}\tau}{\tilde{P}_{\mathrm{elEAF}}}\,. \tag{3.12}$$

Die Auswahl des bzw. der am besten zur Prognose geeigneten Modells bzw. Modelle erfolgt in den weiteren Kapiteln anhand der Parameter-Bestimmung und der Verifikation der Modelle mit Hilfe von Messdaten.

Allen Modellen gemeinsam ist, dass sich durch die Aktualisierungen der Schrotteinsatzmenge beim Chargieren weiterer Körbe und des Erwartungswertes für die Eisenschwammenge in Abhängigkeit von der Beobachtung der Zufuhrrate Sprünge im Verlauf der erwarteten verbleibenden Stromflusszeit ergeben können. Diese erscheinen jedoch im Hinblick auf die Zielsetzung der Prognose vertretbar. In erster Linie ist es von Bedeutung, abzuschätzen, ob in der aktuellen Bezugsperiode mit dem Abstich des Schmelzofens zu rechnen ist, wie in Kapitel 2.1.2 bereits erwähnt wird. Mit Hilfe der beschriebenen Modellierungen scheint es in jedem Fall möglich, diese Abschätzung zu treffen, auch wenn sich während des Schmelzverlaufes ggf. noch Änderungen in der prognostizierten Restzeit ergeben. Es ist davon auszugehen, dass zu Beginn der Schmelze auch bei Werten für m_{Schrott} und $\tilde{m}_{\text{DRI}}$, die nicht exakt die tatsächlichen Einsatzmengen widerspiegeln, eine restliche Stromflusszeit von mehr als 15 min prognostiziert wird. Daher kann der für die aktuelle Viertelstunde für den Lichtbogenofen einzuplanende Energiebedarf anhand der verbleibenden Zeit bis zur nächsten Bezugsperiode berechnet werden, so dass damit der genaue Abstichzeitpunkt noch keine Rolle spielt. Je näher die Schmelze dem Abstich kommt, desto wichtiger wird jedoch die genaue Prognose der verbleibenden Stromflusszeit, da hier der Fall, dass der Abstich in die aktuelle Viertelstunde fällt, immer wahrscheinlicher wird. Somit ist es nun erforderlich, den elektrischen Energiebedarf des Lichtbogenofens für diese Bezugsperiode nicht bis zum Ende der Periode zu berechnen, sondern nur bis zum Abstichzeitpunkt.
Mit Hilfe der aufgezeigten Beobachtung der DRI-Zufuhrrate wird erreicht, dass die Prognose mit dem Schmelzfortschritt durch die besser werdende Anpassung an die in der jeweiligen Einzelcharge auftretenden Besonderheiten immer genauer wird und somit am Ende, d.h. bei Abstich, die besten Ergebnisse erzielt. Dies ist als die wesentliche Neuerung des in dieser Arbeit entwickelten Prognosemodells im Vergleich zu den bisher vorhandenen Energiemodellen zu sehen. Es ist nun möglich, Prognosen auch für Einzelchargen im Verlauf adäquat anzupassen und zu berechnen, während bisher eine im Mittel gut zutreffende Prognose des zu erwartenden elektrischen Energiebedarfs im Vordergrund stand.
Die folgenden Unterkapitel erläutern die Anpassung des Modells an den in dieser Arbeit betrachteten Elektrolichtbogenofen und zeigen die erreichbare Prognosegenauigkeit anhand von Messdaten auf.

3.2.2 Bestimmung der Modellparameter und Modelldiagnose

Die Bestimmung der Modellparameter erfolgt mittels linearer Regression aus neun Messkampagnen, die über einen Zeitraum von knapp einem Jahr aufgezeichnet werden und jeweils zwischen 44 und 417 Einzelchargen enthalten. Diese Messdaten werden um diejenigen Einzelchargen bereinigt, in deren Verlauf offensichtlich außergewöhnliche Verläufe auftreten, wie z.B. ungewöhnlich lange Stillstände oder offensichtliche Fehler in der Datenübertragung. Es verbleibt eine Datenbasis von 1779 Chargen, auf denen die folgenden Auswertungen beruhen. Die Modellparameter werden für jede Chargenart gesondert berechnet, wobei aus der Datenbasis 188 Datensätze auf Nullkorb-, 1081 auf Einkorb-, 478 auf Zweikorb- und 32 auf Dreikorbchargen entfallen.
Zur Diagnose der Modellgleichungen wird zunächst das Bestimmtheitsmaß R^2 als Quotient der Variation der Residuen und der Variation der Regresswerte berechnet. Dieser Wert kann je nach Güte des Regressionsmodells zwischen Null und Eins liegen. Im ersten Fall ist davon auszugehen, dass kein Zusammenhang zwischen dem identifizierten Modell und den beobachteten Messwerten besteht und im zweiten Fall beschreibt das Modell die Messung

vollständig. Da Bestimmtheitsmaße nahe Eins sich auch dann ergeben können, wenn der Zusammenhang zwischen Modell und Beobachtung nur zufällig ist, werden die Ergebnisse der Regressionsanalyse zusätzlich durch Heranziehen der Methoden des F-Tests und des t-Tests beurteilt. Diese Tests basieren ebenso wie einige der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Verfahren auf der Berechnung einer Teststatistik aus den vorhandenen Messdaten und der daraus bestimmten Parameterwerte. Zielsetzung des F-Tests bei der Regressionsanalyse ist dabei die Feststellung, ob das gewählte Regressionsmodell als Ganzes zu einem gewissen Konfidenzniveau den Zusammenhang, auf dem die beobachteten Messdaten beruhen, richtig beschreibt. Der t-Test wird verwendet, um die einzelnen im Regressionsmodell angenommenen Einflussgrößen auf ihre Signifikanz zur Berechnung von Schätzwerten anhand eben dieses Modells zu prüfen, d.h. ob die gesuchte Ausgangsgröße des Modells von der jeweiligen Einflussgröße abhängt oder unabhängig davon ist. Im letzteren Fall würde die entsprechende Einflussgröße in der Modellgleichung nicht benötigt [Fahrmeir 07].
Die folgende Auswertung erfolgt mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel 2003, das die zur Regressionsanalyse erforderlichen Funktionen bereitstellt und auch die Teststatistiken sowohl für den F- als auch für den t-Test als Ausgabewerte liefert. Die Überprüfung der Hypothesen, das Modell sei gültig und alle Parameter werden benötigt, erfolgt über den Vergleich mit den entsprechenden Quantilen aus der F- und der t-Verteilung jeweils zum Konfidenzniveau von 95 %. Die sich so für die Teststatistiken ergebenden Grenzwerte sind abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade und damit auch von der Anzahl der einbezogenen Messpunkte n und der Anzahl der verwendeten Regressionsvariablen k. Für den F-Test werden die Freiheitsgrade $m_1 = k$ und $m_2 = n - k$ benötigt und für den t-Test der Freiheitsgrad $m = n - k$. Daher ergeben sich für jede Messkampagne und Chargenart aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Messpunkten, hier der Einzelchargen, andere Grenzwerte. Bei den Regressionsmodellen für die Nullkorbchargen ist dabei noch zu beachten, dass hier kein Schrotteinsatz erfolgt und die entsprechende Einflussgröße m_{Schrott} daher aus dem jeweiligen Modell zu eliminieren ist. Bei diesen Chargen erfolgt die Modellierung deshalb ausschließlich über den angenommenen linearen Zusammenhang zwischen der eingesetzten DRI-Menge und dem dazugehörigen elektrischen Energiebedarf, so dass die Anzahl der Regressionsvariablen hier um Eins niedriger ist als bei den übrigen Modellen für die Chargen mit Schrotteinsatz. Dies ist bei der Ermittlung der jeweiligen Grenzwerte für den F- und t-Test zu berücksichtigen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die auftretenden Unterschiede marginal sind, da die Grenzwerte sich bei hoher Anzahl von Freiheitsgraden bei gleichbleibendem Konfidenzniveau nur noch wenig ändern.
Tabelle 3.2 zeigt exemplarisch die für die Einkorbchargen ermittelten Parameterwerte aller neun Messkampagnen. Die Modellnummern 1 bis 3 kennzeichnen dabei die Regressionsmodelle entsprechend den Gleichungen (3.3), (3.7) und (3.8). Die ermittelten spezifischen Energiebedarfskoeffizienten entsprechen in ihrer Größenordnung den Parameterwerten der etablierten Energiemodelle. Weiterhin kann festgestellt werden, dass sich auch für verschiedene Messkampagnen, die mit einer zeitlichen Verzögerung von bis zu einem Jahr aufgezeichnet werden, stets vergleichbare Werte ergeben, was einerseits auf die Reproduzierbarkeit des zugrunde liegenden Schmelzprozesses und andererseits auf die Stabilität des Modells schließen lässt. Beim Modell 3 ist auffällig, dass die Koeffizienten a_3 für die zum Zeitpunkt des charakteristischen Abfalls der Eisenschwamm-Zufuhrrate bereits im Ofen befindliche Masse sehr viel kleiner sind als diejenigen für die während des Warmfahrens noch geförderten DRI-Menge. Dies entspricht den in Kapitel 3.2.1 getätigten Annahmen, dass die bereits flüssige Masse kaum noch elektrische Energie zum Erreichen der Abstichtemperatur

benötigt, während der Energiebedarf b_3 für den noch festen Eisenschwamm relativ hoch ausfällt. Dieser Effekt ist bei den weiteren Chargenarten ebenfalls zu beobachten und zeigt bei den Nullkorbchargen die extremste Ausprägung. Der Grund für diese hohen Energiebedarfswerte besteht darin, dass die elektrische Energieeinbringung in den letzten Minuten der jeweiligen Charge wegen der bereits zusammengefallenen bzw. abgelassenen Schaumschlacke bei vergleichsweise hohen Abwärmeverlusten erfolgt. Auf diesen Zusammenhang wird in Kapitel 4.4 näher eingegangen.

Tabelle 3.2: Parameterwerte der Regressionsmodelle für Einkorbchargen über neun Messkampagnen

Messkampagne	Anzahl Chargen	Parameterwerte in $\frac{kWh}{t}$ für Modell					
		1		2		3	
		a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
1	111	416	455	439	500	22	494
2	106	373	513	452	507	27	519
3	152	493	466	475	485	31	464
4	110	393	527	464	575	31	487
5	177	483	480	476	564	26	524
6	142	498	450	468	454	25	451
7	184	493	455	467	537	25	539
8	29	435	485	469	367	17	504
9	70	464	475	467	590	18	733

Die Ergebnisse der Modelldiagnose für die oben stehenden Einkorbchargen-Modelle sind in **Tabelle 3.3** und **Tabelle 3.4** aufgeführt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 nimmt in allen Fällen Werte nahe Eins an, was im Folgenden veranschaulicht wird.

Tabelle 3.3: Bestimmtheitsmaße und F-Statistiken der Regressionsmodelle für Einkorbchargen über neun Messkampagnen

Messkampagne	Anzahl Chargen	R^2 für Modell			Grenzwert F-Statistik	F-Statistik für Modell		
		1	2	3		1	2	3
1	111	1,00	1,00	0,96	3,08	51040	53328	1172
2	106	1,00	1,00	0,95	3,08	15496	13402	990
3	152	1,00	1,00	0,94	3,06	54173	53551	1149
4	110	0,98	0,98	0,94	3,08	3352	3396	805
5	177	1,00	1,00	0,91	3,05	38368	41390	931
6	142	1,00	1,00	0,90	3,06	67771	63490	664
7	184	1,00	1,00	0,91	3,05	87409	84920	873
8	29	1,00	1,00	0,90	3,35	13110	12834	124
9	70	1,00	1,00	0,90	3,13	32255	33212	306

Tabelle 3.4: t-Statistiken der Regressionsmodelle für Einkorbchargen über neun Messkampagnen

Mess-kampagne	Anzahl Chargen	Grenzwert t-Statistik	t-Statistiken für Modell und Parameter					
			1		2		3	
			a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
1	111	1,98	25,6	51,8	263,7	23,3	16,7	29,7
2	106	1,98	19,4	38,6	124,8	15,4	13,0	27,4
3	152	1,98	43,5	69,8	240,4	37,5	13,0	29,6
4	110	1,98	8,3	20,0	49,3	13,2	7,0	23,6
5	177	1,97	27,4	44,6	221,8	25,1	13,6	26,0
6	142	1,98	51,0	80,6	283,5	24,5	13,1	21,2
7	184	1,97	65,5	92,6	289,8	16,8	16,0	17,4
8	29	2,05	18,6	32,4	120,0	4,0	5,9	7,3
9	70	2,00	32,2	63,6	136,5	7,5	5,1	9,2

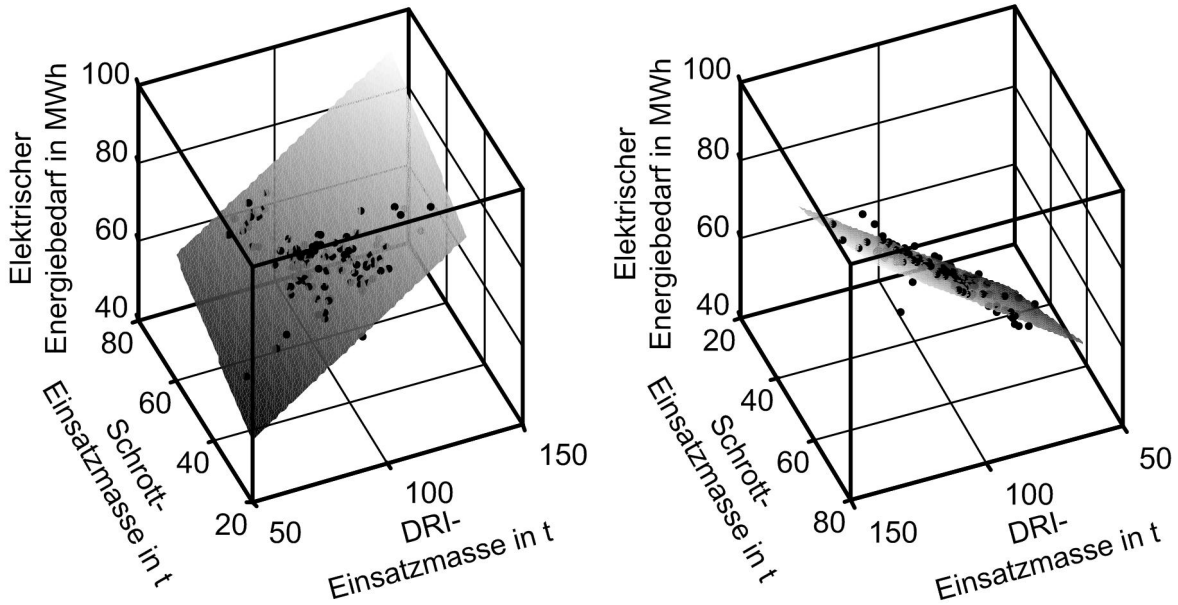


Bild 3.1: 3D-Darstellung der mit Modell 1 geschätzten und tatsächlich gemessenen elektrischen Energiebedarfswerte in Abhängigkeit von den Einsatzmassen für eine Einkorbchargen-Messkampagne, zwei Blickwinkel

Im dreidimensionalen Raum stellt die Modellgleichung eine Ebene dar, wobei die *x*- und *y*-Koordinaten durch die jeweiligen Einsatzmengen an Schrott und DRI bzw. die Gesamteinsatzmenge zum Zeitpunkt des Rückganges der DRI-Zufuhrrate und die während des Warmfahrens noch zugeführte DRI-Menge repräsentiert werden und die *z*-Koordinate durch den für die jeweilige Kombination modellierten elektrischen Energiebedarf. Dies ist in **Bild 3.1** für das Modell 1 und eine exemplarische Messkampagne dargestellt, wobei die Modellebene in Grauschattierungen und die tatsächlichen Messpunkte in Schwarz abgebildet sind. Die Modellebene läuft, unabhängig von den ermittelten spezifischen Energiebedarfskoeffizienten, immer durch den Ursprung, da im Modell auf eine Konstante verzichtet wird. In Bild 3.1 ist gut zu erkennen, dass die Messpunkte bis auf wenige Ausreißer in bzw. in unmittelbarer Nähe der Modellebene liegen. Dadurch werden die verbleibenden Residuen auf ein

Minimum reduziert, was gleichzeitig in einem sehr guten Bestimmtheitsmaß resultiert. Zur Überprüfung, ob dieses Ergebnis zufällig ist und ob die verwendeten Modellparameter tatsächlich signifikanten Einfluss besitzen, sind die weiteren Methoden zur Modelldiagnose anzuwenden, deren Ergebnisse ebenfalls in den oben genannten Tabellen aufgeführt sind.
Anhand der ermittelten F- und t-Statistiken kann in Übereinstimmung mit dem hohen Bestimmtheitsmaß gezeigt werden, dass die identifizierten Modellgleichungen und die aus den Messungen ermittelten Parameter den Prozess gut beschreiben. Alle Tests sind erfüllt, da alle Statistiken größer als die dazugehörigen Grenzwerte sind. Tendenziell werden für alle Chargenarten ähnlich gute Ergebnisse erzielt, allerdings fallen die Tests für die Datensätze mit wenigen Messpunkten, z.B. bei den Dreikorbchargen, weniger deutlich aus.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die in dieser Arbeit aufgestellten Modelle zur Beschreibung und Prognose des elektrischen Energiebedarfs trotz der im Vergleich zu den etablierten Modellen reduzierten Anzahl an Einflussgrößen sehr gute Ergebnisse liefern und als Basis für die weitere Prognose der verbleibenden Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens dienen können.
Die von der DRI-Zufuhrrate abhängige Aktualisierung der Einflussgrößen in den Modellgleichungen ist bei der zunächst durchgeführten nachträglichen Auswertung zur Bestimmung der Modellparameter und -güte recht einfach durchzuführen. Hier wird vom Ende der jeweiligen Charge aus betrachtet der erstmalige Anstieg der Zufuhrrate über den kritischen Wert von 1,5 $\frac{t}{min}$ gesucht und die entsprechenden Werte zu eben diesem Zeitpunkt zur weiteren Auswertung aus der Messwertedatei ausgelesen. Somit ist es hier problemlos möglich, denjenigen Moment sicher zu erkennen, zu dem das Warmfahren tatsächlich beginnt. Während der zugrunde gelegten Messungen treten jedoch wiederholt Fälle auf, in denen die Eisenschwamm-Förderrate stark schwankt. Somit ergeben sich hier mehrere charakteristische Rückgänge in der DRI-Förderrate, von denen jedoch nur der letzte der gesuchte ist, welcher den Beginn der Aufheizphase kennzeichnet. Dadurch wird eine Erkennung eben dieses Zeitpunktes ohne vorheriges Wissen über den weiteren Chargenverlauf während der Laufzeit im Vergleich zur nachträglichen Auswertung deutlich erschwert. Dieser Problemstellung ist im Folgenden zu begegnen.

3.2.3 Adaption der Modellparameter

Die mit den identifizierten Modellen erreichbare Prognosegenauigkeit hängt neben der Form des jeweiligen Modells im Wesentlichen von den eingesetzten Parameterwerten ab. In der vorangegangenen Auswertung erfolgt die Bestimmung dieser Werte unmittelbar anhand der vorliegenden Messwerte, so dass hier die bestmögliche Anpassung des Modells mit Hilfe entsprechender Parameter erreicht werden kann.
Im laufenden Betrieb des zu entwickelnden Lastkontrollsystems ist jedoch davon auszugehen, dass die spezifischen Energiebedarfskoeffizienten und auch die mittleren eingesetzten Massen nicht konstant bleiben, sondern langfristigen Änderungen unterworfen sind. Diese können sich z.B. durch Variation der eingesetzten Schrottqualität, ein verändertes Produktionsprogramm, Vergrößerung oder Verringerung des chemischen Energieeinsatzes oder allgemein durch Verschleiß am Gesamtsystem des Elektrolichtbogenofens ergeben. Damit würden die an einen in der Vergangenheit gemessenen Datensatz angepassten Parameterwerte nicht mehr zu einer optimalen Prognose des zu erwartenden Energiebedarfs und damit der geschätzten verbleibenden Stromflusszeit führen. Um die Prognosegenauigkeit für den

Langzeiteinsatz des Lastkontrollsystems dennoch auf möglichst hohem Niveau konstant zu halten, erscheint die Anpassung bzw. Adaption der verwendeten Parameterwerte an die jeweils aktuellen Systembedingungen unabdingbar.

Adaptiert werden müssen daher neben den Energiebedarfskoeffizienten ($a_n, b_n, n \in \{1;2;3\}$) auch die Erwartungswerte $\tilde{m}$ für die eingesetzten Massen. Im einzelnen sind dies ein Schätzwert $\tilde{m}_{\text{DRI Warmfahren}}$ für die nach Detektion des Abfalls der DRI-Zufuhrrate noch eingesetzte Eisenschwammmasse, der wie beschrieben für die genauere Prognose zum Abstich hin ab diesem Moment verwendet wird, sowie ein erwarteter Wert $\tilde{m}_{\text{ges}}$ für die Gesamteinsatzmasse der Charge. Letzterer wird bei allen Chargenarten zur Bestimmung der geschätzten DRI-Einsatzmenge $\tilde{m}_{\text{DRI}}$ zu Beginn der Schmelze herangezogen, indem die Differenz zwischen erwartetem Gesamteinsatz und der zu diesem Zeitpunkt bereits bekannten Schrotteinsatzmasse m_{Schrott} gebildet wird. Da bei den Nullkorbchargen kein Schrotteinsatz erfolgt, ist der Erwartungswert für die Gesamteinsatzmasse hier gleichzeitig auch der Schätzwert für die DRI-Einsatzmasse.
Zur Adaption der Schätzwerte für die Einsatzmassen bietet es sich an, analog zu der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen exponentiellen Mittelwertbildung vorzugehen. Die Mittelung der Massenerwartungswerte erfolgt jedoch nicht einmal pro Zeitschritt, sondern einmalig für jede gemessene Charge. Dabei ist zu beachten, dass jede dieser Chargen eine unterschiedliche Dauer aufweist, so dass die zugehörige Mittelungsdauer daher nicht als Zeitspanne angegeben werden kann. Die Angabe bezieht sich vielmehr auf die Anzahl der einbezogenen Chargen. In Analogie zu Gleichung (2.2) werden die Gewichtungsfaktoren 0,9 und 0,1 gewählt, was gemäß Gleichung (2.7) einer Mittelung über knapp zehn Chargen entspricht, wenn T als eine Chargendauer angenommen wird. Damit ist einerseits eine schnelle Anpassung an sich verändernde Prozessbedingungen und Fahrweisen gewährleistet, wobei andererseits aufgrund des im Vergleich zur Mittelung der Leistungswerte deutlich höheren Gewichts der Einzelwerte hier besonders darauf zu achten ist, nur solche Werte in die Mittelung einzubeziehen, die plausibel erscheinen.
Zur Beurteilung der Plausibilität einzelner, während der Laufzeit auftretender Einsatzmassenwerte werden entsprechende Grenzwerte herangezogen, die anhand der nachträglichen Auswertung einer Reihe von Messkampagnen ermittelt werden. Daraus ergibt sich, dass für die Gesamteinsatzmasse $\tilde{m}_{\text{ges}}$ Werte zwischen 80 t und 220 t und für die in der Aufheizphase noch zugeführte DRI-Menge $\tilde{m}_{\text{DRI}}$ Werte kleiner als 15 t als plausibel anzunehmen sind. Werden während der Laufzeit Werte gemessen, die außerhalb dieser Grenzen liegen, so werden diese nicht in die Mittelung einbezogen und die Adaption wird erst bei der nächsten Charge weitergeführt, sofern die dazugehörigen Werte dann den Grenzwertbedingungen genügen.

Die Adaption der spezifischen Energiebedarfskoeffizienten $a_n, b_n, n \in \{1;2;3\}$ gestaltet sich schwieriger, da die in der betreffenden Charge aufgetretenen spezifischen Energieverbräuche sich nicht direkt als Messwert ablesen lassen, sondern mittels der entsprechenden Modellgleichungen ((3.3) (3.7) und (3.8)) zu bestimmen sind. Zu diesem Zweck wird bei der nachträglichen Auswertung die Regressionsrechnung herangezogen, da diese über die Menge der zugrunde gelegten Chargendaten die optimalen Modellparameter liefert. Soll die Adaption der Parameterwerte während der Laufzeit ebenfalls mit Hilfe der Regressionsrechnung erfolgen, so müsste dazu im Algorithmus eine Anzahl von Datenpunkten aus den jeweils zurückliegenden n Chargen vorgehalten werden. Damit wäre es möglich, nach Ablauf

jeder weiteren Charge, basierend auf den Daten der vorherigen *n* und der gerade beendeten Charge, durch erneute Regression die aktuellen Parameterwerte zu bestimmen. Diese Vorgehensweise muss jedoch als rechen- und speicherbedarfsintensiv eingeschätzt werden. Des Weiteren ist die Mindestanzahl *n* an Datensätzen so festzulegen, dass einerseits die Berechnung durch die Einbeziehung unnötig vieler Datenpunkte nicht zu komplex wird, andererseits jedoch ausreichend viele Punkte berücksichtigt werden, um verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Anhand der nachträglichen Auswertungen zeigt sich, dass *n* mindestens einen Wert von 20 haben sollte. Durch gelegentliche, stark vom durchschnittlichen Verlauf abweichende Chargendaten kann es bei dieser Stichprobengröße jedoch vorkommen, dass F- und t-Test nicht erfüllt sind und somit von einer Adaption abgesehen werden muss.
Im Folgenden werden Methoden vorgestellt, welche die Bestimmung der für die aktuelle Charge geltenden Energiebedarfskoeffizienten ohne Regressionsrechnung erlauben und somit den Speicher- und Rechenbedarf auf ein Maß reduzieren können, das die Berechnung und fortlaufende Adaption in Echtzeit erlaubt. Zur Evaluation dieser Methoden bietet sich ein Vergleich mit der auf den Werten der jeweils letzten 20 Chargen basierenden fortlaufenden Regressionsrechnung an, da diese aufgrund der theoretischen Grundlagen als gute Lösung anzusehen ist. Damit ist auch eine Möglichkeit zur Untersuchung der gefundenen Methoden im Hinblick auf ihre Eignung zur Beibehaltung einer möglichst guten Prognosegenauigkeit im Langzeiteinsatz des Systems gegeben.
Unabhängig von der verwendeten Methode zur Berechnung der gerade aktuellen Parameterwerte besteht die eigentliche Adaption darin, den zur Prognose der nächsten Energieverbräuche in der jeweiligen Modellgleichung hinterlegten Parameterwert durch exponentielle Mittelung seiner vorherigen Werte und dem für die aktuelle Charge neu bestimmten Wert gemäß Gleichung (2.2) zu aktualisieren. Die Gewichtungsfaktoren werden auch hier aus den selben Gründen wie für die Massenparameter zu 0,9 und 0,1 gesetzt.

Bei der Bestimmung der aktuellen Energiebedarfskoeffizienten aus den Messwerten nur einer einzigen, d.h. der jeweils aktuellen, Charge besteht die Schwierigkeit darin, dass sich für jedes der drei Modelle entsprechend ihrer Definition ((3.3) (3.7) und (3.8)) nur eine Gleichung ergibt, in welche die aktuellen Massen- und Energieverbrauchswerte eingesetzt werden können. Aus dieser einzelnen Gleichung zwei eindeutige Parameter zu bestimmen, ist mathematisch nicht möglich. Daher wird zunächst anhand der Messwerte der aktuellen Charge in zwei Schritten jeweils nur ein Koeffizient $a_{n\mathrm{neu}}$ bzw. $b_{n\mathrm{neu}}$ neu bestimmt und für den anderen der entsprechende vorherige Wert $b_{n\mathrm{alt}}$ bzw. $a_{n\mathrm{alt}}$ in die Modellgleichung eingesetzt, so dass sich Gleichungen der Form

$$\begin{aligned} & W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n} = a_{n\mathrm{neu}}\, m_{1\mathrm{gemessen}\,n} + b_{n\mathrm{alt}}\, m_{2\mathrm{gemessen}\,n} \\ & \Leftrightarrow \\ & a_{n\mathrm{neu}} = \frac{W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n} - b_{n\mathrm{alt}}\, m_{2\mathrm{gemessen}\,n}}{m_{1\mathrm{gemessen}\,n}} \end{aligned} \tag{3.13}$$

und

$$b_{n\mathrm{neu}} = \frac{W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n} - a_{n\mathrm{alt}}\, m_{1\mathrm{gemessen}\,n}}{m_{2\mathrm{gemessen}\,n}} \tag{3.14}$$

ergeben. Dabei ist für $W_{\mathrm{elgemessen}\,n}$ die für das jeweilige Modell *n* zugrunde gelegte elektrische Energiemenge einzusetzen und für $m_{1,2\mathrm{gemessen}\,n}$ sind die Massenanteile entsprechend der für dieses Modell geltenden Aufteilung der gesamten Einsatzmasse m_{ges} heranzuziehen, wobei $m_{\mathrm{ges}} = m_{1\mathrm{gemessen}\,n} + m_{2\mathrm{gemessen}\,n}$ gilt.
Im Langzeiteinsatz führt diese Methode dazu, dass die Parameter in unplausible Wertebereiche abdriften. **Bild 3.2** zeigt exemplarische Verläufe der auf diese Weise adaptierten Parameterwerte *a* und *b* der Modelle 1 und 3 für Einkorbchargen über eine 1000 Chargen umfassende Messkampagne. Zum Vergleich sind jeweils die während der Laufzeit adaptierten Werte und die Werte, die anhand einer nachträglichen Regressionsanalyse für diese Messkampagne bestimmt werden, in den Diagrammen eingetragen.

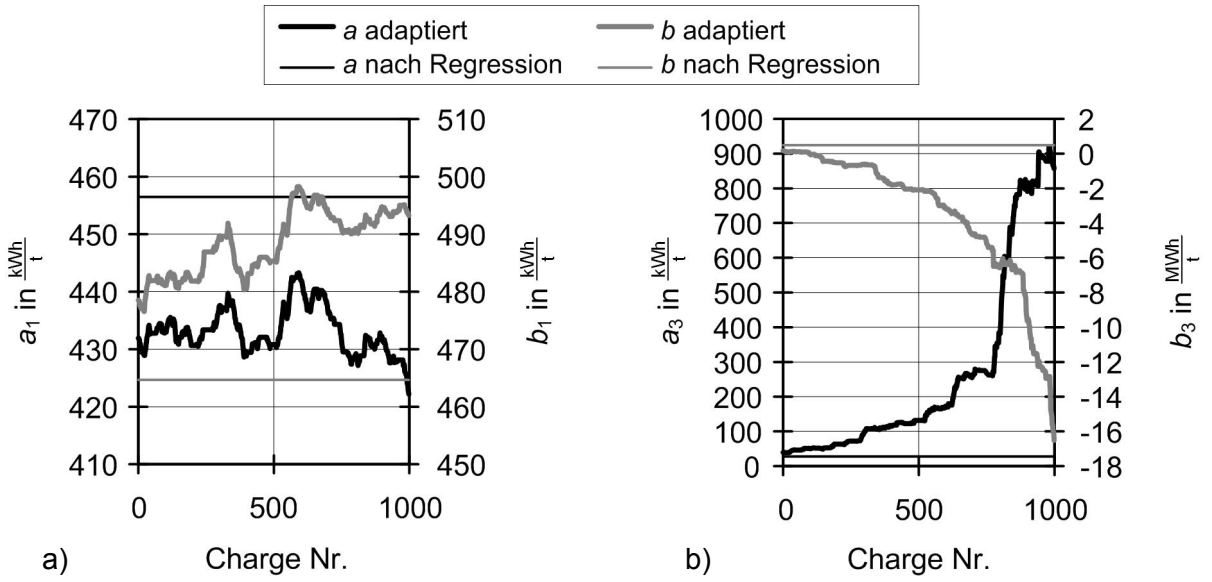


Bild 3.2: Nach Methode 1 adaptierte Parameterwerte *a* und *b* für die Einkorbchargen einer Messkampagne, a) Modell 1, b) Modell 3

Zu beachten ist bei dieser Darstellung, dass die Parameterwerte *b* für das Modell 3 aufgrund der großen Abweichung vom zu erwartenden Wertebereich nicht mehr in $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$, sondern in $\frac{\mathrm{MWh}}{\mathrm{t}}$ aufgetragen werden müssen. Darüber hinaus wird in beiden Teilbildern deutlich, dass die Adaption nicht einmal tendenziell in die richtige Richtung läuft, die entsprechend den eingetragenen Regressionsparameterwerten anzunehmen wäre.
Während Bild 3.2 den Verlauf der bereits durch exponentielle Mittelung adaptierten mitlaufenden Parameterwerte darstellt, sind in **Bild 3.3** die Einzelparameterwerte für die ersten 100 Chargen der selben Messkampagne aufgetragen, die sich anhand der Gleichungen (3.13) und (3.14) ergeben. Hier zeigt sich die große Dynamik der Einzelparameter, die bei dieser Bestimmungsmethode auftritt. Beim Modell 1 variieren die Werte zwischen 100 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$ und 550 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$, wobei nur zwei Wertepaare auftreten, die deutlich unter 400 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$ liegen. Bis auf diese Ausreißer erscheint der Werteverlauf daher zunächst plausibel. Dies ist beim Modell 3 jedoch nicht gegeben, da hier eine Variation zwischen 10 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$ und 250 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$ für den Parameter a_3 und zwischen 0,7 $\frac{\mathrm{MWh}}{\mathrm{t}}$ und -7,5 $\frac{\mathrm{MWh}}{\mathrm{t}}$ für den Parameter b_3 auftritt. Dies verdeutlicht die Instabilität der Parameterwerte, die aus der zuvor beschriebenen Methode resultiert, da bei der Berechnung gemäß Gleichung (3.14) für die Modelle 2 und 3 durch die während des Warmfahrens noch geförderte DRI-Einsatzmenge dividiert wird. Diese Menge kann je nach Chargenverlauf sehr klein ausfallen und damit die dargestellten überproportional großen

Schwankungen in den Einzelparameterwerten hervorrufen. Damit ist zwar eine Erklärung für das beobachtete Abdriften der adaptierten Werte gefunden, gleichzeitig stellt sich hier die Definition von Plausibilitätsgrenzen, wie sie bei der Adaption der Massenerwartungswerte angewandt wird, jedoch sehr schwierig dar. Die Methode, die beiden gesuchten Einzelparameter in zwei Schritten aus nur einer Gleichung zu bestimmen, wird daher als ungeeignet zur Parameteradaption während des Langzeiteinsatzes des Systems eingeschätzt.

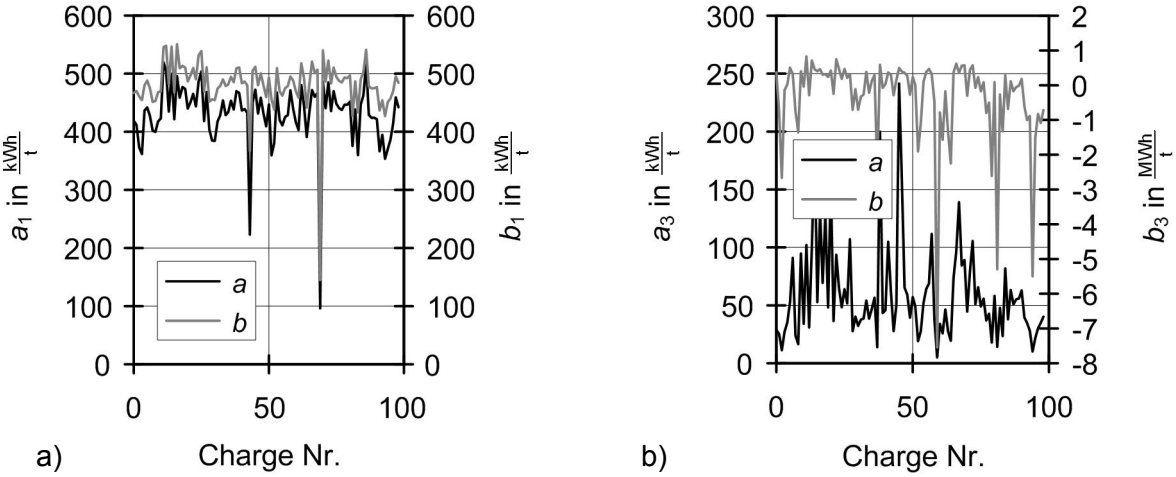


Bild 3.3: Nach Methode 1 berechnete Einzelparameterwerte *a* und *b* für die Einkorbchargen einer Messkampagne, a) Modell 1, b) Modell 3

Eine weitere Methode besteht darin, den anhand des jeweiligen Modells n mit den bis zum gegebenen Zeitpunkt aktuellen Parametern prognostizierten Energiebedarf $\tilde{W}_{\mathrm{el}n}$ mit dem bei der aktuellen Charge tatsächlich gemessenen Energiebedarf $W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n}$ in der Form

$$\Delta W_{\mathrm{el}n} = W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n} - \tilde{W}_{\mathrm{el}n} = W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n} - \left(a_{n\mathrm{alt}}\, m_{1\mathrm{gemessen}\,n} + b_{n\mathrm{alt}}\, m_{2\mathrm{gemessen}\,n}\right) \quad (3.15)$$

zu vergleichen. Die festgestellte Abweichung $\Delta W_{\mathrm{el}n}$ wird dann anhand der eingesetzten Gesamtmasse m_{ges} in eine spezifische Energiebedarfsänderung umgerechnet, mit der die einzelnen Parameterwerte beaufschlagt werden:

$$\Delta W_{\mathrm{el\,spez}\,n} = \frac{\Delta W_{\mathrm{el}n}}{m_{\mathrm{ges}}}\text{, mit } m_{\mathrm{ges}} = m_{1\mathrm{gemessen}\,n} + m_{2\mathrm{gemessen}\,n}\text{,} \quad (3.16)$$

$$a_{n\mathrm{neu}} = a_{n\mathrm{alt}} + \Delta W_{\mathrm{el}n}\text{,} \quad (3.17)$$

$$b_{n\mathrm{neu}} = b_{n\mathrm{alt}} + \Delta W_{\mathrm{el}n}\text{.} \quad (3.18)$$

Rein formal besitzt diese Vorgehensweise gegenüber der zuerst genannten Methode den Vorteil, dass die beobachtete Differenz zwischen Prognose und tatsächlichem Energiebedarf hier gleichermaßen auf beide Parameter eines jeweiligen Modells verteilt wird. Damit ist es möglich, für die Adaption beider Parameter eines jeden Modells gültige Grenzwerte zu definieren, die den Bereich der plausiblen Werte kennzeichnen. Anhand der Auswertung aller für die Modellbildung zugrunde gelegten Messkampagnen kann festgestellt werden, dass eine Adaption der Energieverbrauchskoeffizienten nur sinnvoll erscheint, wenn der Betrag der für

die aktuelle Charge festgestellten Verbrauchsdifferenz $\left|\Delta W_{\mathrm{el\,spez}\,n}\right|$ einen Grenzwert von 50 $\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{t}}$ nicht übersteigt. Des Weiteren sind bei der Berechnung der spezifischen Energiebedarfsänderung robustere Ergebnisse zu erwarten als bei der erstgenannten Methode, da hier im Gegensatz zur Berechnung gemäß Gleichung (3.14) immer die relativ große Gesamteinsatzmasse im Nenner steht (vgl. Gleichung (3.16)).

Bild 3.4 veranschaulicht in gleicher Weise wie Bild 3.2 den Verlauf der adaptierten Werte über eine aus 150 Einzelchargen bestehende weitere Messkampagne.

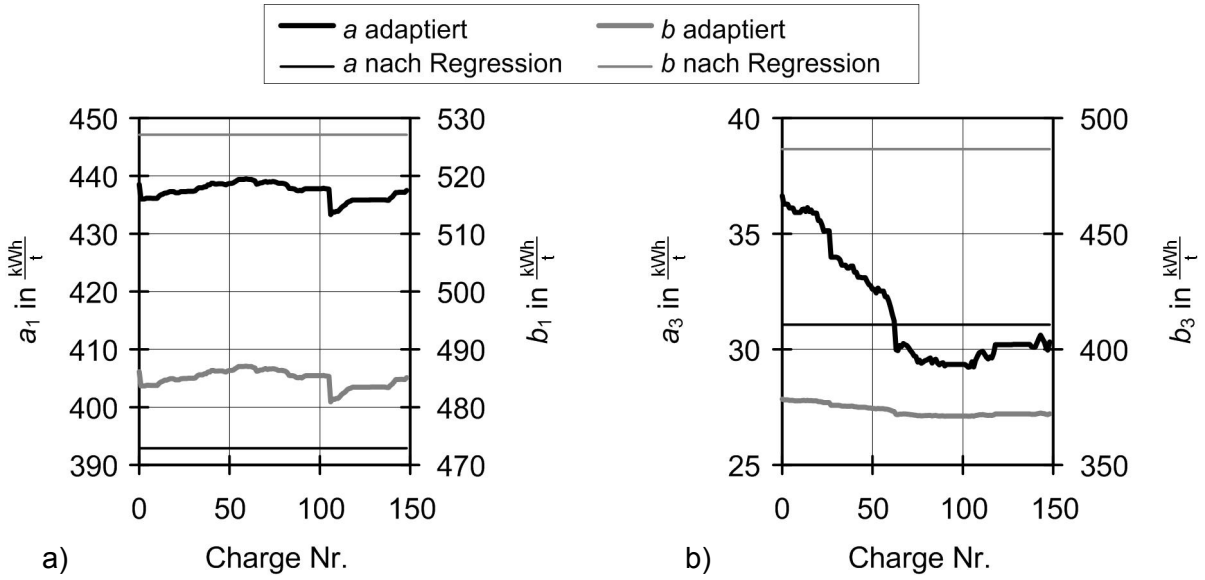


Bild 3.4: Nach Methode 2 adaptierte Parameterwerte *a* und *b* für die Einkorbchargen einer Messkampagne, a) Modell 1, b) Modell 3

Die getätigten Annahmen werden bestätigt und alle Parameterwerte verbleiben innerhalb des erwarteten Wertebereichs. Eine Annäherung an den von der nachträglichen Regression vorgegebenen Zielwert ist zwar auch hier nicht bei allen Parametern gegeben, dies ist jedoch auch damit zu begründen, dass in der Regression alle Einzelchargen gleich gewichtet werden, während bei der fortlaufenden Adaption entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise die Einzelparameterwerte aus den jeweils jüngsten zurückliegenden Chargen mit dem höchsten Gewicht in den aktuellen Parameterwert eingehen. Aufgrund des gleichmäßigen Verlaufs ist bei dieser Adaptionsmethode davon auszugehen, dass die Parameterwerte auch im Langzeiteinsatz stabil bleiben und eine gleichbleibende Prognosegenauigkeit ermöglichen.

Zum Nachweis wird der zuvor beschriebene Vergleich mit der auf fortlaufender Regressionsrechnung über die 20 letzten Chargen basierenden Adaption gezogen, indem für insgesamt sechs Messkampagnen beide Algorithmen simuliert werden. Die über die Gesamtzahl der Chargen je einer Art berechnete Streuung der Energiebedarfsprognosen

$$s_{\mathrm{Prognose}\,W\,\mathrm{el}\,n,m} = \sqrt{\frac{\sum_i \left(W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n}(i) - \tilde{W}_{\mathrm{el}\,n,m}(i)\right)^2}{i}} = \sqrt{\frac{\sum_i \left(W_{\mathrm{el\,gemessen}\,n}(i) - \left(a_{n,m}(i)\,m_{1n}(i) + b_{n,m}(i)\,m_{2n}(i)\right)\right)^2}{i}} \tag{3.19}$$

dient dabei als Gütemaß. Der Index *n* kennzeichnet das jeweils betrachtete Prognosemodell 1 bis 3 und der Index *m* den untersuchten Adaptionsalgorithmus; $m = 1$ steht für die Adaption über die $\Delta W_{\mathrm{elspez}\,n}$-Berechnung und $m = 2$ für die mitlaufende Regressionsrechnung. Die Laufvariable *i* durchläuft Werte von Eins bis zu der Anzahl Einzelchargen, welche in der jeweiligen Messkampagne enthalten sind.
Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnung sind in **Tabelle 3.5** bis **Tabelle 3.8** aufgeführt. Der jeweils kleinere Wert der festgestellten Streuung ist dabei in schwarzer Schrift eingetragen, um die Beurteilung zu erleichtern.

Tabelle 3.5: Streuung der Energiebedarfsprognosen für drei Prognosemodelle und zwei Adaptionsmethoden für Nullkorbchargen über fünf Messkampagnen

Messkampagne	Anzahl Chargen	Streuung für Modell und Adaptionsmethode in kWh					
		1		2		3	
		1	2	1	2	1	2
1	17	3016	3148	2540	2613	3894	3910
2	27	4748	4802	4477	4554	1302	1318
3	35	4869	4973	4617	4989	3344	3388
4	36	4042	4251	3912	4181	1386	1399
5	6	2743	2764	1765	1781	1900	1925

Tabelle 3.6: Streuung der Energiebedarfsprognosen für drei Prognosemodelle und zwei Adaptionsmethoden für Einkorbchargen über sechs Messkampagnen

Messkampagne	Anzahl Chargen	Streuung für Modell und Adaptionsmethode in kWh					
		1		2		3	
		1	2	1	2	1	2
1	110	11276	11522	11533	11802	3131	3136
2	177	4827	4789	5054	5584	3065	3074
3	142	3255	3166	3036	3214	3412	3459
4	184	2892	2856	2567	2627	2589	2554
5	29	2638	2654	2393	2406	1981	2029
6	70	3395	3578	3775	4289	2511	2500

Tabelle 3.7: Streuung der Energiebedarfsprognosen für drei Prognosemodelle und zwei Adaptionsmethoden für Zweikorbchargen über fünf Messkampagnen

Messkampagne	Anzahl Chargen	Streuung für Modell und Adaptionsmethode in kWh					
		1		2		3	
		1	2	1	2	1	2
1	32	8736	9095	8640	8948	11344	11335
2	125	10952	7956	10773	8712	9403	7582
3	70	5740	5912	5814	6320	2417	2501
4	102	5397	5160	5301	6243	2093	2113
5	11	8546	8807	8247	8496	5941	5952

Tabelle 3.8: Streuung der Energiebedarfsprognosen für drei Prognosemodelle und zwei Adaptionsmethoden für Dreikorbchargen über zwei Messkampagnen

Mess-kampagne	Anzahl Chargen	Streuung für Modell und Adaptionsmethode in kWh					
		1		2		3	
		1	2	1	2	1	2
1	11	3057	3112	2485	2546	771	775
2	21	3959	3757	4007	4132	5526	5516

Die in den oben stehenden Tabellen aufgeführten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass mit der Adaption der Parameter über die Berechnung der Energiebedarfsdifferenz ΔW_{eln} in jedem Fall vergleichbare Resultate zeigt wie die als theoretische Referenz herangezogene Adaption mittels fortlaufender Regression, wobei der benötigte Speicher und Rechenzeitbedarf während der Laufzeit für die erstgenannte Methode deutlich geringer einzuschätzen ist. Die erzielten Streuungen liegen immer in ähnlichen Wertebereichen. Darüber hinaus wird der pro Messkampagne und Chargenart aufgetretene kleinste und damit beste Streuungswert (eingetragen in schwarzer Schrift) in der Mehrzahl der Fälle von der vorgestellten anwendungsnahen Adaptions-Rechenvorschrift ($m = 1$) erreicht, mindestens sind aber über die jeweils zur Verfügung stehende Anzahl an Messkampagnen gleichwertige Ergebnisse beider Algorithmen zu beobachten. Damit wird die fortlaufende Adaption der Parameterwerte während der Laufzeit des zu entwickelnden Systems mittels der einmalig pro Charge auszuführenden Berechnung der aufgetretenen Differenz zwischen tatsächlichem Energieverbrauch und der zum jeweiligen Modell gehörenden Prognose durchgeführt.

3.2.4 Verifikation des Modells

Nachdem die Modellgleichungen identifiziert und parametrisiert sind und eine Methode zur Adaption der Parameterwerte gefunden ist, wird in weiteren Messkampagnen die erreichbare Genauigkeit der darauf basierenden Prognose der verbleibenden Stromflusszeit $\Delta t_{s\,prog}$ des Schmelz-Elektrolichtbogenofens evaluiert. Dazu werden wie zuvor angedeutet die jeweils zum gegebenen Zeitpunkt während der Laufzeit noch nicht bekannten Größen durch entsprechende Erwartungswerte in der jeweiligen Modellgleichung ersetzt. Des Weiteren wird ab dem Zeitpunkt $t_{\text{DRIRück}}$, zu dem der charakteristische Rückgang der DRI-Zufuhrrate erkannt wird, eine Schätzung der verbleibenden Stromflusszeit ausgegeben, die dem arithmetischen Mittel aus den Schätzungen der drei in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Modelle entspricht. Formal lässt sich damit die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit bis zum Abstich als

$$\Delta t_{\text{sprog}}(t) = \Delta t_{\text{s1}}(t) \quad \forall \quad t < t_{\text{DRIRück}} \tag{3.20}$$

und

$$\Delta t_{\text{sprog}}(t) = \frac{\Delta t_{\text{s1}}(t) + \Delta t_{\text{s2}}(t) + \Delta t_{\text{s3}}(t)}{3} \quad \forall \quad t \geq t_{\text{DRIRück}} \tag{3.21}$$

ausdrücken. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da einerseits aufgrund der vorangegangenen Modelldiagnose, die für alle Modelle eine vergleichbare Güte ergibt, keines zu verwerfen

ist. Andererseits ist davon auszugehen, dass die Heranziehung mehrerer Modellgleichungen zu einer besseren Stabilität der gemittelten Prognose bei ungewöhnlichen Prozessverläufen führt als dies von einzelnen Modellen zu erwarten wäre. **Bild 3.5** zeigt den Verlauf der tatsächlichen und prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit und der Einsatzgewichte für eine exemplarische Einkorbcharge. Zu beachten ist dabei, dass die tatsächlich verbleibende Stromflusszeit nur dann abnimmt, wenn der Ofen eingeschaltet ist, und während der Nebenzeiten auf einem konstanten Wert verharrt.

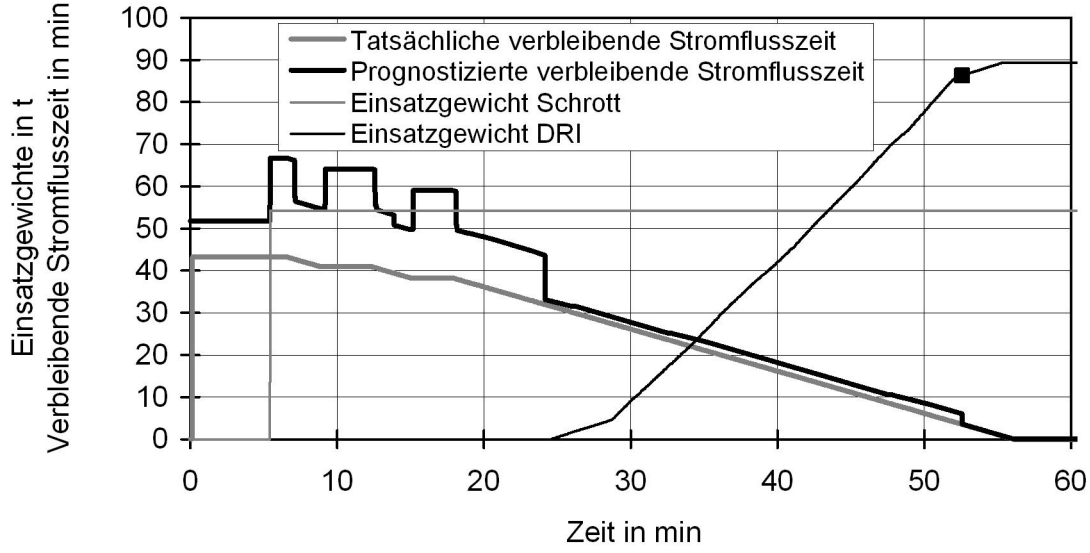


Bild 3.5: Verlauf der tatsächlichen und geschätzten verbleibenden Stromflusszeit sowie der Einsatzgewichte für eine Einkorbcharge

Der sich ergebende Verlauf der prognostizierten restlichen Stromflusszeit verdeutlicht die Funktion der beschriebenen Modelle in der Anwendung. Zu Beginn der Schmelze (bei ca. 6 min) ergibt sich eine Prognose, die eine viel längere verbleibende Stromflusszeit vorsieht als die tatsächlich noch Bevorstehende. Dies liegt darin begründet, dass das Einschmelzen mit geringer Leistung bei niedriger Transformatorstufe beginnt, so dass hier zunächst von einem kleinen Leistungserwartungswert aus dem entsprechenden Kennfeld und damit auch von einer geringen Prognoseleistung ausgegangen wird. Dies resultiert nach Gleichung (3.6) in einer relativ langen Restzeitabschätzung. Die dann folgenden Stufen im Kurvenverlauf treten auf, wenn die aktuelle Leistungseinbringung in den Lichtbogenofen entsprechend den hinterlegten Fahrdiagrammen mit Hilfe von Transformatorstufenschaltungen an den jeweiligen Prozessfortschritt angepasst wird. Bei ca. 24 min ist die höchste Transformatorstufe und somit die höchste Leistungsstufe erreicht, und die Kurven der prognostizierten und tatsächlichen restlichen Stromflusszeit stimmen nun beinahe überein. Schließlich tritt bei 52 min der charakteristische Rückgang in der DRI-Förderrate auf, was im Diagramm durch ein Quadrat auf der entsprechenden Kurve gekennzeichnet ist. Zu diesem Zeitpunkt wird die Schätzung der gesamten DRI-Einsatzmenge noch einmal aktualisiert und die Ergebnisse der Modelle 2 und 3 werden in die Prognoseberechnung mit einbezogen. Das Resultat ist, dass prognostizierte und tatsächliche verbleibende Stromflusszeit ab diesem Moment bis hin zum Abstich der Schmelze gleich verlaufen, d.h. der Abstichzeitpunkt und damit das Abschalten des Schmelzofens wird richtig prognostiziert.

Dieser beschriebene exemplarische Chargenverlauf stellt einen Idealfall dar, da hier der charakteristische Abfall der DRI-Zufuhrrate eindeutig zu erkennen ist. Wie bereits angedeutet,

kann davon jedoch nicht immer ausgegangen werden, da je nach Prozessablauf auch abweichende Verläufe auftreten können. Ein solcher ist in **Bild 3.6** zu sehen.

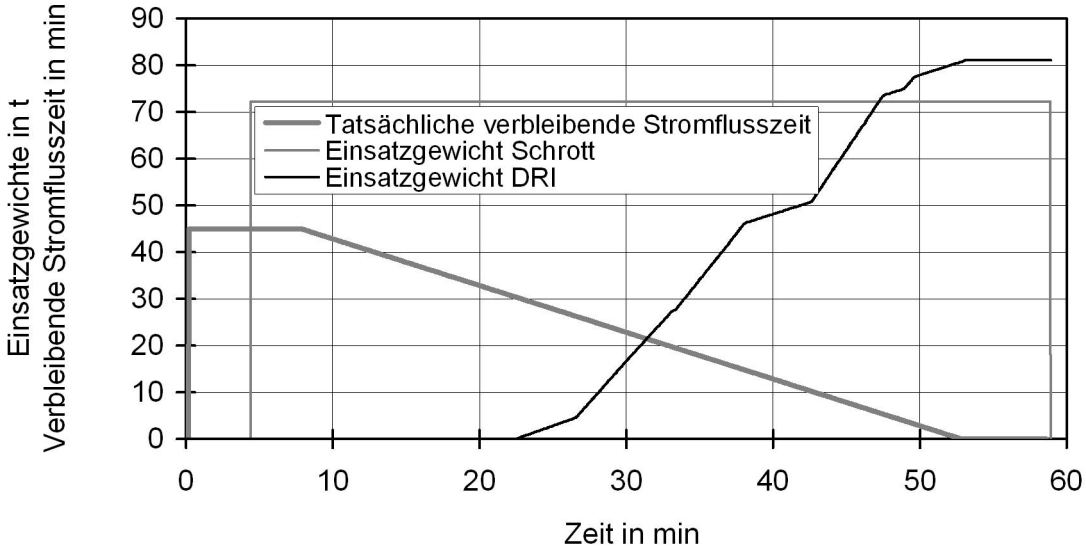


Bild 3.6: Verlauf der Einsatzgewichte und der verbleibenden Stromflusszeit für eine Einkorbcharge

Der Verlauf der Eisenschwammzufuhr, wie er für eine Einkorbcharge in Bild 3.6 dargestellt ist, verdeutlicht die Problematik, dasjenige Ereignis des charakteristischen Rückgangs der Zufuhrrate während der Laufzeit zu erkennen, welches den Beginn des Warmfahrens kennzeichnet. Anhand der abgebildeten Kurve des DRI-Einsatzgewichts könnte hierfür in diesem Fall sowohl das Abknicken bei ca. 38 min als auch das jeweilige Abknicken bei ca. 47 min und bei 50 min in Frage kommen. Erst die nachträgliche Auswertung ergibt, dass der Abfall der Förderrate bei 50 min der gesuchte ist. Während der Laufzeit, ohne Kenntnis des weiteren Chargenverlaufes, ist diese Feststellung nicht mit Sicherheit zu treffen. Entsprechend der in dieser Arbeit verfolgten Modellierung ist die Detektion des "richtigen" Zeitpunktes für eine genaue Prognose jedoch von großer Wichtigkeit. Daher wird im Folgenden eine Methodik erarbeitet, die es dem zu entwickelnden System trotz der gelegentlich auftretenden ungewöhnlichen Verläufe erlaubt, den Beginn der Aufheizphase in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle richtig zu erkennen.

Zunächst bietet es sich an, anhand der nachträglichen Auswertung einer möglichst großen Anzahl an Einzelchargen jeweils den tatsächlichen Start des Warmfahrens und des dazugehörigen Rückganges der DRI-Zufuhrrate zu markieren und dessen Lage im Chargenverlauf mit weiteren beobachteten Prozessvariablen in Zusammenhang zu stellen. **Bild 3.7** zeigt hierzu exemplarisch für die Ein- und Zweikorbchargen einer Messkampagne die Abhängigkeit zwischen bereits verstrichener Stromflusszeit und dem eingesetzten Gesamtgewicht zu den gesuchten Zeitpunkten des Abfalls der DRI-Zufuhrrate. Ähnliche Darstellungen ergeben sich auch für die Null- und Dreikorbchargen.

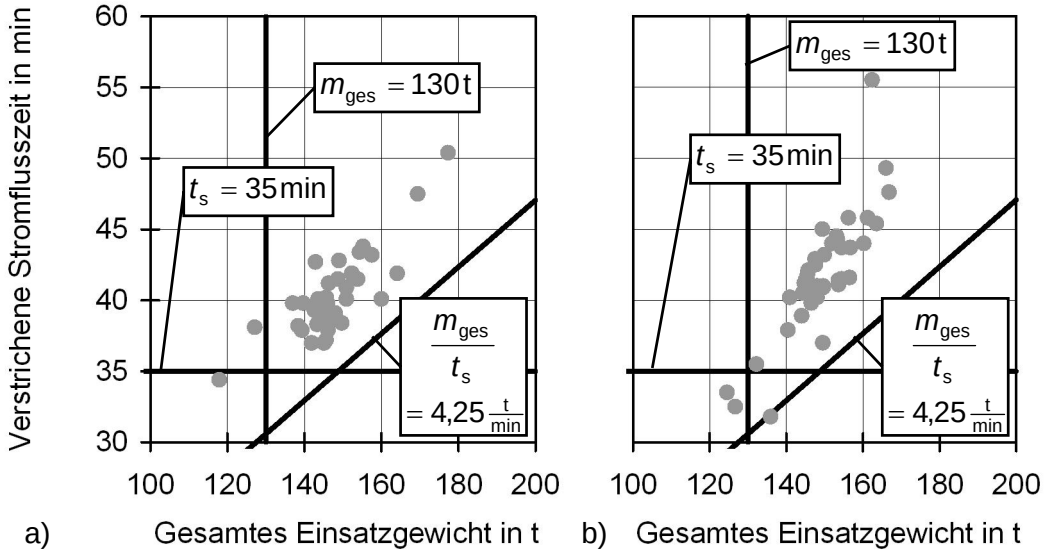


Bild 3.7: Verstrichene Stromflusszeit zu Beginn des Warmfahrens in Abhängigkeit vom eingesetzten Gesamtgewicht sowie festgelegte Grenzwerte, a) Einkorbchargen, b) Zweikorbchargen

Die beobachteten Stromflusszeiten und Einsatzgewichte beim Beginn der Aufheizphase ergeben in den Graphen für jede Chargenart eine Punktewolke, die sich mittels der eingezeichneten Linien so eingrenzen lässt, dass die Mehrzahl der Punkte innerhalb der von diesen Linien umschriebenen Fläche liegt. Daher wird in dem zu entwickelnden Algorithmus eine entsprechende Abfrage implementiert, die eine Detektion eines beobachteten Rückganges in der DRI-Zufuhrrate nur dann als Beginn des Warmfahrens erlaubt, wenn diese Grenzwerte erfüllt sind. Der Festlegung der Grenzen kommt somit eine große Bedeutung zu. Werden zu kleine Grenzwerte gewählt, birgt dies die Gefahr einer zu frühen Detektion des gesuchten Zeitpunktes und damit einer nicht zutreffenden Prognose der noch verbleibenden Stromflusszeit. Werden die Grenzen dagegen zu hoch angesetzt, wird damit in vielen Fällen eine Erkennung des richtigen Zeitpunktes verhindert, da die von den Grenzen vorgegebenen Werte selbst bis zum Abstich der betreffenden Charge nicht erreicht werden. Dies hätte zur Konsequenz, dass die Prognose während der gesamten Schmelzdauer ausschließlich auf Basis des Modells 1 und ohne die aktualisierten Masseneinsatzwerte bei Beginn des Warmfahrens errechnet würde, was in einer geringen Genauigkeit resultieren würde und daher zu vermeiden ist. Die Festlegung auf die oben eingetragenen Werte erweist sich in den für diese Arbeit aufgezeichneten Messkampagnen für alle Chargenarten als gute Lösung.
Die Festlegung und Abfrage der Grenzwertbedingungen für die Detektion des charakteristischen Rückganges der DRI-Förderrate verbessert die Rate der während der Laufzeit im Vergleich zur nachträglichen Auswertung richtig erkannten Zeitpunkte auf die in **Tabelle 3.9** eingetragenen Werte. Von einer richtigen Detektion wird dabei ausgegangen, wenn der während der Laufzeit erkannte Rückgang innerhalb eines Zeitfensters von ±90 s um den bei der nachträglichen Auswertung als richtig festgelegten Wert liegt. Diese erlaubte Abweichung ist im Hinblick auf die Messgenauigkeit hinzunehmen und resultiert in keiner nennenswerten Verschlechterung der Prognose, wie im Folgenden noch gezeigt wird.

Tabelle 3.9: Prozentsätze der mit implementierten Grenzwertbedingungen richtig detektierten Rückgänge der DRI-Zufuhrrate bei Beginn des Warmfahrens für zwei Messkampagnen

Mess-kampagne	Chargenart (Anzahl Schrottkörbe)	Anzahl Chargen	Prozentsatz "Beginn des Warmfahrens richtig detektiert"
1	1	108	75,0
	2	47	40,4
	3	48	20,8
2	0	67	68,7
	1	154	63,0
	2	74	37,8

Es fällt auf, dass die Rate der richtig detektierten Aufheizphasen besonders für die Dreikorbchargen der ersten Messkampagne äußerst gering ausfällt, aber auch für die Einkorbchargen nur einen Maximalwert von 75,0 % erreicht. Dies ist nicht zufriedenstellend und bedarf einer weiteren Optimierung, welche im Anschluss vorgestellt wird. Die Notwendigkeit einer Verbesserung bestätigt sich auch in **Bild 3.8**, worin die bei Abstich der jeweiligen Charge noch prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten über die Einkorbchargen der ersten Messkampagne aus Tabelle 3.9 aufgetragen sind.

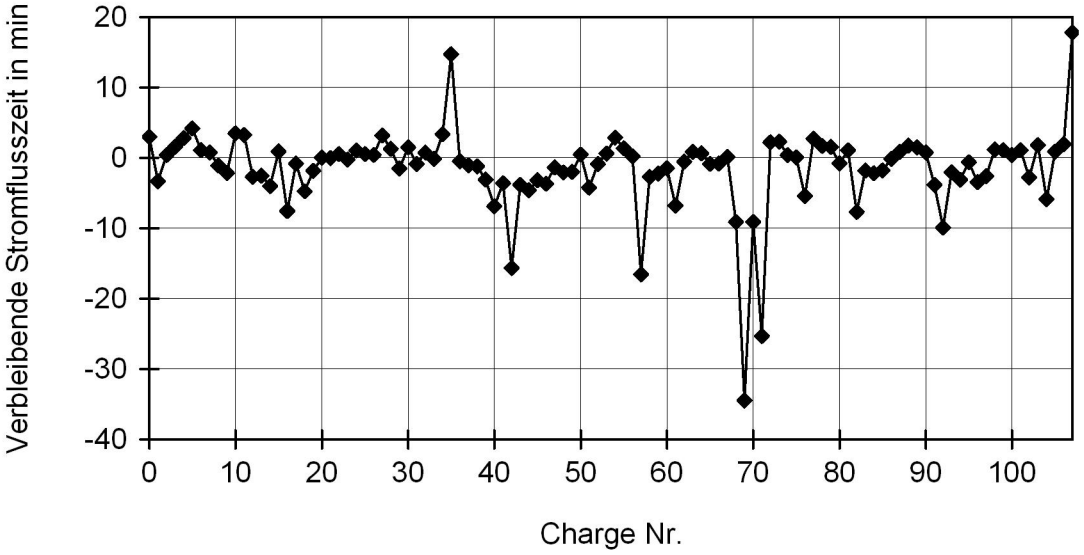


Bild 3.8: Bei Abstich noch prognostizierte verbleibende Stromflusszeit für die Einkorbchargen einer Messkampagne

Bei exakt zutreffender Prognose sollte zum Zeitpunkt des Abstichs eine verbleibende Stromflusszeit von 0 min vorhergesagt werden, was jedoch für die in Bild 3.8 dargestellte Messkampagne nur in den wenigsten Fällen zutrifft. Die ermittelte Streuung der beobachteten Prognosezeiten bei Abstich beträgt 5,8 min und der Mittelwert -1,5 min. Dies bedeutet, dass der Abstich im Mittel um eben diese Zeitspanne später auftritt als prognostiziert wird. Für die Lastkontrollstrategie ist dies ein nicht wünschenswertes Ergebnis, da der auf dieser Prognose aufzubauende Lastkontrollalgorithmus in diesem Falle von einem früheren Abstich ausgehen und demzufolge eine geringere Energiemenge für den Schmelzofen vorsehen würde,

als dieser tatsächlich bis zum Abstich noch bezieht. Darüber hinaus werden in oben stehendem Bild etliche Ausreißer sichtbar, die einen Prognosefehler von bis zu 35 min bedeuten. Dadurch ist auch der hohe Streuungswert zu erklären. Bei näherer Auswertung der Ausreißer tritt in den meisten Fällen ein falsch erkannter Beginn des Warmfahrens zu Tage, d.h. der charakteristische Rückgang der DRI-Förderrate wird nicht zutreffend detektiert. Ähnliche Ergebnisse werden auch für die Null-, Zwei- und Dreikorbchargen erreicht.
Als Begründung für den während der Laufzeit häufig nicht richtig erkannten Beginn des Warmfahrens anhand der Eisenschwammförderrate kann die Tatsache ausgemacht werden, dass eben diese Zufuhrrate nicht direkt als Messwert vorliegt. Sie muss daher aus dem Messwert des zum jeweiligen Zeitpunkt bereits eingesetzten Eisenschwammgewichts mittels diskreter Ableitung dieses Wertes nach der Zeit errechnet werden. Dieser zeitdiskreten Differentiation liegt eine konstante Abtastrate zugrunde. Da der DRI-Einsatz-Messwert im Gegensatz dazu jedoch nicht zu äquidistanten Zeitpunkten aktualisiert wird, kann es durch die unterschiedlichen Zeitdifferenzen, die somit zwischen den einzelnen Messwerten liegen, zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Sprüngen in der berechneten Zufuhrrate kommen. Im ungünstigsten Fall ergibt sich so für einen Zeitpunkt ein vermeintlicher Abfall der Förderrate unter den für die Detektion relevanten Grenzwert von 1,5 $\frac{\mathrm{t}}{\mathrm{min}}$, der jedoch nicht auf eine tatsächliche Verringerung der Zufuhrrate zurückzuführen ist, sondern auf die zur zeitdiskreten Ableitung asynchrone Aktualisierung der Messwerte.
Um diese allein auf berechnungstechnische Zusammenhänge zurückzuführenden sprungartigen Änderungen der DRI-Zufuhrrate von der Detektion des tatsächlich auftretenden charakteristischen Rückganges der Förderrate auszuschließen, wird daher eine Tiefpassfilterung der berechneten Zufuhrrate durchgeführt. Anschließend erfolgt die Erkennung des gesuchten Abfalls der Förderrate anhand dieser gefilterten Werte. Der Einfachheit halber wird hier ein Filter erster Ordnung herangezogen, das PT_1-Verhalten aufweist und während der Laufzeit gemäß Gleichung (2.2) berechnet werden kann. Die zugehörige Zeitkonstante T_{PT1} wird dabei mittels der Gewichtungsfaktoren 0,9 und 0,1 bei einer Abtastrate T von 1 s auf einen Wert von knapp 10 s eingestellt.
Des Weiteren bietet es sich an, nicht nur einen Grenzwert für die Zufuhrrate zu definieren, den diese während des Warmfahrens unterschreitet, sondern eine weitere Grenze festzulegen, welche im vorherigen Verlauf der Schmelze überschritten werden muss. Auf diese Weise lassen sich ungewöhnliche Verläufe der Eisenschwammzufuhr, bei denen eine zutreffende Erkennung des Abfalls der Förderrate kaum möglich ist, von vornherein aus dem Detektionsalgorithmus ausschließen. Der charakteristische Rückgang kann somit erst dann detektiert werden, wenn die beobachtete DRI-Zufuhrrate während der aktuellen Schmelze mindestens einmal den noch zu definierenden oberen Grenzwert überschritten hat. Zur Berücksichtigung gelegentlich vorkommender besonders langer Warmfahrprozesse wird der während der Laufzeit einzusetzende Detektionsalgorithmus zusätzlich noch so modifiziert, dass bei erneutem Anstieg der Förderrate über den oberen Grenzwert hinaus wieder der Status wie beim noch nicht detektierten Förderraten-Rückgang angenommen wird.
Zur Festlegung der benötigten Grenzwerte der gefilterten Eisenschwamm-Zufuhrrate werden zwei Messkampagnen mit insgesamt 501 Einzelchargen ausgewertet und anhand des bei der nachträglichen Auswertung als richtig markierten DRI-Förderraten-Abfalls für jede Charge ein mittlerer Förderraten-Wert vor und während des Warmfahrens ermittelt. Der gesuchte obere Grenzwert ist der Minimalwert der mittleren Zufuhrraten vor der Aufheizphase und liegt bei 2,0 $\frac{\mathrm{t}}{\mathrm{min}}$, während der untere Grenzwert sich als Maximalwert der mittleren Raten während dieser Phase zu 1,5 $\frac{\mathrm{t}}{\mathrm{min}}$ festlegen lässt.

Die Aufzeichnung zweier weiterer Messkampagnen mit diesem erweiterten Detektionsalgorithmus liefert das in **Tabelle 3.10** dargestellte Ergebnis. Auch hier wird ein während der Laufzeit erkannter Beginn der Aufheizphase im Vergleich zur nachträglichen Auswertung noch als "richtig" eingestuft, wenn der zeitliche Abstand zwischen beiden Ereignissen nicht mehr als 90 s beträgt.

Tabelle 3.10: Prozentsätze der mit implementierten Grenzwertbedingungen und Filterung der DRI-Zufuhrrate richtig detektierten Rückgänge der DRI-Zufuhrrate bei Beginn des Warmfahrens für zwei Messkampagnen

Messkampagne	Chargenart (Anzahl Schrottkörbe)	Anzahl Chargen	Prozentsatz "Beginn des Warmfahrens richtig detektiert"
1	0	20	65,0
	1	110	90,9
	2	33	78,8
2	0	32	65,6
	1	188	85,1
	2	133	78,2
	3	24	41,7

Insbesondere bei den Einkorbchargen ist hier eine starke Verbesserung der Erkennungsrate zu verzeichnen. Die immer noch recht niedrige Rate von 41,7 % bei den Dreikorbchargen der zweiten Messkampagne ist darauf zurückzuführen, dass hier im Allgemeinen nur sehr wenig Eisenschwamm eingesetzt wird, so dass auch die Förderrate meist sehr gering ausfällt und kaum eine eindeutige Detektion des charakteristischen Rückganges erlaubt. Dieses Ergebnis ist jedoch vertretbar, da wie bereits erwähnt, bei den Dreikorbchargen prinzipbedingt nicht mit einem großen Optimierungspotential durch das zu entwickelnde Lastkontrollsystem zu rechnen ist. Des Weiteren steht hier, wenn auch mit geringerer Genauigkeit, bei nicht erkanntem Beginn des Warmfahrens bis zum Abstich nach wie vor die Prognose gemäß Modell 1 zur Verfügung (vgl. Gleichung (3.20)).

Die in **Bild 3.9** dargestellte Auswertung der ersten Messkampagne aus Tabelle 3.10 zeigt eine deutliche Verbesserung der Prognosegenauigkeit. Der Mittelwert der bei Abstich noch prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit liegt nun bei -0,1 min, was als nahezu ideal zu bezeichnen ist. Da die in Kapitel 3.2.3 beschriebene Adaption der Modellparameter bei allen vier betrachteten Messkampagnen während der Laufzeit in Betrieb ist, bestätigt sich durch den trendfreien Verlauf der Kurven insbesondere in Bild 3.9 auch der angestrebte Beitrag der entsprechenden Algorithmen zur Beibehaltung einer konstanten Prognosegenauigkeit.

Die Anzahl der Ausreißer ist deutlich geringer als zuvor und damit auch die Streuung der Werte, die jetzt nur noch bei 1,7 min liegt. Noch verbleibende Ausreißer sind dabei durch ungewöhnliche Prozessverläufe zu erklären und müssen in Kauf genommen werden. Mit diesem Wissen sind in der auf Basis dieser Prognose zu entwickelnden Lastkontrollstrategie Maßnahmen einzuplanen, welche die aus einer unzutreffenden Prognose resultierenden Konsequenzen auf ein Mindestmaß reduzieren und insbesondere eine Überschreitung des Leistungslimits auch in diesem Fall verhindern. Diese drastische Konsequenz einer Fehlprognose der restlichen Stromflusszeit ist denkbar, da diese wiederum die Prognose des für den Schmelz-Elektrolichtbogenofen einzuplanenden Energiebedarfs stützt. Auf weitere mögliche Konsequenzen und Maßnahmen zu deren Lösung wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

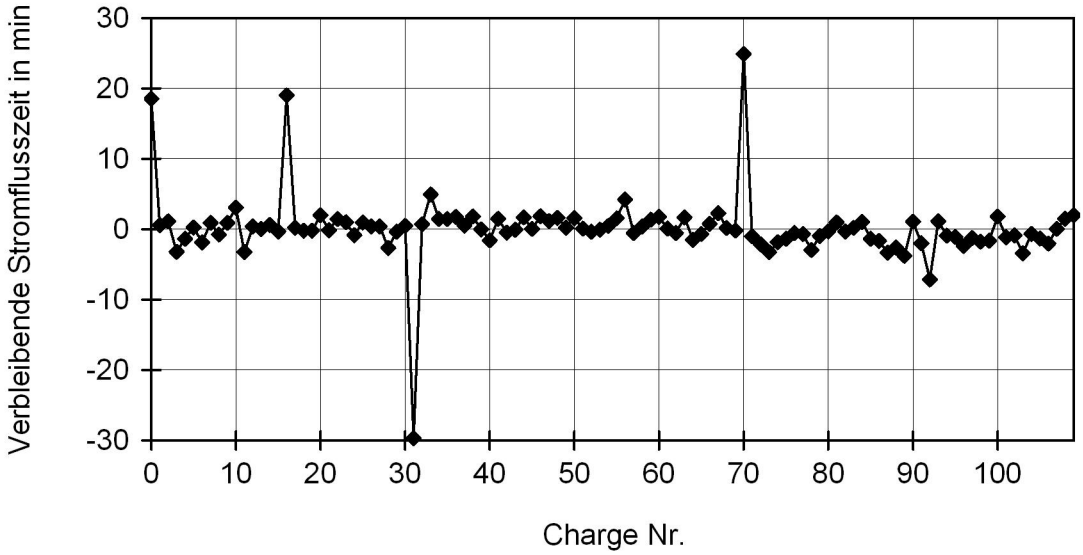


Bild 3.9: Bei Abstich noch prognostizierte verbleibende Stromflusszeit für die Einkorbchargen einer Messkampagne mit optimiertem Algorithmus zur Detektion des Beginns der Aufheizphase

Die bisherigen Betrachtungen zur Beurteilung der in dieser Arbeit entwickelten Modelle zur Prognose der verbleibenden Stromflusszeit beziehen sich ausschließlich auf die erreichte Genauigkeit beim Abstich der gemessenen Einzelchargen. Dies stellt jedoch nur einen Aspekt dar, der im Hinblick auf das zu entwickelnde Lastkontrollsystem zu untersuchen ist. Eine wesentliche Problemstellung bei der elektrischen Lastkontrolle besteht darin, eine möglichst gute Prognose für die in der aktuellen Bezugsperiode noch bevorstehende Stromflusszeit und damit in Verbindung mit der dazugehörigen Vorhersage der Leistungsaufnahme eine Abschätzung des in dieser Messperiode zu erwartenden Energiebezugs abzugeben. Vor diesem Hintergrund ist eine zusätzliche Untersuchung und Bewertung der entwickelten Prognosemodelle erforderlich. Darin ist zu prüfen, inwieweit dieser Problemstellung mit den Modellen begegnet werden kann und insbesondere wie zutreffend die während der Laufzeit berechnete Restzeitprognose bezüglich der jeweils aktuellen 15-minütigen Bezugsperiode ist. Zunächst werden dazu im Folgenden fünf Fälle definiert, die während des Verlaufs einer Charge bezogen auf die Einteilung in Bezugsperioden auftreten können. Dabei repräsentieren $\Delta t_{\mathrm{s\,prog}}(t)$ die mittels der Prognosemodelle abgeschätzte verbleibende Stromflusszeit bis zum Abstich und $\Delta t_{\mathrm{s\,real}}(t)$ die zu diesem Zeitpunkt tatsächlich noch bevorstehende Stromflusszeit, während $t_{15\mathrm{Rest}}(t)$ für die in der aktuellen Viertelstunde verbleibende Restzeit steht. Auf Basis dieser Größen ergeben sich die folgenden Fälle:

Fall 1: $\left(\Delta t_{\mathrm{s\,real}}(t) > t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right) \wedge \left(\Delta t_{\mathrm{sprog}}(t) > t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right)$,

Fall 2: $\left(\Delta t_{\mathrm{s\,real}}(t) > t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right) \wedge \left(\Delta t_{\mathrm{sprog}}(t) \le t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right)$,

Fall 3: $\left(\Delta t_{\mathrm{s\,real}}(t) \le t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right) \wedge \left(\Delta t_{\mathrm{sprog}}(t) \le t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right)$,

Fall 4: $\left(\Delta t_{\mathrm{s\,real}}(t) \le t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right) \wedge \left(\Delta t_{\mathrm{sprog}}(t) > t_{15\mathrm{Rest}}(t)\right)$,

Fall 5: Bezugsperiode nach Abstich ohne erneutes Zuschalten des Ofens.

Letztgenannter Fall stellt ein Hilfskonstrukt dar, dem die Fälle zuzuordnen sind, in denen der Abstich einer Schmelze bereits stattgefunden hat, die nächste Charge jedoch noch nicht begonnen wurde, so dass hier noch keine neue Prognoseberechnung vorliegt.
Zur Veranschaulichung dieser Fallunterscheidung ist in **Bild 3.10** ein fiktiver Verlauf der zeitabhängigen tatsächlich noch verbleibenden Stromflusszeit aufgetragen. Gleichzeitig ist die Zeitachse in denkbare Bezugsperioden eingeteilt, so dass die Bereiche, in welche die prognostizierte restliche Zeit bis zum Abstich fallen kann, entsprechend der oben definierten Fälle markiert werden können. Prinzipiell gilt diese Veranschaulichung für alle beobachtbaren Einzelchargenverläufe, die einzige Variation besteht in der zeitlichen Position des tatsächlichen Abstichs in der letzten Bezugsperiode der betreffenden Charge.

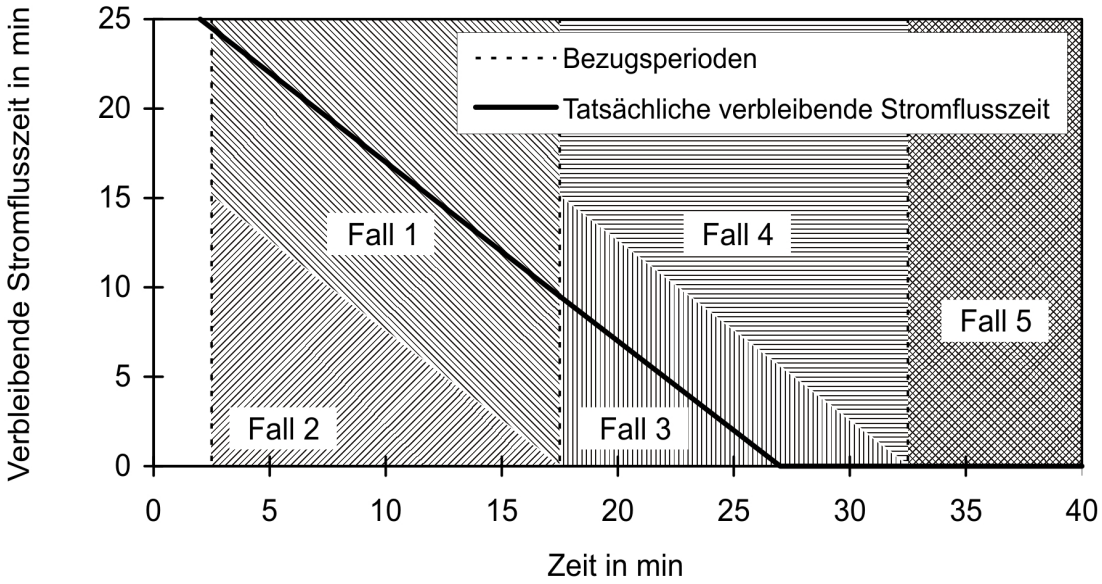
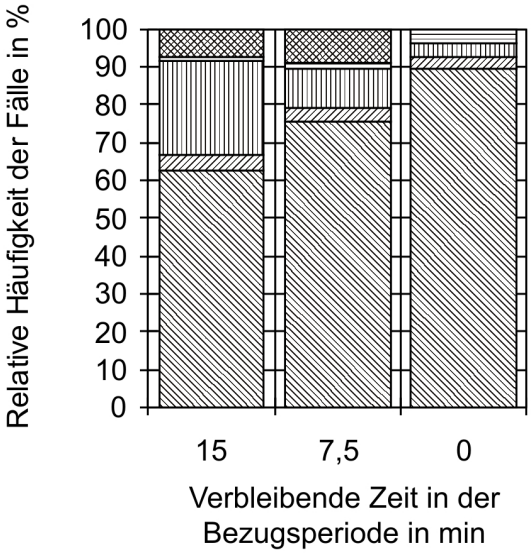


Bild 3.10: Fallunterscheidung der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit in Abhängigkeit von der tatsächlichen verbleibenden Stromflusszeit und der Aufteilung in Bezugsperioden

Bevor die Einzelchargen der aufgezeichneten Messkampagnen entsprechend dieser Fallunterscheidung untersucht werden, ist die Betrachtung der Auswirkungen erforderlich, die das Auftreten der verschiedenen Fälle im Hinblick auf die Lastkontrollstrategie haben kann. Fall 1 stellt eine insofern richtige Prognose dar, dass der Abstich der betreffenden Charge nicht in die aktuelle Bezugsperiode fällt, so dass hier für den Schmelzofen eine Energiemenge entsprechend der in der Viertelstunde verbleibenden Restzeit vorzusehen ist. Ob die verbleibende Stromflusszeit in diesem Fall genau richtig abgeschätzt wird, ist somit für die Funktion des zu entwickelnden Lastkontrollalgorithmus in der aktuellen Bezugsperiode nicht von Belang. Im Fall 2 dagegen würde die Prognose den Abstich des Ofens in der betreffenden Messperiode vorhersagen, obwohl dieser tatsächlich erst später auftritt. Dieser Fall führt dazu, dass in der auf dieser Prognose gestützten Lastkontrollstrategie eine zu geringe Energiemenge für den Elektrolichtbogenofen vorgesehen wird. Dies wiederum gilt es zu vermeiden, da aufgrund des zu gering eingeschätzten Energiebedarfs eventuell notwendige Schalthandlungen unterlassen werden könnten, was am Ende der Viertelstunde ein Überschreiten des Leistungslimits nach sich ziehen würde. Der Fall 4 repräsentiert die genau umgekehrte Situation, nämlich dass der Abstich bereits in der aktuellen Bezugsperiode auftritt, während die Prognoseberechnung diesen erst für die nächste Viertelstunde vorsieht. Die daraus re-

sultierende Konsequenz besteht in der Abschätzung einer zu großen Energiemenge für den Elektrolichtbogenofen. Dies führt im ungünstigsten Fall zu unnötigen, den Transformator-Stufenschalter belastenden Schalthandlungen, gefährdet dabei die Einhaltung des Leistungslimits jedoch nicht. Fall 3 ist vergleichbar mit Fall 1, hier sieht die Prognose den Abstich richtig für die aktuelle Messperiode vor. Ob die einzuplanende Energiemenge damit auch mit der tatsächlich noch bis zum Abstich benötigten übereinstimmt, hängt hier von der Genauigkeit der Prognose zu diesem Zeitpunkt ab. Diese konnte in den vorhergehenden Untersuchungen bereits als gut zutreffend beurteilt werden, so dass auch hier auf Basis der Prognose im Allgemeinen eine Einhaltung des Leistungslimits bei gleichzeitiger Beschränkung der Schalthandlungen auf ein Minimum realisierbar erscheint.
Bei einer angenommenen durchschnittlichen Stromflusszeit von ca. 60 min und einer mittleren Nebenzeit von 15 min zwischen den einzelnen Chargen ergibt sich bei idealer Prognose eine Aufteilung in die verschiedenen Fälle in der Form, dass der Fall 1 in drei Viertelstunden und die Fälle 3 und 5 jeweils in einer Viertelstunde auftreten. Damit entfallen 60 % der Messperioden auf den Fall 1 und je 20 % auf die Fälle 3 und 5.



$t_{15\,\mathrm{Rest}}$ in min	Relative Häufigkeit der Fälle in %				
	1	2	3	4	5
15,0	62,7	3,8	25,0	1,2	7,4
7,5	75,5	3,9	10,3	1,4	8,9
0,0	89,4	3,1	3,8	3,8	0,0

Bild 3.11: Fallunterscheidung der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit für die Bezugsperioden einer Einkorbchargen-Messkampagne, relative Anteile in Abhängigkeit von der in der Bezugsperiode verbleibenden Restzeit und dazugehörige Wertetabelle

Die Auswertung einer exemplarischen 188 Einkorbchargen umfassenden Messkampagne liefert das in **Bild 3.11** dargestellte Ergebnis. Die Zuordnung der gemessenen 806 Messperioden entsprechend der Fallunterscheidung wird dabei für die drei verschiedene Zeitpunkte $t_1 \ldots t_3$ mit $t_{15\mathrm{Rest}}(t_1)$=15 min, $t_{15\mathrm{Rest}}(t_2)$=7,5 min und $t_{15\mathrm{Rest}}(t_3)$=0 min, d.h. jeweils zu Beginn, in der Mitte und am Ende der betreffenden Viertelstunde durchgeführt. Die Betrachtung dieser verschiedenen Zeitpunkte erscheint für eine umfassende Beurteilung notwendig, da sich die Prognose der verbleibenden Stromflusszeit während des Ablaufs der jeweiligen Viertelstunde durch die Verwendung der unterschiedlichen Prognosemodelle, der ggf. erfolgenden Aktualisierung der Einsatzmengen sowie durch mögliche prozessbedingte Abweichungen in der elektrischen Leistungseinbringung ändern kann. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass die zuvor genannte ideale Aufteilung der Messperioden nur für die Betrachtung am Anfang der jeweiligen Messperiode, d.h. bei $t_{15\mathrm{Rest}}$=15 min, gilt, da nur hier die gesamten, in-

nerhalb der Viertelstunde auftretenden Vorkommnisse in die Betrachtung mit einfließen können.
Zunächst fällt an der obigen Verteilung der gemessenen Bezugsperioden auf die verschiedenen Fälle auf, dass auch bei $t_{15\mathrm{Rest}}$ = 15 min die ideale Aufteilung nicht ganz erreicht wird. Dies ist zum einen mit real kürzeren Stromfluss- und Nebenzeiten der einzelnen Chargen zu begründen als bei der Idealbetrachtung angenommen werden. Zum anderen wird in 3,8 % der Fälle der Abstich für die jeweilige Messperiode prognostiziert, obwohl der tatsächliche Abstich erst danach erfolgt. Diese aus den o.g. Gründen zu vermeidenden Fälle 2 sind in der Idealaufteilung nicht enthalten. Auf die Einzelchargen übertragen bedeutet der beobachtete mittlere Anteil der Fälle 2 von 3,6 %, unter der Annahme von ca. fünf Messperioden pro Charge, dass bei 18 % der Chargen die unerwünschte Situation einer zu geringen Abschätzung der verbleibenden Stromflusszeit durch die Prognosealgorithmen auftritt. Dieses Ergebnis ist aufgrund des davon ausgehenden Risikopotentials, das Leistungslimit in der Konsequenz möglicherweise nicht mehr einhalten zu können, nicht zufriedenstellend und bedarf einer im Folgenden zu erarbeitenden Verbesserung.
Des Weiteren ist zu beobachten, dass der Anteil der Fälle 1, d.h. Prognose und tatsächlicher Abstich liegen zeitlich nach der aktuellen Messperiode, umso größer wird, je später die einzelnen Viertelstunden betrachtet werden, also je kleiner $t_{15\mathrm{Rest}}$ wird. Dies lässt sich mit der formalen Bedingung, die ein Vorliegen des Falls 1 beschreibt, begründen. Generell wird die Wahrscheinlichkeit, aus den Messwerten einer beliebigen aufgezeichneten Charge an zufällig gewählter Stelle eine verbleibende Stromflusszeit größer als ein bestimmter Grenzwert auszulesen, immer größer, je kleiner dieser Grenzwert gewählt wird. Beispielsweise gilt für eine 60 min dauernde Charge für mindestens 59 min, dass die verbleibende Restzeit größer als 1 min ist, während nur für 1 min das Gegenteil gilt. Übertragen auf die in der Definition der bei dieser Auswertung zu unterscheidenden Fälle herangezogene Bedingung erklärt dieser Zusammenhang daher den übermäßig großen Anteil der Fälle 1 bei der Betrachtung der tatsächlichen und prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit am Ende der jeweiligen Viertelstunde.

Zur angestrebten Verringerung des Anteils der Fälle 2, in denen der Abstich der aktuellen Charge zu früh prognostiziert wird, bietet es sich an, die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit mit einem Sicherheitsaufschlag zu versehen. Auf diese Weise wird die Prognose tendenziell eher etwas zu lang ausfallen, was wie bereits ausgeführt zu weniger drastischen Konsequenzen in der gesamten Lastkontrollstrategie führt und daher zu bevorzugen ist. Um die Größe des benötigten Sicherheitsaufschlags abzuschätzen, wird für eine Reihe von Messkampagnen eine statistische Auswertung der während der Laufzeit zum Zeitpunkt des Abstichs prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten durchgeführt.
Insbesondere ist hierbei zu prüfen, ob diese Prognosewerte einer bekannten Verteilungsfunktion folgen, so dass anhand der angestrebten Größe des zugehörigen Quantils auf die erforderliche Größe des Sicherheitsaufschlags geschlossen werden kann. Zur Veranschaulichung zeigt **Bild 3.12** eine hypothetische Verteilung, welche die beobachteten Werte der prognostizierten verbleibenden Restzeit annehmen könnten. Der Einfachheit halber wird in dieser Darstellung davon ausgegangen, dass die mittlere bei Abstich prognostizierte Restzeit 0 min beträgt. Teilbild a) entspricht dem bisher betrachteten Fall, in dem die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit $\Delta t_{\mathrm{s\,prog}}$ nicht mit einem Sicherheitsaufschlag versehen wird. Hier ergibt sich anhand der angenommenen Verteilung eine Aufteilung in zwei gleich große Anteile, d.h. für die eine Hälfte der Chargen würde der Abstich zu früh prognostiziert und für die

andere Hälfte zu spät. Teilbild b) dagegen zeigt die Verhältnisse, die sich bei Verwendung einer modifizierten, mit einem Sicherheitsaufschlag der Größe $s_{\text{aufschlag}}$ versehenen Prognosezeit $\Delta t_{\text{s mod}} = \Delta t_{\text{s prog}} + s_{\text{aufschlag}}$ einstellen würden. Hier fände der reale Abstich im Mittel bei einer prognostizierten restlichen Stromflusszeit $\Delta t_{\text{s mod}} = s_{\text{aufschlag}}$ statt. Die dargestellte Verteilung würde damit entsprechend nach rechts verschoben und das Quantil der Chargen, für die der Abstich zutreffend oder zu spät prognostiziert wird, auf 70 % vergrößert. Nur für die verbleibenden 30 % würde der Abstich zu früh prognostiziert, was die zuvor geschilderten unerwünschten Konsequenzen nach sich ziehen könnte.

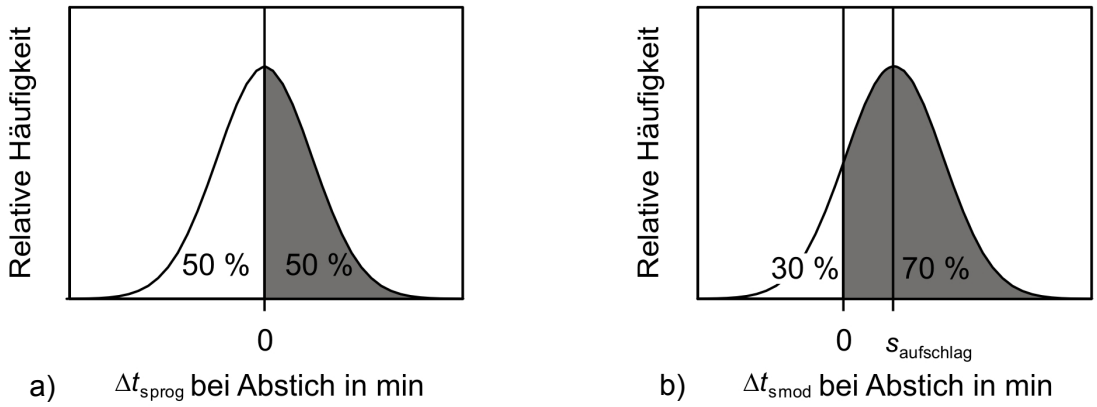


Bild 3.12: Hypothetische Verteilungsdichtefunktionen der im Mittel ideal prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit bei Abstich und mögliche Quantile in Abhängigkeit von der Bemessung des Sicherheitsaufschlags, a) 50 % - 50 %, b) 70 % - 30 %

Damit wird deutlich, dass je nach der zugrunde liegenden Verteilung und dem angestrebten Prozentsatz an Chargen, für welche die mit dem Sicherheitsaufschlag versehene Prognose genau zutreffen bzw. den Abstich zu spät vorhersehen soll, eine Bemessung des Sicherheitsaufschlags möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass eine zu große Bemessung das Auftreten der unerwünschten Fälle 2 zwar auf ein Minimum reduzieren, gleichzeitig jedoch auch die Wahrscheinlichkeit einer zutreffenden Prognose des Abstichs für die jeweilige Viertelstunde verringern würde, d.h. der Anteil der Fälle 4 würde sich in gleichem Maße vergrößern und der Anteil der Fälle 3 ebenfalls verringern.
Bei dieser Betrachtung ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die mittlere bei Abstich prognostizierte noch verbleibende Stromflusszeit nur im Idealfall 0 min beträgt, was einer im Mittel genau zutreffenden Prognosezeit entspricht. Tatsächlich wird in Messungen jedoch ein geringfügig von Null verschiedener Wert beobachtet, der einen mit Hilfe der angewandten Prognosealgorithmen nicht vermeidbaren und damit systemimmanenten Fehler darstellt. Bei der weiteren statistischen Auswertung wird daher nicht von der idealen mittleren bei Abstich prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit von 0 min ausgegangen, sondern von dem in jeweiligen Messkampagne tatsächlich beobachteten Mittelwert.
Anhand der Messdaten von 1066 Einzelchargen, die über einen Zeitraum von ca. einem Jahr aufgezeichnet werden, wird die Verteilung der sich ergebenden prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten bei Abstich auf Normalverteiltheit überprüft. Die Normalverteilung stellt die bei Messwerten der unterschiedlichsten Arten am häufigsten beobachtete Verteilungsform dar. Als Testverfahren wird hier sowohl der bereits vorgestellte Kolmogorov-Smirnov-Test anhand der relativen Summenhäufigkeit und des dazugehörigen Summenhistogramms

als auch der χ^2-Test durchgeführt. Letzterer beruht auf dem Vergleich des beobachteten Histogramms der Messwerte mit dem sich theoretisch für eine normalverteilte Größe ergebenden Histogramm, wobei Mittelwert und Standardabweichung der Normalverteilung entsprechend den aus den Messwerten bestimmten Größen zu wählen sind. Aus den zwischen theoretischem und gemessenem Histogramm auftretenden Differenzen wird die Prüfgröße χ^2 berechnet und mit dem zu einem Konfidenzniveau gehörenden Grenzwert verglichen. Überschreitet die Prüfgröße diesen Grenzwert, so liegt nicht mit der zum Konfidenzniveau gehörenden Wahrscheinlichkeit eine Normalverteilung vor.
Das Summenhistogramm der Messwerte und einer Normalverteilung mit den Messwerten entsprechenden Kenndaten (Mittelwert $\mu =$ -0,2 min und Standardabweichung $\sigma =$ 2 min) sowie die sich nach Kolmogorov-Smirnov ergebenden Grenzwerte für ein Konfidenzniveau von 90 % sind in **Bild 3.13** dargestellt. Die Bestimmung der angegebenen Kenndaten erfolgt anhand des Mittelwertes und der Streuung der bei Abstich prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten. Werte, die mehr als 10 min bzw. weniger als -10 min betragen, werden dabei von der Betrachtung ausgeschlossen, da derartige Ausreißer sich aufgrund von atypischen Prozessverläufen ergeben und die Kennwerte der beobachteten Verteilung verfälschen. Es verbleiben 1033 Werte für die weitere Auswertung.

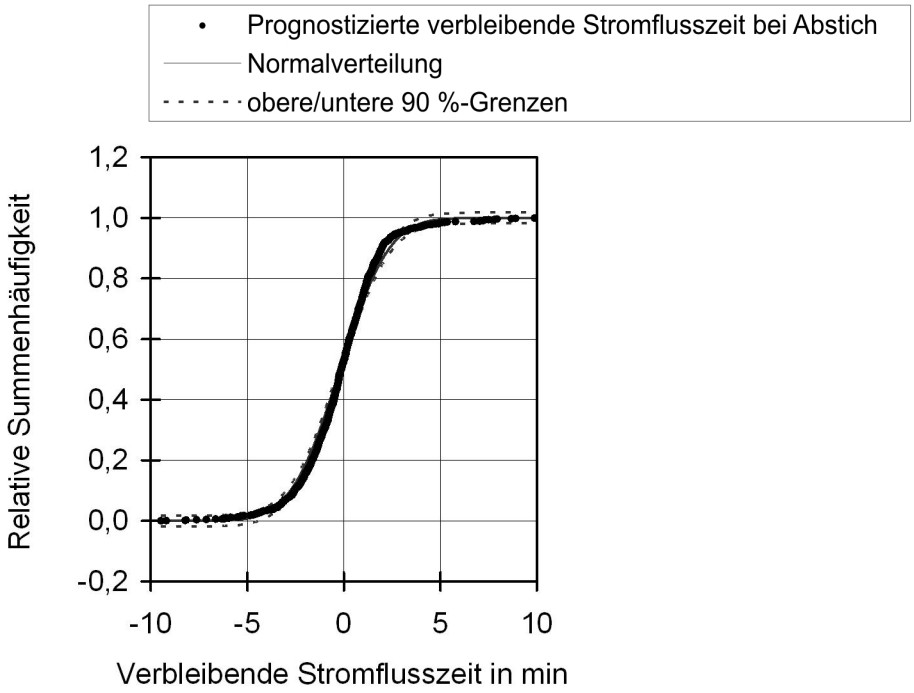


Bild 3.13: Summenhistogramm der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit bei Abstich und einer Normalverteilung mit μ = -0,2 min und σ = 2 min sowie dazugehörige Grenzwerte für ein 90 %-Konfidenzniveau

Wie in oben stehender Abbildung ersichtlich, liegt das Summenhistogramm der Messwerte für verbleibende Stromflusszeiten zwischen 1 min und 4 min geringfügig außerhalb der für das 90 %-Konfidenzniveau geltenden Grenzwerte. Dies ist damit zu begründen, dass in diesem Bereich eine hohe Anzahl prognostizierter verbleibender Stromflusszeiten bei Abstich beobachtet wird. Somit kann hier nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test nicht von einer Normalverteilung der während der Laufzeit berechneten Prognosezeiten ausgegangen werden.

Zur Veranschaulichung des χ^2-Tests sind in **Bild 3.14** die relativen Häufigkeiten der während der Laufzeit prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten bei Abstich und die für eine Normalverteilung mit den o.g. Kenndaten zu erwartenden Häufigkeiten als Histogramm aufgetragen. Die Kurve für die Normalverteilung kommt zu Stande, indem für die jeweilige Klasse die theoretische relative Häufigkeit anhand des formalen Zusammenhangs dieser Verteilung berechnet, bei der betreffenden Klassenmitte im Diagramm eingetragen und die so entstehenden Datenpunkte durch eine extrapolierte Kurve verbunden werden.
Es zeigt sich, dass die beobachtete relative Häufigkeit in den Klassen -1 min bis 0 min, 0 min bis 1 min sowie 1 min bis 2 min die theoretisch zu erwartende Häufigkeit über- und in den Klassen 2 min bis 3 min sowie 3 min bis 4 min unterschreitet. Darüber hinaus tritt in der Klasse 7 min bis 8 min im Gegensatz zur Normalverteilung eine von Null verschiedene Häufigkeit auf. Für die Prüfgröße χ^2 ergibt sich damit ein Wert von 2020, der wesentlich größer als der zum Konfidenzniveau von 90 % gehörende Grenzwert für den χ^2-Test von 186 ist. Somit führt auch dieser Test zur Ablehnung der Hypothese, dass die bei Abstich prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten normalverteilt sind. Dieses Ergebnis erscheint plausibel, da den Prognosezeiten unterschiedliche Algorithmen zugrunde liegen, die je nach Prozessverlauf Anwendung finden. Bei der Verwendung nur eines Prognosealgorithmus wäre eine Normalverteiltheit der prognostizierten Zeiten eher zu erwarten gewesen.

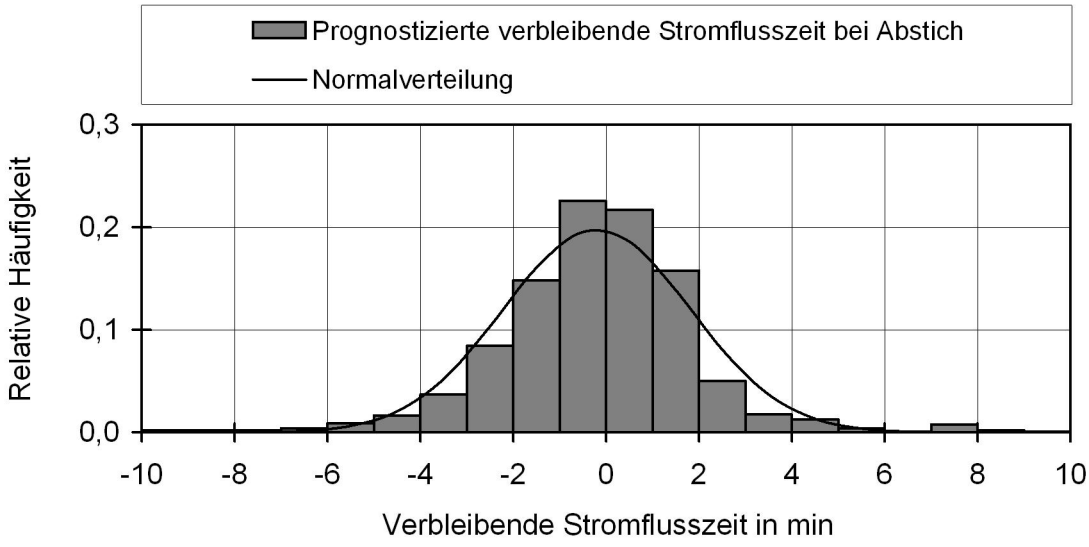
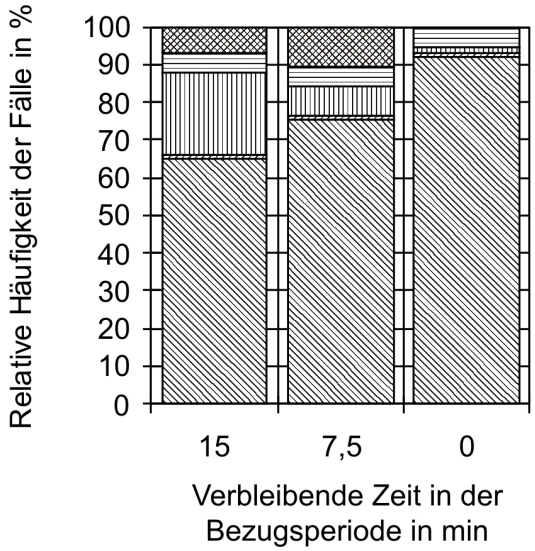


Bild 3.14: Histogramm der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit bei Abstich und einer Normalverteilung mit μ = -0,2 min und σ = 2 min

Da beide statistischen Testverfahren die Normalverteiltheit der während der Laufzeit berechneten und beobachteten Prognosezeiten bei Abstich nicht bestätigen können, kann zur Bemessung des erforderlichen Sicherheitsaufschlags nicht von den Quantilen dieser Verteilung ausgegangen werden. Es wird daher anhand der vorliegenden Messdaten das Quantil der beobachteten Verteilung bestimmt, in welchem alle gemessenen Prognosezeiten bei Abstich liegen, die größer als der Mittelwert abzüglich einer Standardabweichung bzw. Messwertestreuung sind. Für 899 der 1033 gemessenen Einzelchargen ist diese Bedingung erfüllt, so dass das gesuchte Quantil 87 % beträgt. Dieser Wert ist geringfügig größer als das entsprechende für eine Normalverteilung zu erwartende Quantil von 84 %.
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Wahrscheinlichkeit, den Abstich einer jeweiligen Charge zutreffend oder zu spät vorher zu sehen, mit der um den Sicherheitsauf-

schlag vergrößerten Prognosezeit auf 87 % ansteigt. Dazu ist der Sicherheitsaufschlag auf den Wert der Streuung der während der Laufzeit prognostizierten verbleibenden Stromflusszeiten bei Abstich festzulegen, wobei diese Stromflusszeiten um die Ausreißer größer 10 min bzw. kleiner -10 min zu bereinigen sind. Dieser Anstieg der Wahrscheinlichkeit erscheint aufgrund der deutlich erkennbaren Ähnlichkeit der beobachteten Verteilung mit der Normalverteilung plausibel, auch wenn die statistischen Testverfahren das Vorliegen von Normalverteiltheit auf 90 % Signifikanz nicht bestätigen. Ähnliche Resultate ergeben sich auch für die hier nicht explizit behandelten Null- bzw. Mehrkorbchargen, so dass für jede Chargenart anhand zurückliegender Messdaten ein entsprechender Sicherheitsaufschlag bestimmt werden kann. Im Einzelnen betragen diese Werte 3 min, 1,7 min und 2,4 min für die Null-, Zwei- und Dreikorbchargen.

In den weiteren Messkampagnen wird die Aufteilung in die zuvor beschriebenen Fälle 1 bis 5 anhand der mit dem Sicherheitsaufschlag versehenen prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit bei Abstich vorgenommen, d.h. in die zuvor definierten Bedingungen für das Vorliegen der einzelnen Fälle wird jetzt an Stelle von $\Delta t_{\mathrm{sprog}}(t)$ die modifizierte Prognosezeit $\Delta t_{\mathrm{smod}}(t) = \Delta t_{\mathrm{sprog}}(t) + s_{\mathrm{aufschlag}}$ eingesetzt. Für 195 beobachtete Einkorbchargen und 853 auswertbare Viertelstunden resultiert dies in dem in **Bild 3.15** dargestellte Ergebnis.



$t_{15\,\mathrm{Rest}}$ in min	Relative Häufigkeit der Fälle in %				
	1	2	3	4	5
15,0	65,1	1,0	21,8	5,0	7,1
7,5	75,2	1,5	7,7	5,1	10,6
0,0	92,0	0,9	1,7	5,4	0,0

Bild 3.15: Fallunterscheidung der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit mit Sicherheitsaufschlag für die Bezugsperioden einer Einkorbchargen-Messkampagne, relative Anteile in Abhängigkeit von der in der Bezugsperiode verbleibenden Restzeit und dazugehörige Wertetabelle

Während die Anteile der Fälle 1, 3 und 5 sich in ähnlichen Größenordnungen bewegen wie bei der Betrachtung ohne Beaufschlagung der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit bis zum Abstich, ist die erwünschte Reduktion des Anteils der Fälle 2 auf durchschnittlich 1,1 % deutlich zu erkennen. Unter den o.g. Annahmen bedeutet dies, dass dieser ungünstige Fall nur noch für 5,5 % der Chargen auftritt. Gleichzeitig ist eine Erhöhung des Anteils der Fälle 4 zu beobachten, d.h. der tatsächliche Abstich erfolgt nun eher vorzeitig in der aktuellen Viertelstunde, obwohl die Prognose über diesen Zeitraum hinausgeht. Zuvor beträgt dieser Anteil im Mittel 2,1 % der Viertelstunden und steigt jetzt auf einen mittleren Prozentsatz von 5,2 % an. Dadurch wird noch einmal deutlich, dass durch die Bemessung des Sicher-

heitsaufschlags ein Kompromiss zwischen der Vermeidung der Fälle 2 und jener der Fälle 4 gefunden werden muss. Aufgrund der bereits dargelegten unterschiedlichen Konsequenzen, die das Auftreten dieser beiden Fälle von unzutreffender Prognose des Abstichs auf die zu entwickelnde Lastkontrollstrategie hat, ist dabei einerseits dem Ziel, eine zu kurz ausfallende Prognosezeit nach Möglichkeit zu vermeiden (Fall 2), eine höhere Priorität einzuräumen als demjenigen, die Prognose nicht zu lang, d.h. über den tatsächlichen Abstich hinaus, anzugeben (Fall 4). Andererseits erscheint die Wahl eines zu großen Sicherheitsaufschlags, der den Anteil der zu vermeidenden Fälle 2 auf ein Minimum reduziert, ebenso wenig sinnvoll, da damit gleichzeitig auch der Anteil der zutreffenden Prognosen (Fälle 3) zu Gunsten der Fälle 4 sehr gering würde. Dies wiederum widerspräche der grundsätzlichen Zielsetzung, die mit der Verwendung eines Prognosealgorithmus verfolgt wird.
Insofern stellt das mit der gewählten Bemessung des Sicherheitsaufschlags erreichte Ergebnis einen sinnvollen Kompromiss dar. Der verbleibende Anteil der Fälle 2 bei der vorgeschlagenen Bemessung des Sicherheitsaufschlags ist in Kauf zu nehmen und bezüglich seiner Konsequenzen bei der weiteren Betrachtung des zu entwickelnden Lastkontrollalgorithmus näher zu untersuchen.

4 Lastkontrollstrategie

4.1 Aufgabenstellung und Ziel elektrischer Lastkontrolle

Der Betrieb elektrischer Energieversorgungsnetze stellt die entsprechenden Energieversorgungsunternehmen (EVU) vor eine Reihe von Herausforderungen. Zum einen ist für die vom Gesetzgeber im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) geforderte Grundversorgung mit elektrischer Energie eine sichere und zuverlässige Stromversorgung zu realisieren und zum anderen ist für den wirtschaftlichen Betrieb der Energieerzeugungs- und -transportmittel eine effiziente Nutzung anzustreben. Dies wird jedoch durch verschiedene, von den angeschlossenen Verbrauchern ausgehende Effekte erschwert.

Zu nennen sind hier die in Kapitel 2.1.1 im Falle von Elektrolichtbogenöfen erwähnten Netzrückwirkungen wie Blindströme, Flickereffekte und höherfrequente Störungen. Erstere werden durch induktive oder kapazitive Verbraucher mit einem Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung ungleich Null verursacht und belasten hauptsächlich die Leitungen des Netzes, ohne dass dem hohen Strom eine entsprechende umgesetzte Wirkleistung gegenübersteht. Flicker und Störungen höherer Frequenzen entstehen bei zeitlich nicht konstanten Impedanzen der Verbraucher und können eine Vielzahl unerwünschter Effekte verursachen [Mombauer 05]. Das Bestreben der EVUs ist es daher, die genannten Netzrückwirkungen so gering wie möglich zu halten. Mittels messtechnischer Überwachung der durch die elektrische Anlage des jeweiligen Stromkunden verursachten Störungen wird eine Berücksichtigung in der Stromrechnung realisiert. So wird für viele Kunden der Betrieb z.B. einer Blindstromkompensationsanlage wirtschaftlich [Konstantin 08].

Über diese durch die technische Beschaffenheit bestimmter Verbraucher hervorgerufenen störenden Einwirkungen auf das Energieversorgungsnetz hinaus führen die Lastgänge industrieller elektrischer Verbraucher zu einem ungleichmäßigen Energiebezug im Versorgungsnetz. Der Lastgang bzw. der zeitliche Verlauf der Leistungsaufnahme wird dabei oftmals von produktionstechnischen Anforderungen und entsprechenden Fahrdiagrammen bestimmt. Weiterhin führt insbesondere bei Privathaushalten als Stromkunden auch das individuelle Verhalten zu einer sich ändernden Belastung des Netzes. Üblicherweise werden elektrische Verbraucher vornehmlich während der Tages- bzw. Produktionszeit betrieben, so dass es hier zu Spitzenlasten kommen kann. Während der Nachtzeit und an den Wochenenden hingegen wird tendenziell weniger Leistung aufgenommen, da hier weniger elektrische Verbraucher zugeschaltet sind.

Für das EVU besteht neben dem zuverlässigen und sicheren Betrieb des Versorgungsnetzes ein weiteres gleichberechtigtes Interesse darin, die eigenen Betriebsmittel möglichst effizient zu nutzen [Dittmer 89]. Insbesondere beinhaltet dies die Vermeidung von Spitzenlasten, wie sie durch die beschriebenen Vorgänge hervorgerufen werden können, da diese unter Umständen den Einkauf von Spitzenlaststrom bei anderen Versorgern zu erhöhten Preisen oder die Vorhaltung eigener Spitzenlastkraftwerke des EVUs erfordert. Letzteres ist ebenfalls als äußerst kostenintensiv zu beurteilen, da solche Kraftwerke zwar nur im Falle von Spitzenlastanforderungen zugeschaltet werden, trotzdem aber während der übrigen Zeit betriebsbereit gehalten werden müssen. Dadurch entstehen neben den notwendigen hohen Investitions- auch laufende Unterhaltungskosten, die aufgrund der geringen Betriebsdauer der betreffenden Kraftwerke jedoch nicht wirtschaftlich erscheinen. Dies unterstreicht die Bedeu-

tung eines gleichmäßigen Energiebezugs für den effizienten und damit kostengünstigen Betrieb eines elektrischen Versorgungsnetzes.
Zur Erreichung dieses Ziels steht den EVUs hier als wichtigstes Instrument die Preis- und Tarifgestaltung zur Verfügung. Im Allgemeinen gliedern sich geltende Stromtarife in einen Fixkostenanteil und einen variablen Kostenanteil auf. Der Fixkostenanteil wiederum besteht üblicherweise aus einem Verrechnungspreis, der die Kosten für die benötigten Zähler und die Abrechnung als solche widerspiegelt, und einem so genannten Bereitstellungspreis. Durch letzteren gibt das EVU die eigenen Fixkosten wie z.B. Kapitalkosten für Kraftwerke, Wartung und Revision, den Überlandtransport der elektrischen Energie durch das Hoch- und Mittelspannungsnetz sowie die Kapital- und Unterhaltungskosten für die Ortsverteilungen anteilig an seine Stromkunden weiter. Die Anteilsbemessung erfolgt dabei anhand der vom EVU für den jeweiligen Kunden vertragsmäßig bereitgestellten Leistung.
Der variable Kostenanteil üblicher Stromtarife beinhaltet die entsprechend der verbrauchten elektrischen Energiemenge anfallenden Kosten. Dies entspricht den EVU-seitig entstehenden variablen Kosten für z.B. Brennstoffe und Verbrauchsgüter, die zur Erzeugung der elektrischen Energie benötigt werden. Durch die zeitabhängige Preisgestaltung der verbrauchsabhängigen Kosten ergibt sich für das EVU die Möglichkeit, eine Vergleichmäßigung des Gesamtlastverlaufs herbeizuführen. Bei zeitabhängigen Tarifen hängt der Arbeitspreis pro kWh verbrauchter elektrischer Energie von dem Zeitpunkt ab, zu dem diese Energie bezogen wird. Übliche zeitabhängige Tarifschemata können beispielsweise je nach Jahreszeit, Wochentag oder auch Tageszeit unterschiedliche Verbrauchspreise vorsehen. Der Effekt gleichmäßigeren Energiebezugs durch die Stromkunden tritt dann ein, wenn das EVU beispielsweise den Verbrauchspreis in den Zeiten, zu denen üblicherweise wenig Energie bezogen wird, herabsetzt. Auf diese Weise wird für die Kunden ein Anreiz geschaffen, ihre Anlagen wenn möglich während dieser günstigeren Zeiten zu betreiben. Damit findet eine Verschiebung gewisser Leistungsbezüge in die ohne die Preisdifferenzierung weniger frequentierten Zeiträume statt, was mit einer Vergleichmäßigung des Energiebezugs über den Gesamtzeitraum einhergeht. Ein klassisches Beispiel für diesen Zusammenhang ist die tarifliche Aufteilung des Tagesablaufs in Hoch- und Niedertarifzeit, wobei der Arbeitspreis in der Hochtarifzeit höher ist als in der Niedertarifzeit. Üblicherweise fallen die Nachtstunden ebenso wie die Wochenenden in die Niedertarifzeit. Diese Art der Verschiebung des Energiebezugs ist am einfachsten und ohne weitere Einschränkungen mit Hilfe von elektrischen Verbrauchern zu nutzen, die eine gewisse Energiespeicherfunktion aufweisen. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass durch die erwähnten Maßnahmen keine generelle Energieverbrauchseinsparung eintritt, da unabhängig von der zeitlichen Verteilung der Leistungsbezüge insgesamt immer die gleiche Energiemenge verbraucht wird.
Die vorgestellten grundsätzlichen Tarifmodelle gelten in ähnlicher Form sowohl für Privatkunden als auch für so genannte Großkunden. Letztere bezeichnen dabei z.B. kleinere industrielle Anlagen oder sonstige nicht-private Einrichtungen. Die einzelnen Preisbestandteile können je nach Jahresgesamtenergieverbrauch oder maximalem Leistungsbezug variieren.
Bei Stromkunden mit hoher Anschlussleistung der betreffenden elektrischen Anlage wird die Bemessung des Bereitstellungspreises nicht pauschal, sondern in Abhängigkeit von der im Vertragszeitraum bezogenen Leistung des Kunden vorgenommen. Der dazu zu Grunde gelegte Leistungspreis wird pro bezogenem kW elektrischer Leistung angegeben. Eine leistungsbezogene Abrechnung erfolgt für diejenigen Kunden, deren Leistungsaufnahme einen Grenzwert von in Deutschland z.Zt. 30 kW überschreitet.

Mit der Liberalisierung des Strommarktes ergeben sich für die EVUs über die dem EnWG unterliegende Belieferung der Tarifkunden eine Reihe von Möglichkeiten, mit so genannten Sondervertragskunden wie z.B. industriellen Großbetrieben und sonstigen Großabnehmern besondere Vertragsbedingungen auszuhandeln. Solche Sonderkonditionen können beispielsweise darin bestehen, dass der betreffende Sondervertragskunde sich dem EVU gegenüber verpflichtet, auf dessen Anfrage bestimmte Lasten abzuschalten. So steht dem EVU die von diesen Verbrauchern aufgenommene Last als Reserveleistung zur Reaktion auf Lastspitzen zur Verfügung. Weiterhin kann der Leistungspreis in Abhängigkeit von der Gleichmäßigkeit des Leistungsbezugs des jeweiligen Kunden angepasst werden. Als Maß für einen gleichmäßigen Lastgang wird dabei das Verhältnis des Jahresgesamtenergieverbrauchs in kWh zu der im gleichen Jahr maximal bezogenen Leistung in kW herangezogen, wobei dieser Wert die so genannten Vollbenutzungsstunden widerspiegelt. Je mehr Vollbenutzungsstunden für den betreffenden Kunden anfallen, desto gleichmäßiger ist sein Leistungsbezug in dem betrachteten Zeitraum, so dass das EVU einen entsprechend günstigeren Leistungspreis anbieten kann.
Sowohl für Tarif- als auch für Sondervertragskunden wird üblicherweise der vertraglich relevante Leistungsbezug nicht anhand der Anschlussleistung seiner elektrischen Anlage oder anhand der absoluten maximalen Leistungsaufnahme während des Vertragszeitraumes bemessen, sondern mit Hilfe der so genannten Viertelstundenleistung. Der gesamte Abrechnungszeitraum wird dazu in unmittelbar aufeinander folgende Mess- oder Bezugsperioden gleicher Länge aufgeteilt. Für jede dieser Messperioden wird dann die durchschnittliche Leistungsaufnahme berechnet, indem die in der Periode bezogene elektrische Energie durch die Periodendauer dividiert wird. In Deutschland beträgt die Länge dieser Bezugsperioden 15 min, daher wird hier von Viertelstundenleistung gesprochen. Ausschlaggebend für die Berechnung des Bereitstellungspreises in der Stromabrechnung ist nun die maximale, während der Vertragslaufzeit gemessene Viertelstundenleistung, die mit dem entsprechenden spezifischen Leistungspreis multipliziert wird.
In der Praxis wird zur besseren Planbarkeit der erforderlichen Leistungsbereitstellung von Seiten des EVUs bereits zu Beginn der Vertragslaufzeit in Form des so genannten Leistungslimits eine anzustrebende maximale Viertelstundenleistung zwischen EVU und Stromkunde vereinbart. Nach Ablauf des Abrechnungszeitraumes wird schließlich überprüft, ob alle gemessenen Viertelstundenleistungen unterhalb dieses Leistungslimits liegen. Ist dies der Fall, so wird dem Stromkunden der Bereitstellungspreis für das Leistungslimit berechnet. Wird das Leistungslimit jedoch für eine oder mehrere Messperioden des Abrechnungszeitraums überschritten, so erhöht sich der Bereitstellungspreis auf den Preis, der für die höchste gemessene Viertelstundenleistung anfällt.
Zu beachten ist hierbei, dass eine kurzfristige Überschreitung des Leistungslimits durch die momentane Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher des Stromkunden nicht zwangsläufig zur Berechnung eines erhöhten Bereitstellungspreises führen muss, da in diesem Fall die für die betreffende Viertelstunde gemessene, und damit abrechnungsrelevante Durchschnittsleistung trotzdem noch unterhalb des Leistungslimits liegen kann. Der Wert der jeweiligen gemessenen Viertelstundenleistung wird daher nicht nur durch den Lastgang der betreffenden elektrischen Anlage, sondern auch durch die relative zeitliche Position der Bezugsperioden zu diesem Lastgang beeinflusst.
Bild 4.1 und **Bild 4.2** zeigen einen beispielhaften Verlauf der gesamten aufgenommenen elektrischen Leistung eines Stahlwerkes und zwei Möglichkeiten zu dessen Aufteilung in

aufeinander folgende Messperioden von 15 min Dauer. Für jede dieser Möglichkeiten sind die sich ergebenden Viertelstundenleistungen ebenfalls im Diagramm eingetragen.

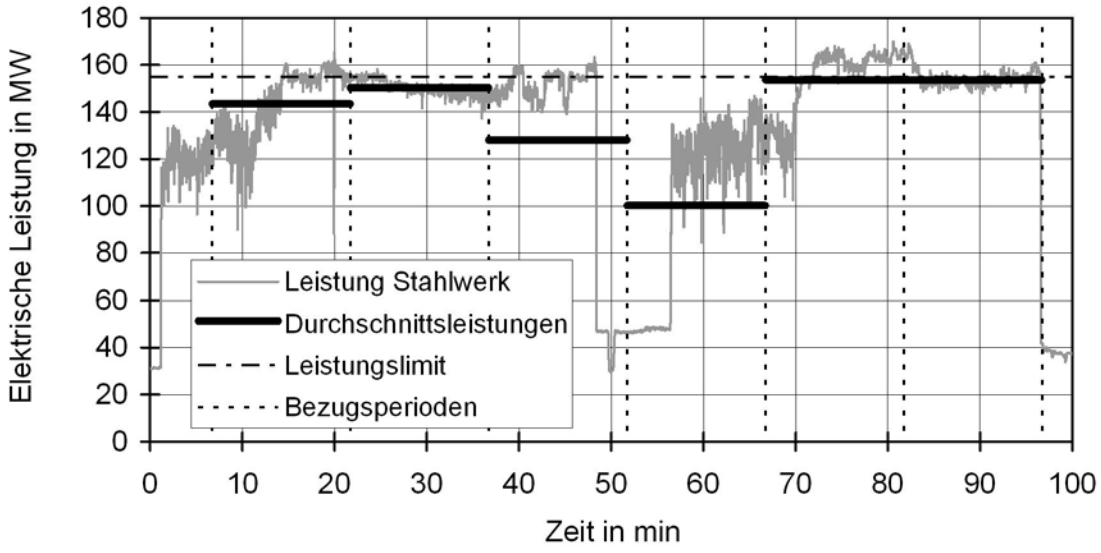


Bild 4.1: Beispielhafter Lastverlauf eines Stahlwerkes mit 15 min-Bezugsperioden, Leistungslimit eingehalten

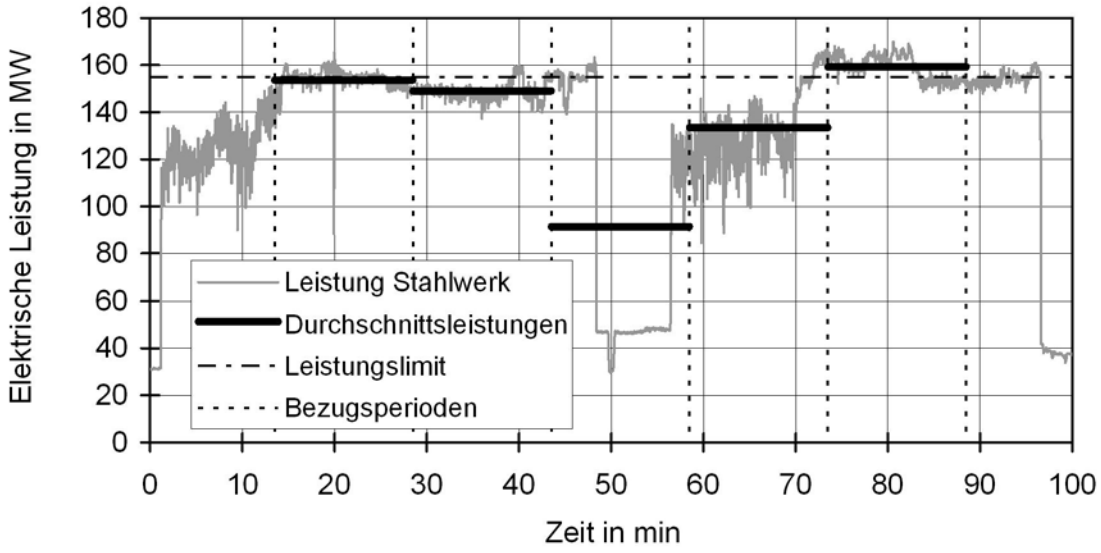


Bild 4.2: Beispielhafter Lastverlauf eines Stahlwerkes mit 15 min-Bezugsperioden, Leistungslimit überschritten

In Bild 4.1 wird der Lastverlauf der Anlage so günstig in 15 min-Perioden aufgeteilt, dass die Durchschnittsleistungen für alle dargestellten Viertelstunden unterhalb des Leistungslimits liegen. Bild 4.2 dagegen verdeutlicht, wie sich die ermittelten Durchschnittsleistungen verändern, wenn sich die Position der Bezugsperioden verschiebt. In diesem Fall kommt es für die Viertelstunde zwischen 73 und 88 min zu einer Überschreitung des Leistungslimits. Dies ist insbesondere deshalb bemerkenswert, da beiden Bildern der gleiche Lastverlauf zu Grunde liegt.

Nach der Beschreibung der Zielsetzungen der Energieversorgungsunternehmen und der zu deren Erreichung angewandten tariflichen Möglichkeiten und Besonderheiten bei der Belieferung von Stromkunden mit elektrischer Energie soll im Folgenden auf die Interessen der industriellen Stromkunden eingegangen werden. Insbesondere sind hier die Konsequenzen zu betrachten, die sich für die Stromkunden aus den Tarifstrukturen ergeben.
Ein wichtiges Interesse des Stromkunden besteht darin, sein Produktionsziel zu erreichen. Dazu sind bestimmte Mengen an Rohstoffen und Energieträgern, insbesondere auch an elektrischer Energie, erforderlich. Diesen elektrischen Energiebedarf wünscht der Kunde aus dem Versorgungsnetz des EVUs zu beziehen. Unter Energiebedarf ist hierbei nicht nur die Energiemenge zu verstehen, die der Kunde z.B. während eines Jahres für seine Produktion benötigt. Zusätzlich ist auch die zeitliche Komponente zu berücksichtigen, d.h. zu welchen Zeitpunkten und wie schnell, also mit welcher Leistung, diese Energiemenge aus dem Versorgungsnetz bezogen werden muss. Dies wird durch den Lastgang der betreffenden Kundeninstallation wiedergegeben, der die momentane Leistungsaufnahme als zeitlichen Verlauf darstellt. Dieser Lastgang kann bei industriellen Stromkunden sehr wechselhaft sein, insbesondere wenn die gesamte elektrische Installation aus einer geringen Anzahl größerer elektrischer Verbraucher besteht, die entsprechend der prozess- oder produktionstechnischen Anforderungen zu- oder abgeschaltet werden müssen. Zur Gewährleistung eines reibungslosen Produktionsprozesses ist es für den Stromkunden wünschenswert, die Verbraucher, die einer zeitkritischen Prozesssteuerung unterliegen, zu jedem beliebigen Zeitpunkt für eine beliebige Dauer zuschalten zu können. Es resultiert ein Lastgang, der im Extremfall zwischen Null und der Summe der Nennleistungen aller installierten Einzelverbraucher schwanken kann. Dies steht jedoch im Widerspruch zu dem genannten Interesse des EVUs nach einer Vergleichmäßigung des Energiebezugs.
Weiterhin ist beim Bezug elektrischer Energie auf Seiten des Stromkunden darauf zu achten, dass die maximale Leistungsaufnahme die Belastbarkeit des Anschlusses an das Versorgungsnetz nicht überschreitet. Die Anschlussbelastbarkeit wird von den installierten Leitungen, insbesondere von deren Leitungsquerschnitten, sowie durch die Nennleistung eventuell vorhandener Abspanntransformatoren beschränkt. Die ggf. notwendige Überwachung und Kontrolle der Gesamtleistungsaufnahme erfolgt hier im Gegensatz zur abrechnungsrelevanten Mittelwertbildung über die Viertelstundenintervalle anhand der Momentanleistung und liegt hauptsächlich im Interesse des Stromkunden selbst, da dieser eine Beschädigung seiner eigenen Anlagen durch zu große Ströme zu verhindern sucht. Aus Sicht des EVUs stellt diese Beschränkung der Leistungsaufnahme eines Stromkunden auf die Maximalbelastbarkeit des betreffenden Anschlusses hingegen nur einen kleinen Schritt in Richtung der angestrebten gleichmäßigen Gesamtleistungsaufnahme dar. Einerseits werden zwar auf diese Weise Lastspitzen über dieser Maximalbelastbarkeit des Kundenanschlusses gänzlich verhindert, andererseits kann der Lastgang der Installation des Kunden jedoch nach wie vor zwischen diesem Maximalwert und Null schwanken.
Als drittes angestrebtes Ziel des Stromkunden ist schließlich die Optimierung bzw. Senkung der anfallenden Kosten für die elektrische Energie zu nennen. Dies ist zu erreichen, indem die von der Preispolitik des EVUs vorgegebenen Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Da sich die elektrischen Energiekosten in den genannten üblichen Tarifstrukturen aus verbrauchsabhängigen und leistungsabhängigen Anteilen zusammensetzen, ergeben sich hier zwei Ansatzpunkte für eine solche Kostenoptimierung [Gossen 03].
Der verbrauchsabhängige Anteil der Stromrechnung lässt sich minimieren, indem die produktionstechnisch erforderliche Energiemenge auf ein Minimum reduziert wird. Dies kann

durch innerbetriebliche effizienzsteigernde Maßnahmen wie z.B. die Optimierung von Produktionsprozessen oder die Verwendung energiesparender Anlagen erreicht werden. Sind alle derartigen Maßnahmen ausgeschöpft, so bleibt kein weiterer Spielraum zur Senkung der verbrauchsabhängigen elektrischen Energiekosten, da zur Herstellung bestimmter Produkte immer eine gewisse Mindestmenge an Energie erforderlich ist, die sich nicht weiter reduzieren lässt.
Eine weitere Optimierung der gesamten elektrischen Energiekosten ist dann nur noch über die Reduktion des leistungsabhängigen Kostenanteils möglich. Dieser wird umso geringer, je kleiner die maximale während der Vertragslaufzeit bezogene Viertelstundenleistung bzw. das eingehaltene Leistungslimit ist. Der theoretische, kleinstmögliche Wert dieser Leistung ergibt sich durch Division der minimal im Vertragszeitraum erforderlichen Energiemenge durch die Dauer der Vertragslaufzeit. Dies entspricht einem konstanten Lastgang bei genau diesem Minimalwert über die gesamte Abrechnungsdauer. Der sich für diesen Leistungswert ergebende Bezugspreis stellt damit auch das Optimum der für den jeweiligen Stromkunden erreichbaren Reduktion des leistungsabhängigen Stromkostenanteils dar. Gleichzeitig resultiert ein solcher konstanter Lastgang in der größtmöglichen Anzahl an Vollbenutzungsstunden, so dass das EVU bei Sondervertragskunden ggf. noch einen weiteren Leistungspreisnachlass gewährt. Es gilt also aus wirtschaftlichen Erwägungen auf Seiten des Stromkunden, eine Vergleichmäßigung des Lastgangs herbeizuführen, obwohl dies im Widerspruch zu den zuvor genannten produktionstechnischen Zielsetzungen steht. So wird wie zuvor bereits beschrieben auch hier eine Zielsetzung des EVUs über die Tarifgestaltung indirekt zur Motivation für den betreffenden Stromkunden.
Zwischen einer effizienten und unterbrechungsfreien Produktion und der gleichzeitigen Optimierung der elektrischen Energiekosten entsteht für den Stromkunden der Zielkonflikt, einerseits seine elektrischen Verbraucher und Anlagen ausschließlich nach produktionstechnischen Anforderungen zuschalten zu können und andererseits einen möglichst schwankungsfreien Lastgang zu realisieren. Der anzustrebende Kompromiss besteht darin, diejenigen Verbraucher, deren Energiebezüge ohne Beeinträchtigung oder gar Unterbrechung des Produktionsprozesses kurzfristig verschoben werden können, zu identifizieren. Erfahrungsgemäß eignen sich hierzu wie bereits erwähnt am besten solche Aggregate, die eine gewisse Speicher- oder Vorhaltefunktion haben. Mittels geeigneter Verschiebung der Zuschaltzeitpunkte bzw. gezieltem Abschalten der in Frage kommenden Verbraucher lassen sich Lastspitzen vermeiden und ein gleichmäßigerer Lastgang der Gesamtanlage herbeiführen. Die Durchführung dieser Schalthandlungen soll dabei jedoch möglichst geringfügig und unmerklich geschehen, so dass das Ziel eines unbeeinträchtigten Betriebs der Anlage gleichzeitig auch zu einem möglichst hohen Grad erreicht wird.

Elektrische Lastkontrolle beschäftigt sich mit der optimalen Planung und Durchführung der notwendigen Schalthandlungen auf der Grundlage der Beobachtung der momentanen Gesamtleistungsaufnahme der elektrischen Anlage des Stromkunden. Dabei werden die zuvor beschriebenen Zielsetzungen berücksichtigt, nämlich die Begrenzung dieser Leistungsaufnahme auf die maximale Belastbarkeit des Anschlusses einerseits und andererseits die Optimierung der Schalthandlungen bei gleichzeitiger Wahrung der produktionstechnischen und der wirtschaftlichen Interessen. Letzteres beinhaltet zunächst die Begrenzung der von der Anlage aufgenommenen Viertelstundenleistung auf das vertraglich vereinbarte Leistungslimit ohne dabei den Produktionsablauf über das tolerierbare Maß hinaus zu beeinträchtigen.

Weiterhin sollte bei optimaler Lastkontrolle die Viertelstundenleistung für die überwiegende Anzahl der Messperioden möglichst dicht an das Leistungslimit heranreichen, da somit der anzustrebende gleichmäßige Lastgang als gut erreicht angesehen werden kann. Ist dies nicht der Fall, so ist hier eventuell noch ein Optimierungspotential vorhanden. Dieses gilt es mit der jeweiligen Lastkontrollstrategie auszuschöpfen, z.B. durch veränderte zeitliche Aufteilung der Energiebezüge einzelner Verbraucher, soweit dies unter produktions- und prozesstechnischen Bedingungen realisierbar erscheint. Auf diese Weise ist es ggf. möglich, für zukünftige Vertragszeiträume ein verringertes Leistungslimit mit dem EVU zu vereinbaren, womit unmittelbar auch eine weitere Kosteneinsparung einhergeht. Für den aktuellen Abrechnungszeitraum können jedoch auf diese Weise keine Kosten eingespart werden, da der leistungsabhängige Bereitstellungspreis in jedem Fall mindestens entsprechend des vereinbarten Leistungslimits berechnet wird, auch wenn dieses für keine Messperiode innerhalb der Vertragslaufzeit erreicht wird.
Zu beachten ist, dass eine häufige Unterschreitung des Leistungslimits durch die Viertelstundenleistungen sich auch dann ergeben kann, wenn die Aufteilung der Gesamtlast der elektrischen Anlage eines Stromkunden auf die einzelnen Verbraucher sehr ungleichmäßig ist und/oder besonders zeitkritische Prozesse an Verbrauchern mit besonders großer Leistungsaufnahme stattfinden, die nicht oder nur geringfügig durch die Lastkontrollstrategie zu beeinflussen sind. In einem solchen Fall ist kein weiteres Optimierungspotential im Sinne einer möglichen Reduktion des Leistungslimits zu erwarten. Vielmehr sollte hier für eine effiziente Produktion mittels der angewandten Lastkontrolle angestrebt werden, die dem vereinbarten Leistungslimit entsprechende Energiemenge in den Messperioden größter Leistungsaufnahme auch möglichst vollständig zu beziehen.
Über die genannten Erwägungen hinaus ist darauf zu achten, dass durch die verfolgte Lastkontrollstrategie nicht zu viele Schalthandlungen vorgenommen werden, die sich im Nachhinein als nicht notwendig herausstellen. Diese belasten einerseits die entsprechenden Lastschalter, die meist nur für eine bestimmte Anzahl Schaltzyklen ausgelegt sind, unnötig und können andererseits dazu führen, dass die verfügbare Energiemenge nicht ausgeschöpft wird. Grundsätzlich ist also diejenige Lastkontrollstrategie vorzuziehen, welche die o.g. Ziele mit der kleinstmöglichen Anzahl an Schalthandlungen erreicht.
Diese Aufgabenstellungen elektrischer Lastkontrolle lassen sich grundsätzlich manuell oder automatisiert durchführen. In jedem Fall ist die momentane Gesamtleistungsaufnahme der elektrischen Anlage des Stromkunden zu beobachten und gleichzeitig auch die Viertelstundentaktung zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, bei dieser Beobachtung das selbe Viertelstundenraster heranzuziehen, das auch bei der Abrechnung der elektrischen Energiekosten durch das EVU zu Grunde gelegt wird. Wie zuvor bereits gezeigt wurde, hängt das Ergebnis der Viertelstunden-Durchschnittsberechnung und damit insbesondere auch die Beurteilung, ob das Leistungslimit eingehalten wird, unmittelbar mit der gewählten Viertelstundentaktung zusammen. Daher überträgt das EVU mit Beginn einer jeden Messperiode einen so genannten Synchronimpuls an den betreffenden Stromkunden, um diesem damit die Beobachtung der abrechnungstechnisch relevanten Viertelstundenleistung zu ermöglichen. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme zwischen zwei aufeinander folgenden Synchronimpulsen entspricht dabei der Viertelstundenleistung, die mit Hilfe der angewandten elektrischen Lastkontrolle unterhalb des Leistungslimits zu halten ist.
Die manuelle Durchführung der Lastkontrolle ist als aufwändig und zeitintensiv einzuschätzen, da die Bediener einzelner Anlagen so nicht nur für einen reibungsfreien Produktionsablauf zu sorgen hätten, sondern gleichzeitig auch ständig abwägen müssten, ob ein Zuschal-

ten der Anlagen ihres Zuständigkeitsbereiches unter der momentanen Lastsituation überhaupt möglich bzw. sinnvoll ist. Des Weiteren ist bei einer großen Anzahl solcher Einzelverbraucher davon auszugehen, dass aufgrund der einzelnen, individuellen Entscheidungen des jeweiligen Bedienpersonals keine optimale Lastkontrolle erreicht werden kann. Es ist daher anzustreben, die Lastkontrolle automatisiert durchzuführen, was auch der Zielsetzung einer möglichst unmerklichen Beeinflussung der Energiebezüge einzelner Verbraucher durch die Lastkontrolle entgegenkommt. Werden die zur automatisierten Lastkontrolle notwendigen Algorithmen jedoch in die Steuerungs- und Regelungssysteme der Einzelverbraucher integriert, so ist ähnlich wie bei der manuellen Lastkontrolle aufgrund der nicht die gesamte Anlage berücksichtigenden Beobachtung und Planung der Lastsituation nicht mit einer optimalen Lösung zu rechnen.
Die vielversprechendste und am häufigsten anzutreffende Lösung sieht eine zentrale Lastkontrollanlage (LKA) in der Installation des Stromkunden vor. Diese LKA beobachtet während der Laufzeit die elektrischen Zähl- und Synchronimpulse zur Bestimmung der Viertelstundenleistung und der insgesamt von allen eingeschalteten Verbrauchern des Stromkunden momentan aufgenommenen Leistung. Auf Basis dieser Messwerte lassen sich nun automatisiert nach fest vorgegebenen Prioritäten die Energiebezüge der Verbraucher so steuern, dass den zuvor genannten lastkontrolltechnischen Anforderungen genügt wird.
Die Anschaffung und der Betrieb einer solchen Lastkontrollanlage erscheint vor dem Hintergrund, dass damit eine Optimierung der elektrischen Energiekosten erzielt werden kann, für den Stromkunden durchaus wirtschaftlich. Lastkontrollanlagen sind unter diesem Gesichtspunkt in gewisser Weise auch mit den zuvor erwähnten Anlagen zur Blindstromkompensation und Flickervermeidung vergleichbar, die ebenfalls vom EVU unerwünschte Effekte vermindern und damit dem Stromkunden einen günstigeren Energiebezug ermöglichen.

Im Folgenden werden verschiedene Lastkontrollalgorithmen vorgestellt, welche in herkömmlichen Lastkontrollanlagen Anwendung finden. Darüber hinaus werden die speziellen Gegebenheiten bezüglich der elektrischen Lasten in einem Elektrostahlwerk am Beispiel des in dieser Arbeit betrachteten Werkes beschrieben und die sich daraus ergebenden Defizite bei der Verwendung dieser herkömmlichen Algorithmen für die Lastkontrolle in Elektrostahlwerken dargelegt.

4.2 Herkömmliche Lastkontrollalgorithmen

Im Laufe der Entwicklung von Lastkontrollalgorithmen haben sich verschiedene Verfahren unterschiedlicher Komplexität herausgebildet. In jedem dieser Verfahren finden ein oder mehrere der zuvor genannten lastkontrolltechnischen Ziele besondere Beachtung. Somit kann aus der Reihe der verfügbaren Verfahren dasjenige ausgewählt werden, welches die Ziele, die aufgrund der technischen Beschaffenheit der elektrischen Anlage des jeweiligen Stromkunden zu berücksichtigen sind, besonders gut erreicht.
Zur Einhaltung des Leistungslimits ohne gleichzeitige Optimierung des Lastbezugs eignen sich so genannte Not-Aus-Zähler, Vorrangschaltungen, und Lastverriegelungen. Not-Aus-Zähler stellen dabei die denkbar einfachste Methode dar. Hier wird anhand der vom EVU übertragenen Synchronimpulse die in der aktuellen Messperiode bereits bezogene elektrische Energie aufsummiert. Sobald diese Summe den durch das Viertelstunden-Leistungslimit vorgegebenen Grenzwert erreicht, werden mittels Lastschützen alle elektrischen Verbraucher der angeschlossenen Anlage abgeschaltet. Die erneute Zuschaltung

erfolgt erst mit dem Beginn der nächsten Messperiode, wenn unter Einhaltung des Leistungslimits wieder Energie beziehbar ist. Die Problematik bei der Verwendung dieser Not-Aus-Zähler besteht darin, dass ggf. nicht alle Verbraucher abschaltbar sind, sondern einige in Form einer Grundlast ständig in Betrieb sein müssen. Der Energiebezug dieser Grundlastverbraucher kann in diesem Fall trotz der Abschaltung aller anderen Verbraucher durch den Not-Aus-Zähler dennoch dazu führen, dass das Leistungslimit in der betreffenden Messperiode überschritten wird. Der Grenzwert für die Auslösung der Not-Aus-Zähler ist also im Allgemeinen, abhängig von der bestehenden Grundlast, etwas niedriger anzusetzen als das tatsächliche Leistungslimit. Weiterhin führt die Abschaltung der Verbraucher durch Not-Aus-Zähler unmittelbar dazu, dass die betroffenen Anlagen ohne für die Benutzer erkennbare Vorwarnung plötzlich für die Zeit bis zum Beginn der nächsten Messperiode nicht mehr zur Verfügung stehen. Diese Art der Lastkontrolle ist daher als alleinige Lösung nur für solche elektrischen Anlagen einzusetzen, wo ein ständiger unterbrechungsfreier Betrieb nicht unbedingt erforderlich ist. Darüber hinaus eignen sich Not-Aus-Zähler aufgrund ihrer einfachen und damit nahezu ausfallsicheren Struktur als übergeordnete Rückfalllösung für komplexere Lastkontrollanlagen, die bei möglichem Versagen dieser Anlagen dennoch die Einhaltung des Leistungslimits gewährleistet.
Im Gegensatz zu den Not-Aus-Zählern wird bei der Lastkontrolle durch Vorrangschaltungen und Lastverriegelungen nicht auf die Viertelstundentaktung Rücksicht genommen. Statt dessen werden Schalthandlungen so vorgenommen, dass die momentane Leistungsaufnahme der angeschlossenen elektrischen Anlage ständig unter dem Leistungslimit bleibt. Auf diese Weise werden zwangsläufig auch die Viertelstundenleistungen das Leistungslimit nicht überschreiten. Vorrangschaltungen basieren dabei auf dem Funktionsprinzip, dass von mehreren elektrischen Verbrauchern mit elektrischen Anschlussleistungen in ähnlichen Größenordnungen zu jedem beliebigen Zeitpunkt immer nur einer in Betrieb sein kann. Jedem dieser Verbraucher ist dabei eine Priorität zuzuordnen, die den Vorrang gegenüber den anderen Verbrauchern beschreibt. Ist ein Verbraucher hoher Priorität in Betrieb, so hat dieser Vorrang vor den Verbrauchern niedrigerer Priorität und diese können nicht eingeschaltet werden. Im umgekehrten Fall würde der Betrieb des niedriger priorisierten Verbrauchers unterbrochen, sobald und solange ein vorrangiger Verbraucher zugeschaltet wird.

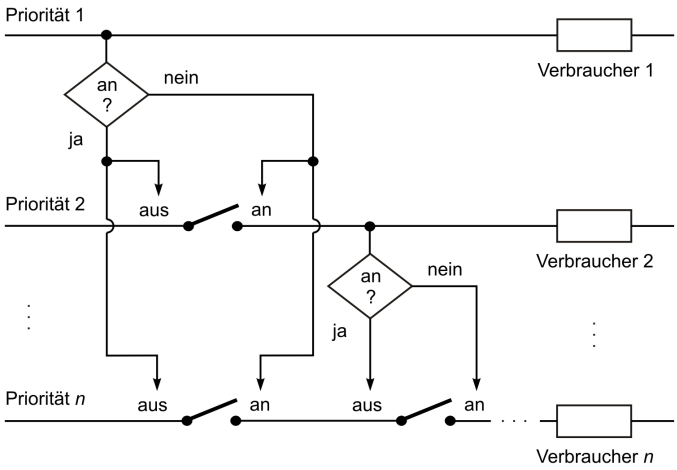


Bild 4.3: Prinzipschaltung einer Vorrangschaltung nach [Rehm 99]

Dies ist in **Bild 4.3** als beispielhafte Prinzipschaltung dargestellt und lässt sich durch entsprechende Schützschaltungen realisieren. Da somit immer nur einer der vorhandenen elekt-

rischen Verbraucher eingeschaltet ist, wird mittels dieser Strategie auch die maximale Leistungsaufnahme auf den Wert der Nennleistung des größten angeschlossenen Verbrauchers begrenzt. Diese Lastkontrollstrategie ist hauptsächlich für den Einsatz bei einer sehr geringen Anzahl von Einzelverbrauchern geeignet, solange es unter produktionstechnischen und anderweitigen Bedingungen ausreichend erscheint, zu jedem Zeitpunkt nur einen Verbraucher betreiben zu können. Als Lastkontrollanlage in einem industriellen Werk, das aus vielen Einzelverbrauchern mit komplex miteinander verknüpften Fahrdiagrammen besteht, ist diese Strategie dagegen weniger geeignet.
Die Methodik der Lastverriegelung sieht ebenfalls eine Priorisierung der einzelnen elektrischen Verbraucher vor. Allerdings ist es hier möglich, auch mehrere Verbraucher gleichzeitig zu betreiben. Die Verriegelung der jeweils niedriger priorisierten Verbraucher durch den Energiebezug eines vorrangigen Verbrauchers erfolgt hier in Abhängigkeit von der momentanen Leistungsaufnahme dieses Verbrauchers. **Bild 4.4** zeigt eine schematische Darstellung (vgl. [Rehm 99]).

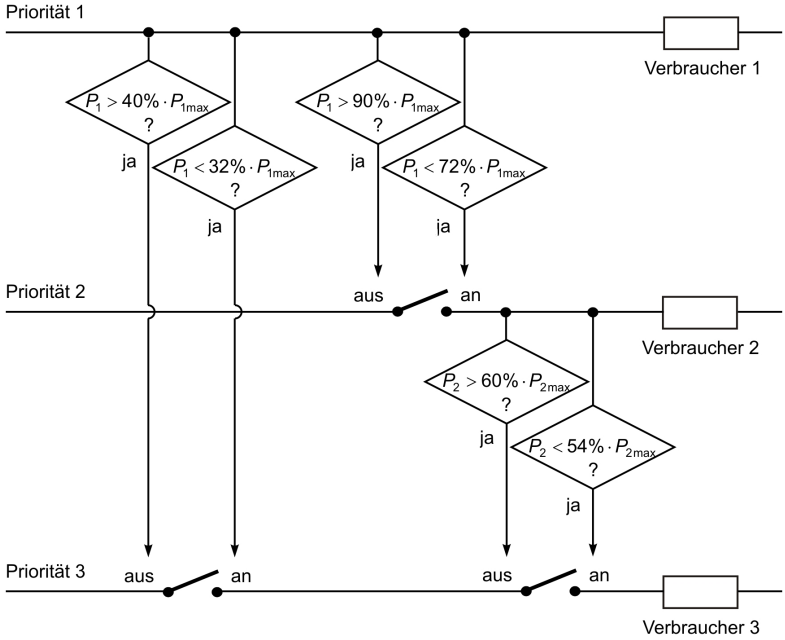


Bild 4.4: Prinzipschaltung einer Lastverriegelung mit exemplarischen relativen Schaltschwellen nach [Rehm 99]

Überschreitet die aktuelle Leistungsaufnahme eines hoch priorisierten Verbrauchers einen oberen Schwellwert, so werden die Verbraucher niedrigerer Priorität verriegelt und können nicht mehr zugeschaltet werden. Erst wenn die aufgenommene Leistung des vorrangigen Verbrauchers wieder unter einen unteren Schwellwert abfällt, wird die Verriegelung der untergeordneten Verbraucher aufgehoben. Die Schaltschwellen sind dabei so zu wählen, dass die Summe aller Leistungsaufnahmen in jedem Fall, d.h. mit oder ohne aktive Verriegelungen, unterhalb eines einzustellenden Grenzwertes, z.B. des Leistungslimits, bleibt. Weiterhin ist es sinnvoll, die Schwellenwerte zwischen Ver- und Entriegelung eines niedriger priorisierten Verbrauchers in einem gewissen Abstand, also hysteresebehaftet, festzulegen. Würden obere und untere Schaltschwelle auf den gleichen Wert gesetzt, so würde bei einer um diesen einen Wert schwankenden Leistungsaufnahme des verriegelnden Verbrauchers zu häufig hin- und hergeschaltet. Auch diese Lastkontrollstrategie ist als Schützschaltung aufbaubar

und stellt eine vergleichsweise einfache Lösung für kleinere Industriebetriebe mit wenigen elektrischen Einzelverbrauchern dar. Im Gegensatz zur Vorrangschaltung können hier zwar mehrere Verbraucher gleichzeitig in Betrieb sein, doch durch die starre Vorgabe der Grenzwerte ist eine dynamische Anpassung an produktions- oder prozesstechnische Gegebenheiten nicht möglich.

Die bisher vorgestellten Ansätze berücksichtigen jeweils ausschließlich die Einhaltung des Leistungslimits, nicht jedoch die gleichzeitige Optimierung des Lastbezugs im Hinblick auf einen möglichst vollständigen Bezug der in den Messperioden zur Verfügung stehenden elektrischen Energie. Dieses Ziel wird in den Algorithmen der so genannten Maximumwächter-Lastkontrollanlagen mit berücksichtigt, die sich daher für die Anwendung in Großbetrieben mit vielen, z.T. in Betriebsdauer und Zuschaltzeitpunkten voneinander abhängigen elektrischen Verbrauchern eignen. Durch die im Vergleich zu den zuvor genannten einfachen Lösungen generell erweiterte Parametrierbarkeit können Maximumwächter besser an produktionstechnische Anforderungen angepasst werden und somit die Lastkontrolle besser ausführen, d.h. mit weniger störenden Eingriffen in z.B. zeitkritische Abläufe.
Den Maximumwächtern liegt die Beobachtung des so genannten Leistungsdreiecks zugrunde. Dies ist eine graphische Darstellung der in der aktuellen Messperiode bereits bezogenen Energie im Vergleich zu der Energie, die zu jedem Zeitpunkt bei genauer Einhaltung des Leistungslimits maximal bereits bezogen sein darf. Der zeitliche Verlauf dieses maximalen Energiebezugs ist eine Gerade, die mit Beginn jeder Messperiode bei Null beginnt und mit einer dem Leistungslimit entsprechenden Steigung im Laufe der Viertelstunde auf den maximalen zulässigen Energiebezug pro Messperiode ansteigt. Der besseren Anschaulichkeit halber werden die Energiebezüge in dieser Darstellung nicht in kWh aufgetragen, sondern als auf eine Viertelstunde skalierte Leistungswerte in kW bzw. MW. Auf diese Weise kann zu jedem Zeitpunkt direkt abgelesen werden, welcher Viertelstunden-Durchschnittsleistung die bis zu diesem Moment bereits bezogene Energiemenge entspricht. Dies erlaubt gleichzeitig einen direkten Vergleich mit dem einzuhaltenden Leistungslimit.

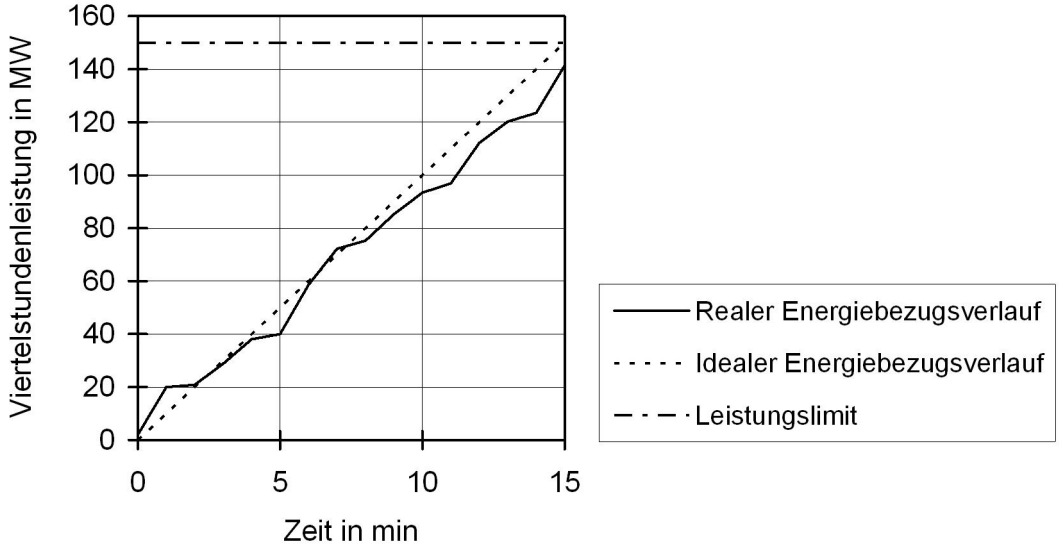


Bild 4.5: Leistungsdreieck mit fiktivem Energiebezugsverlauf, idealem Energiebezugsverlauf und Leistungslimit

Bild 4.5 zeigt ein exemplarisches Leistungsdreieck, in dem ein fiktiver Energiebezugsverlauf, die Kurve des unter Einhaltung des Leistungslimits idealen Energiebezugsverlaufs und die Grenzlinie des Leistungslimits dargestellt sind.
Basierend auf dieser Leistungsbeobachtung haben sich zwei wesentliche Lastkontrollalgorithmen etabliert [Jorge 93], von denen zunächst das Verfahren der idealen Lastkurve näher betrachtet wird. Bei dieser Vorgehensweise wird laufend die tatsächliche Lastkurve mit der idealen, d.h. dem vorgenannten idealen Energiebezugsverlauf verglichen. Zu jedem Zeitpunkt t, von Beginn der jeweiligen Messperiode an betrachtet, wird anhand der bis zu diesem Moment bereits bezogenen elektrischen Energie $W_{\mathrm{elakt}}(t)$ ein Leistungswert $P_{\mathrm{elakt}}(t)$ zu

$$P_{\mathrm{elakt}}(t) = \frac{W_{\mathrm{elakt}}(t)}{15\,\mathrm{min}} \tag{4.1}$$

berechnet, der somit die entsprechende Viertelstunden-Durchschnittsleistung widerspiegelt. Überschreitet dieser Leistungswert die ideale Lastkurve um mehr als eine parametrierbare maximal zulässige Abweichung $\Delta P_{\mathrm{eloben}}$, so werden elektrische Verbraucher abgeschaltet, um eine Überschreitung des Leistungslimits am Ende der Messperiode zu verhindern. Erst wenn der Energiebezugsverlauf mit weiterem Voranschreiten der Zeit in der Bezugsperiode wieder unter den um einen ebenso konfigurierbaren Grenzwert $\Delta P_{\mathrm{elunten}}$ reduzierten Momentanwert der idealen Lastkurve absinkt, werden die zuvor abgeschalteten Verbraucher wieder freigegeben. Zur Veranschaulichung zeigt **Bild 4.6** den zeitlichen Verlauf einer Messperiode mit beispielhaften Verläufen der tatsächlichen Energiebezugskurve und der idealen Lastkurve mit exemplarischen oberen und unteren Grenzwerten wobei die Zeitpunkte, zu denen eine entsprechende Lastkontrollanlage Verbraucher abschalten oder wieder freigeben würde, als $t_{\mathrm{ab}n}$ bzw. $t_{\mathrm{frei}n}$ gekennzeichnet sind.

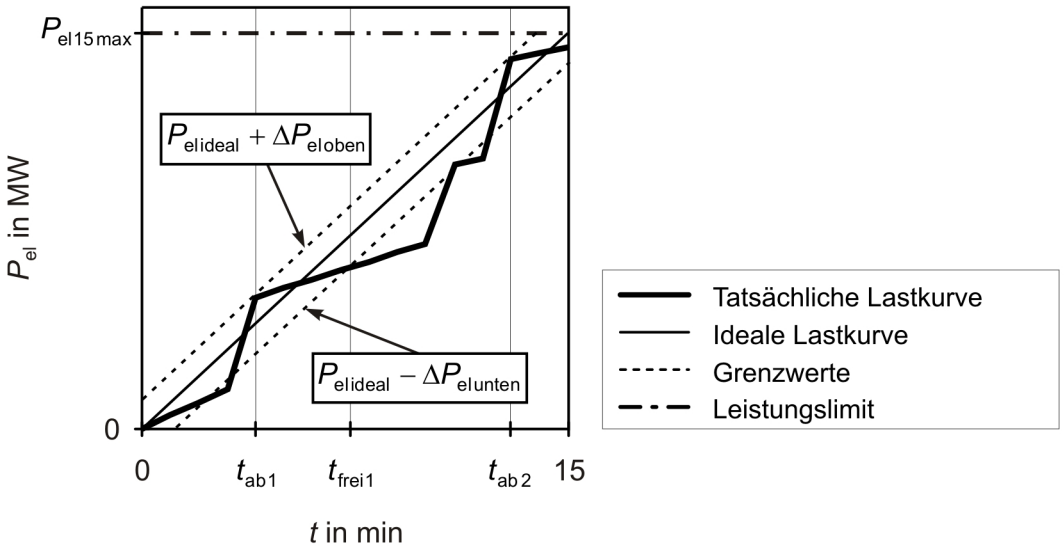


Bild 4.6: Beispielhafter Verlauf der idealen und tatsächlichen Lastkurve für eine Maximumwächter-Lastkontrollanlage auf Prinzip der idealen Lastkurve

Dies ist nicht mit der Arbeitsweise der bereits vorgestellten Vorrangschaltungen und Lastverriegelungen zu verwechseln, die durch ihr Funktionsprinzip die aktuelle Leistungsaufnahme der angeschlossenen Anlage ständig auf das Leistungslimit begrenzen. Bei der Methodik der

idealen Lastkurve kann es im Gegensatz dazu ggf. auch über längere Zeiträume zu einer momentanen Leistungsaufnahme, die über dem Leistungslimit liegt, kommen. Dies ist in oben stehendem Diagramm beispielsweise in zwei Abschnitten zwischen den Zeitpunkten t_{frei1} und t_{ab2} zu erkennen, wo die Steigung der tatsächlichen Lastkurve deutlich größer ist als die dem Leistungslimit entsprechende Steigung der idealen Lastkurve.
Dies stellt eine Verbesserung gegenüber den zuvor genannten Lastkontrolllösungen dar, weil so ein neben der Einhaltung des Leistungslimits durch die Lastkontrolle ebenfalls angestrebter kompletter Bezug der in jeder Messperiode zur Verfügung stehenden Energie eher ermöglicht wird. Die in Zeiträumen niedriger Leistungsaufnahme nicht bezogene Energie kann durch entsprechende Zeiträume großer Leistungsaufnahme, die ggf. sogar größer als das Leitungslimit sein kann, aufgeholt werden, was mit den einfachen Vorrangschaltungen und Lastverriegelungen nicht möglich ist.
Die Implementation einer Maximumwächter-Lastkontrollanlage auf Basis der idealen Lastkurve ist dagegen komplizierter als die der vorgenannten Lösungen. Einfache Schützschaltungen reichen hier nicht aus, statt dessen wird der entsprechende Algorithmus auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) oder einem Embedded PC ausgeführt, deren Schaltausgänge die Lastschalter ansteuern, mit denen die einzelnen Verbraucher oder Verbrauchergruppen ab- und wieder zugeschaltet werden können. Trotz dieser gesteigerten Komplexität auf der einen Seite erlauben diese Art von Lastkontrollanlagen auf der anderen Seite eine sehr viel bessere Anpassung an die produktions- und prozesstechnischen Bedingungen der nachgeschalteten elektrischen Verbraucher. So können u.a. Prozessablauffolgen berücksichtigt werden, indem für bestimmte Verbraucher Mindestlaufzeiten oder auch Mindestabschaltdauern parametriert werden. Darüber hinaus ist auch die Prioritätenvergabe für die einzelnen Lasten sehr viel variabler zu gestalten, es können Lastgruppen gleicher Priorität definiert werden, die dann bei ausreichender freier Leistung im Ringverfahren zugeschaltet werden können, d.h. bei der ersten entsprechenden Gelegenheit der erste Verbraucher, bei der zweiten der zweite usw., solange bis der erste Verbraucher wieder an der Reihe ist. Über längere Zeiträume gesehen ergibt sich so eine gleichmäßige Nutzung der entsprechenden Lasten, die ebenfalls mit den vorgenannten Lösungen nicht zu erreichen wäre.

Die zweite, auf fortwährender Beobachtung der bereits bezogenen und noch zur Verfügung stehenden elektrischen Energie mittels des Leistungsdreiecks basierende Gruppe von Lastkontrollalgorithmen sind die prognosebasierten Maximumwächter. Diese bedienen sich zur Koordination von Schalthandlungen einer Prognose des zu erwartenden Leistungsbezugs für die aktuelle Viertelstunde. Die Prognose der bis zum Ende der Messperiode erwarteten mittleren Leistungsaufnahme wird während der Laufzeit aufgrund der bereits bezogenen Energie und der momentanen Leistungsaufnahme ständig aktualisiert. Die zugrunde liegenden Prognosealgorithmen sind dabei unterschiedlicher Natur, wobei jedoch hauptsächlich einfache Mittelungsverfahren wie z.B. die exponentielle Mittelung Verwendung finden. Die Extrapolation des zu erwartenden Viertelstunden-Leistungsmittelwerts aus dem in der aktuellen Messperiode beobachteten Energiebezugsverlauf bietet den Vorteil, dass durch den Vergleich mit dem einzuhaltenden Leistungslimit eine Leistungsdifferenz berechnet werden kann. Anhand der Visualisierung mittels des Leistungsdreiecks ist so direkt ersichtlich, ob bei Einhaltung der prognostizierten Leistungsaufnahme bis zum Ende der Viertelstunde das Leistungslimit genau erreicht wird oder ob die aktuelle Leistungsaufnahme erhöht bzw. verringert werden muss, damit die zur Verfügung stehende Energie komplett bezogen werden kann. Ziel einer optimalen Lastkontrolle bei einem prognosebasierten Maximumwächter ist es also, die mo-

mentane Leistungsaufnahme der angeschlossenen elektrischen Anlage durch Schalthandlungen so zu beeinflussen, dass sich für die Leistungsdifferenz am Ende der Messperiode eine Prognose von genau 0 kW ergibt.
Um dies zu erreichen, ist die momentane Leistungsaufnahme der elektrischen Anlage ggf. um eine gewisse Korrekturleistung zu verändern. Diese teilt sich in die Anteile $P_{\mathrm{elkorr\,P}}$ und $P_{\mathrm{elkorr\,W}}$ auf. Ersterer Anteil gibt die Differenz wieder, die in der Form

$$P_{\mathrm{elkorr\,P}} = P_{\mathrm{el15max}} - P_{\mathrm{elmom}} \tag{4.2}$$

zwischen dem Leistungslimit P_{el15max} und der momentanen Leistungsaufnahme P_{elmom} besteht. Die Momentanleistung ist dabei nicht gleich dem zum Zeitpunkt t_{korr} im Leistungsdiagramm aufgetragenen Wert der tatsächlichen Lastkurve $P_{\mathrm{elakt}}(t_{\mathrm{korr}})$, sondern entspricht der Steigung dieser Kurve in diesem Moment. Wenn die Momentanleistung um diese Differenz $P_{\mathrm{elkorr\,P}}$ angepasst wird, ergibt sich eine neue Momentanleistung, die gleich dem Leistungslimit ist. Die angepasste Lastkurve würde also ab dem Zeitpunkt der Korrektur mit der selben Steigung weiter verlaufen wie die ideale Lastkurve. Damit ist die genaue Einhaltung des Leistungslimits am Ende der Messperiode jedoch nur dann sichergestellt, wenn zum Zeitpunkt der Korrektur tatsächliche und ideale Lastkurve den selben Wert haben.
Da von dieser Voraussetzung nicht ausgegangen werden kann, ist zum jeweils aktuellen Korrekturzeitpunkt t_{korr} die Differenz $\Delta W_{\mathrm{elakt}}(t_{\mathrm{korr}})$ zwischen der tatsächlich bereits bezogenen Energie und derjenigen, die bei idealem Lastverlauf zu diesem Zeitpunkt verbraucht sein dürfte, zu betrachten und durch eine entsprechende weitere Korrektur der Momentanleistung auszugleichen. Dies geschieht durch den zweiten Anteil $P_{\mathrm{elkorr\,W}}$, der die Steigung der angepassten Lastkurve noch einmal so verändert, dass diese Kurve am Ende der Viertelstunde genau mit der idealen Lastkurve im Leistungslimit zusammentrifft. Allgemein ist $\Delta W_{\mathrm{elakt}}(t)$ in der Darstellungsweise des Leistungsdreiecks proportional zu der Differenz $\Delta P_{\mathrm{elakt}}(t)$ der Lastkurven zum Zeitpunkt *t* und es besteht folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\mathrm{elakt}}(t) &= W_{\mathrm{elideal}}(t) - W_{\mathrm{elakt}}(t) \\ &= \left(P_{\mathrm{elideal}}(t) - P_{\mathrm{elakt}}(t)\right) \cdot 15\,\mathrm{min} = \Delta P_{\mathrm{elakt}}(t) \cdot 15\,\mathrm{min}. \end{aligned} \tag{4.3}$$

Wird diese Energiedifferenz auf die zum Korrekturzeitpunkt t_{korr} in der Viertelstunde verbleibende Restzeit bezogen, so ergibt sich $P_{\mathrm{elkorr\,W}}$ zu

$$P_{\mathrm{elkorr\,W}} = \frac{\Delta W_{\mathrm{elakt}}(t_{\mathrm{korr}})}{15\,\mathrm{min} - t_{\mathrm{korr}}} = \Delta P_{\mathrm{elakt}}(t_{\mathrm{korr}}) \cdot \frac{15\,\mathrm{min}}{15\,\mathrm{min} - t_{\mathrm{korr}}}. \tag{4.4}$$

Um das Leistungslimit genau zu erreichen, muss die momentane Leistungsaufnahme also insgesamt um

$$P_{\mathrm{elkorr}} = P_{\mathrm{elkorr\,W}} + P_{\mathrm{elkorr\,P}} \tag{4.5}$$

angepasst werden. Aufgrund der in oben stehenden Formeln gewählten Vorzeichen resultiert eine positive Korrekturleistung z.B. für den Fall, dass die aktuelle Leistungsaufnahme unter dem Leistungslimit oder die bis zum aktuellen Zeitpunkt bezogene Energie unterhalb der von

der idealen Lastkurve vorgegebenen liegt. In diesem Fall können entsprechende Lasten zugeschaltet werden. Ergibt sich dagegen eine negative Korrekturleistung, so sind Verbraucher abzuschalten.
Wie bereits erwähnt, wären die oben genannten Korrekturwerte auf die momentane Leistungsaufnahme der Anlage anzuwenden, wenn davon auszugehen ist, dass diese ohne optimierende Schalthandlungen während der in der Messperiode verbleibenden Restzeit weiter aufgenommen würde, d.h. wenn zum Zeitpunkt t_{korr} die Prognoseleistung $\tilde{P}_{el}$ gleich der Momentanleistung ist. Ist dies nicht der Fall, so müssen die Korrekturwerte entsprechend an die Prognoseleistung angepasst werden. Für diese Anpassung werden je nach verwendetem Leistungsprognoseverfahren unterschiedliche Vorgehensweisen angewandt.
Zur Veranschaulichung des prognosebasierten Maximumwächter-Algorithmus zeigt **Bild 4.7** die Verläufe der idealen, tatsächlichen und angepassten Lastkurve für eine 15-minütige Messperiode. Ab dem Zeitpunkt t_{korr} ist weiterhin die prognostizierte Leistungsbezugskurve aufgetragen, wobei hier der Einfachheit halber der Fall dargestellt wird, dass die Steigung $\tilde{P}_{el}$ dieser Kurve gleich dem bei t_{korr} vorliegenden Anstieg der tatsächlichen Lastkurve P_{elmom} ist. Der Wert dieser extrapolierten Geraden am Ende der Viertelstunde liegt um ΔP_{el15} oberhalb des Leistungslimits. Würde also die Anlage ohne Lastkontrolleingriffe weiter betrieben, so ergäbe sich eine dementsprechende Überschreitung. Der Verlauf der angepassten Lastkurve vom Zeitpunkt t_{korr} bis hin zum Ende der Viertelstunde ergibt sich, wenn der Maximumwächter auf die oben beschriebene Weise eingreift und die momentane Leistungsaufnahme der Anlage auf $P_{elmom} = \tilde{P}_{el} + P_{elkorr}$ anpasst, wobei die Lastprognose als zutreffend angenommen wird. Dies stellt einen Idealfall dar, der darin resultiert, dass das Leistungslimit am Messperiodenende genau erreicht wird, wie im Bild zu sehen ist.

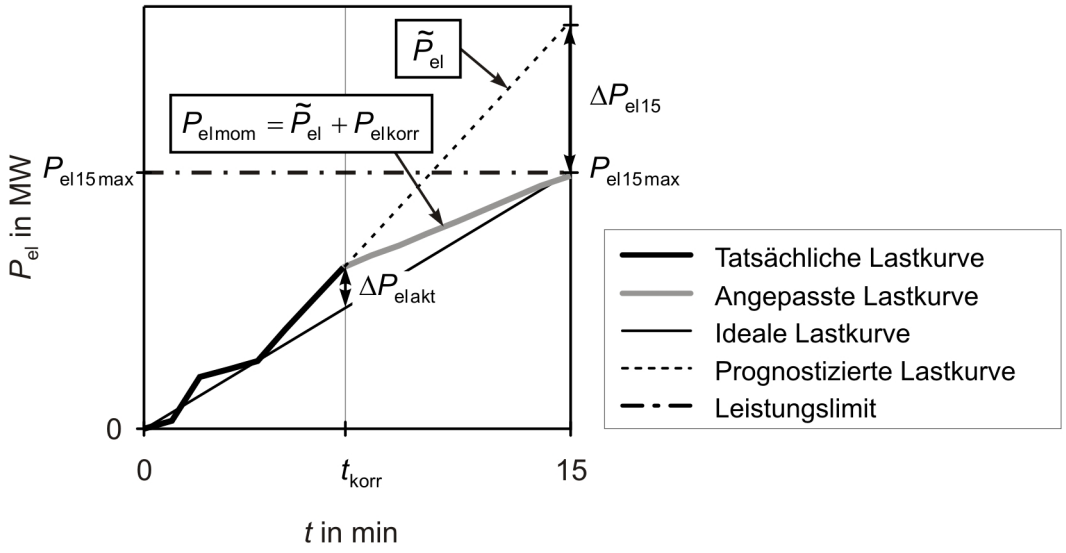


Bild 4.7: Beispielhafter Verlauf der Lastkurven für eine prognosebasierte Maximumwächter-Lastkontrollanlage

Die Implementation und Parametrierbarkeit einer solchen prognosebasierten Lastkontrollanlage entspricht im Wesentlichen der einer auf der idealen Lastkurve basierenden Anlage. Zusätzlich ist es aufgrund der hier angewandten Algorithmen jedoch möglich, Lasten nicht nur anhand der Prioritäten ab- oder zuzuschalten, sondern es können nach Berechnung der

erforderlichen Korrekturleistung Zusammenstellungen von Verbrauchern gefunden und geschaltet werden, die eine genaue Einhaltung und Ausnutzung des Leistungslimits erlauben.

Im Vergleich zeigen prognosebasierte Maximumwächter ein ruhigeres Schaltverhalten als solche auf Basis der idealen Lastkurve, wie Jorge in [Jorge 93] nachweist. Begründet wird dies damit, dass durch die Prognose des zu erwartenden Leistungsbezugs frühzeitige Schalthandlungen ausgeführt werden können, die im weiteren Verlauf der Messperiode je nach verwendetem Prognosealgorithmus nur selten zurückgenommen oder verändert werden müssen. Eine derart "vorausschauende" Einstellung der Lastsituation ist dagegen mit der Methodik der idealen Lastkurve per Definition nicht möglich, so dass hier immer ein schrittartiges und tendenziell sogar oszillierendes Schaltverhalten resultiert. Als mögliche Lösung wird die Einführung von hysteresebeaufschlagten Schaltschwellen sowie von Zeitparametern wie z.B. die zuvor bereits erwähnten Mindest-Ein- bzw. Ausschaltdauern der einzelnen Verbraucher genannt. Weiterhin zeigt Jorge, dass mit der Lastprognose generell auch eine bessere Einhaltung des Leistungslimits bei gleichzeitig möglichst vollständigem Energiebezug erreicht wird.

Damit stellt die Verwendung der prognosebasierten Maximumwächter für die meisten industriellen Anwendungsfälle eine zufriedenstellende Lösung dar. Sie erlaubt neben der Einhaltung des Leistungslimits und der bestmöglichen Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Energie auch die Optimierung der Schalthandlungen. Diese besteht zum einen darin, die entsprechenden Lastschalter möglichst wenig zu beanspruchen. Zum anderen können die notwendigen Zeiten, zu denen Verbraucher aufgrund von Lastkontrolleingriffen nicht betrieben werden können, auf ein Minimum reduziert bzw. zeitlich so verteilt werden, dass der Produktionsprozess die wenigsten Einschränkungen erfährt. Diese guten Eigenschaften sind jedoch unmittelbar auch mit der Güte der zugrunde gelegten Lastprognose verbunden, d.h. aus einer nicht zutreffenden Prognose kann auch hier ein äußerst ungünstiger Verlauf der Lastkontrolle resultieren.

4.3 Einsatz herkömmlicher Lastkontrollalgorithmen im Elektrostahlwerk

Die in dieser Arbeit näher zu betrachtenden Elektrostahlwerke stellen aufgrund ihrer hohen Anschlussleistungen von deutlich über 100 MW eine große Last für das elektrische Versorgungsnetz dar. Die bereits erwähnten Netzrückwirkungen, wie Blindströme, Flicker und höherfrequente Störungen, die von dieser Art Anlagen ausgehen, sind nicht zu vernachlässigen und erfordern den Betrieb leistungsfähiger Kompensationsanlagen auf Seiten der Betreiber.
Darüber hinaus sind, angesichts der hohen Anschlussleistung, Lastkontrollanlagen unabdingbar, da Stahlwerke in aller Regel zu den Sondervertragskunden der EVUs zählen und nach speziellen Tarifen mit elektrischer Energie versorgt werden, welche eine Viertelstunden-Leistungsabrechnung beinhalten. Zur Energiekostensenkung und -optimierung gilt es daher, die in diesen Tarifen möglichen Optionen wie zuvor beschrieben möglichst gut auszunutzen. Dies ist von besonderer Bedeutung, da im Falle von Elektrostahlwerken der elektrische Energieeinsatz mit 20 % den größten Teil der zur Herstellung der Stahlprodukte notwendigen Gesamtenergie und damit auch einen entsprechend großen Kostenanteil verursacht [Jellinghaus 94]. Entsprechend ist hier das Potential, durch Einsparungen bei den elektrischen Energiekosten auch das Endprodukt günstiger und damit konkurrenzfähiger

herzustellen, besonders groß. Dazu besteht zum einen die bereits angesprochene Möglichkeit, diese Kosten durch Effizienzsteigerung des Produktionsprozesses und einer damit einhergehenden Reduktion der benötigten gesamten elektrischen Energie zu verringern. Dies führt vorrangig zu einer Senkung des energieverbrauchsabhängigen Arbeitsanteils der elektrischen Energiekosten. Zum anderen bietet die Option eines günstigeren elektrischen Leistungsbezugs durch anlagen- und prozessoptimierte elektrische Lastkontrolle einen weiteren Optimierungsspielraum, da so auch der Leistungsanteil der elektrischen Energiekosten verringert werden kann. In einem typischen Stahlwerk teilen sich die Gesamtkosten für die elektrische Energie etwa im Verhältnis 2:1 auf Arbeits- und Leistungsanteil auf [Fett 93].
Bedingt durch die besondere Aufteilung der gesamten Anschlussleistung auf die in Kapitel 2 beschriebenen üblicherweise in Elektrostahlwerken vorhandenen elektrischen Verbraucher führt hier die Anwendung der bisher dargestellten herkömmlichen Lastkontrollalgorithmen nicht zu guten Ergebnissen. Das Hauptproblem besteht darin, dass der Elektrolichtbogenofen, der den Großteil der Gesamtleistung des Werkes aufnimmt, einen äußerst wechselhaften Lastverlauf aufweist und darüber hinaus aufgrund prozesstechnischer Anforderungen unabhängig von der vorherrschenden Lastsituation plötzlich zu- oder abgeschaltet werden kann. Dies wird in Form der Entwicklung zutreffender Prognosemodelle in den vorhergehenden Kapiteln 2.1.2 und 3 ausführlich behandelt. Erschwerend kommt hinzu, dass der Lichtbogenofen meist der einzige Verbraucher im Stahlwerk ist, dessen Lastverlauf durch die Lastkontrollanlage beeinflusst werden kann.
Diese begrenzten Eingriffsmöglichkeiten in Verbindung mit den für die in herkömmlichen Lastkontrollanlagen verwendeten Prognosealgorithmen unvorhersehbaren großen Lastsprüngen im Elektrostahlwerk erschweren es diesen bisherigen Algorithmen, optimale Ergebnisse zu erzielen, insbesondere im Hinblick auf den angestrebten möglichst vollständigen Bezug der in den Messperioden zur Verfügung stehenden elektrischen Energie. Dies wird durch eine Betriebsdatenanalyse der vor dieser Arbeit in dem betrachteten Elektrostahlwerk verwendeten prognosebasierten Maximumwächter-Lastkontrollanlage untermauert.
Die der Arbeit vorausgehende Analyse dieser Anlage durch den Betreiber konzentriert sich auf die Feststellung, in wie vielen Messperioden eines knapp 14-tägigen Beobachtungszeitraums kurz vor dem Abstich des Schmelz-Elektrolichtbogenofens durch die Lastkontrollanlage eingegriffen, d.h. die Leistungsaufnahme mittels der Transformatorstufe heruntergeschaltet wird. Dies ist in 38 der aufgezeichneten 1320 bzw. knapp 3 % der Viertelstunden der Fall. Weiterhin wird untersucht, ob diese Eingriffe notwendig gewesen wären, d.h. ob es bei nicht reduzierter Leistungsaufnahme bis hin zum Abstich in der betreffenden Messperiode zu einer Überschreitung des Leistungslimits gekommen wäre. Im Ergebnis wären demnach 36 der 38 LKA-Eingriffe nicht nötig gewesen. Anhand der Betrachtung, um wie viel die Leistung jeweils reduziert wird und wie viel Zeit zwischen LKA-Eingriff und Abstich in der betreffenden Messperiode verstreicht, kann abgeschätzt werden, wie viel Energie ohne den Eingriff zusätzlich noch bezogen werden könnte. Da die Leistung um durchschnittlich 12,3 MW vermindert wird und im Mittel noch 220 s vom LKA-Eingriff bis zum Abstich vergehen, ergibt sich im Beobachtungszeitraum eine gesamte Energiemenge von knapp 30 MWh, die bei günstigerem Schaltverhalten der Lastkontrollanlage ohne Überschreitung des Leistungslimits noch hätte bezogen werden können. Werden für ein Jahr 330 Produktionstage zugrunde gelegt, so ergibt sich in der Hochrechnung pro Jahr ein Energienutzungspotential in der Größenordnung von 700 MWh, dem bei einem durchschnittlichen elektrischen Energiebedarf von 530 $\frac{kWh}{t}$ eine Mehrproduktion von ca. 1300 t Stahl entspricht.

Diese Abschätzung berücksichtigt noch nicht den Effekt, dass bei höherer Leistungseinbringung kurz vor Abstich die zum Erreichen der Abstichtemperatur noch benötigte Energie schneller in die Schmelze eingebracht werden kann. Gerade in dieser letzten Phase des Schmelzprozesses können besonders hohe Abwärmeverluste auftreten, die darüber hinaus hauptsächlich von der Stromflusszeit und weniger von der Leistung abhängen [Kirschen 07a]. Daher führt die bei höherer Schmelzleistung gewonnene Zeitersparnis zu einer Verringerung der absoluten Abwärmeverluste, was wiederum den Energiebedarf pro Schmelze reduziert. Diese Zusammenhänge werden später noch näher erläutert. Das o.g. Mehrproduktionspotential wird folglich unter Berücksichtigung der durch verbesserte Lastkontrolle möglichen Verlusteinsparungen entsprechend größer ausfallen.
Neben der Möglichkeit, die beim Betrieb der bisherigen Lastkontrollanlage nicht beziehbare elektrische Energie zur Mehrproduktion zu nutzen, ist auch die Vereinbarung eines geringeren Leistungslimits mit dem EVU denkbar. Bei diesem Ansatz besteht die Aufgabenstellung einer verbesserten Lastkontrolle darin, das gleiche Produktionsergebnis wie bisher bei einem kleineren Leistungslimit zu erreichen. Dies beinhaltet ein erhebliches Kosteneinsparungspotential.
Die vorgenannten Abschätzungen verdeutlichen, dass die bisherige, auf herkömmlichen Algorithmen beruhende Lastkontrollanlage einen optimalen Leistungsbezug des betrachteten Stahlwerkes nicht erreicht. Es wird daher im Folgenden die Entwicklung eines prädiktiven Lastkontrollalgorithmus beschrieben, der auf den in den vorhergehenden Kapiteln hergeleiteten Prognosemodellen beruht und neben der Erschließung des bestehenden Mehrproduktions- bzw. Kosteneinsparungspotentials auch weitere prozesstechnische Optimierungen beinhaltet.

4.4 Prädiktiver Lastkontrollalgorithmus

4.4.1 Optimierungsansätze

Die Analyse der Lastgänge der einzelnen Verbraucher in dem für diese Arbeit betrachteten Elektrostahlwerk in Kapitel 2 zeigt, dass es sich hier um sehr wechselhafte und sprunghafte Verläufe handelt. Im Hinblick auf die Entwicklung eines für die Verwendung im Stahlwerk besser geeigneten Lastkontrollalgorithmus erscheint es daher nicht sinnvoll, die neue Strategie auf eine lineare Extrapolation der in der jeweiligen Viertelstunde bereits beobachteten Energie- bzw. Leistungsbezugskurven z.B. in Form des Leistungsdreiecks aufzubauen. Die Tatsache, dass die zuvor beschriebenen Defizite der bisher verwendeten herkömmlichen Lastkontrollanlage hauptsächlich auf die Verwendung einer solchen linearen Extrapolation zurückzuführen sind, unterstreicht ebenfalls die Notwendigkeit einer davon abweichenden Vorgehensweise. Die im Folgenden zu entwickelnde neue Lastkontrollstrategie wird daher auf die Prognose der in der aktuellen Messperiode noch zu erwartenden Energiebezüge im Vergleich zu der aufgrund des Leistungslimits in dieser Periode maximal noch verfügbaren elektrischen Energie aufgesetzt. Die ggf. sprunghaften und zeitweise oberhalb des Leistungslimits verlaufenden Lastkurven spielen zur Einhaltung des Leistungslimits keine Rolle, solange der maximale elektrische Energiebezug in der Viertelstunde nicht überschritten wird.

Damit ist bereits das erste und wichtigste Ziel genannt, das mit der neuen Lastkontrollstrategie zu verfolgen ist. Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt, zählt darüber hinaus der möglichst vollständige Bezug der pro Viertelstunde in Form des Leistungslimits verfügbaren Energie zu

den weiteren grundsätzlichen Motivationen in der elektrischen Lastkontrolle, die eine Optimierung der entstehenden Energiekosten zum Ziel haben. Daher ist dies auch nach Möglichkeit mit dem zu entwickelnden neuen Algorithmus zu erreichen, z.B. durch die Vermeidung von Lastkontrolleingriffen am Schmelz-Elektrolichtbogenofen kurz vor dem Abstich. Dies würde der Erschließung des in Kapitel 4.3 genannten Potentials einer Mehrproduktion von rund 1300 t Stahl pro Jahr dienen. Zu diesem Zweck erscheint die zuvor beschriebene Vorgehensweise, die auf einer vom Verlauf der Lastkurven unabhängigen reinen Energiebetrachtung basiert, besonders vielversprechend. Falls die Prognoserechnung den Abstich des Ofens für die aktuelle Viertelstunde vorhersagt, so wird für den Ofen die elektrische Energiemenge vorgesehen, die laut der Energiemodellrechnung (vgl. Gleichungen (3.5), (3.9) und (3.11)) bis zum Abstich noch benötigt wird. Hinzu kommt eine dem in Kapitel 3.2.4 diskutierten Sicherheitsaufschlag der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit entsprechende Energiemenge. Solange diese gesamte Energiemenge unter Einhaltung des Leistungslimits in der Messperiode noch verfügbar ist, erfolgt durch diese neue Strategie kein Regeleingriff, auch wenn die momentanen Leistungsverläufe vor Abstich bei linearer Extrapolation ein Überschreiten des Maximums befürchten ließen und daher bei Verwendung einer herkömmlichen Lastkontrollanlage zu einem unnötigen Eingriff führen würden.

Eine weitere Anforderung besteht darin, die Zahl der lastkontrollbedingten Schalthandlungen möglichst gering zu halten, um so die entsprechenden Lastschalter durch die Lastkontrolle nicht übermäßig zu beanspruchen. In erster Linie ist hier der Transformatorstufenschalter des Schmelz-Elektrolichtbogenofens betroffen, da dieser zur Einstellung der Wirkleistung dieses Ofens und damit als Stellgröße für die Lastkontrollanlage verwendet wird. Bei Schaltspielen unter Last fließen durch diesen Transformator Ströme in der Größenordnung von 2,5 kA, so dass hier erhebliche Abnutzungserscheinungen auftreten. Des Weiteren ist es nicht möglich, Transformatorstufen zu überspringen, sondern bei erforderlicher Leistungsreduktion am Lichtbogenofen müssen alle Stufen zwischen der momentanen und der Zielstufe der Reihe nach angefahren werden. Bei einer Veränderung um mehrere Stufen werden daher im Folgenden so viele Schalthandlungen gezählt wie Stufen durchfahren werden.

Als Neuerung gegenüber bisherigen Lastkontrolllösungen sollen darüber hinaus in der prädiktiven Strategie auch prozesstechnische Belange des Stahlwerkes Berücksichtigung finden. Insbesondere sollen die zur Erreichung der üblichen Ziele der Lastkontrolle notwendigen Eingriffe in den Prozessablauf so durchgeführt werden, dass diese den Produktionsprozess so wenig wie möglich negativ beeinflussen. Dadurch ist eine weitere Optimierung des gesamten Energiebedarfs unter den durch die Vorgabe des Leistungslimits gegebenen Einschränkungen denkbar.
Ein erster Ansatzpunkt für die prozesstechnisch günstige Gestaltung der Lastkontrolleingriffe besteht darin, eine möglichst gleichmäßige Energieeinbringung in die Schmelze im Elektrolichtbogenofen zu erzielen. Bedingt durch das Funktionsprinzip und die Parametrierung der Grenzwerte der bisherigen Lastkontrollanlage werden den Ofen betreffende Schalthandlungen bisher tendenziell spät in der Viertelstunde durchgeführt. Durch diesen späten Eingriffszeitpunkt ist es dann jedoch häufig erforderlich, zur Einhaltung des Leistungslimits die Leistungsaufnahme des Ofens drastisch zu reduzieren bis hin zum kurzzeitigen Abschalten des Aggregats kurz vor Ende der Messperiode. Dies ist anhand exemplarischer Leistungsaufnahmeverläufe und der dazugehörigen Lastkurven in **Bild 4.8** a) veranschaulicht. In Viertelstunden hohen Leistungsbezugs kommt es daher mit der bisherigen Vorgehensweise häufig

zu starken lastkontrollbedingten Schwankungen in der Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens und zu hohen Schaltzahlen des Transformatorstufenschalters.
Die Einhaltung des Leistungslimits ließe sich jedoch auch erzielen, wenn bereits früh in der Messperiode die Leistungsaufnahme des Schmelzofens geringfügig reduziert würde, was in Bild 4.8 b) zu sehen ist. Diese Lösung resultiert gegenüber der bisher implementierten Lastkontrollanlage einerseits in einem insgesamt gleichmäßigeren Leistungsaufnahmeverlauf des Lichtbogenofens und einer verminderten Anzahl an Schalthandlungen, da hier vergleichsweise weniger Transformatorstufen durchfahren werden müssen. Andererseits birgt das frühzeitige Eingreifen in die Leistungsaufnahme die Gefahr, dass die in der Viertelstunde zur Verfügung stehende Energie bis zum Ende der Messperiode nicht komplett bezogen werden kann. Eine solche ggf. sogar retrospektiv nicht notwendige Unterschreitung des Leistungslimits könnte z.B. für den Fall auftreten, dass sich zu Beginn der jeweiligen Messperiode aufgrund gerade vorherrschender hoher Leistungsbezüge aller Verbraucher ein unzutreffend hoher Energieprognosewert ergibt.
Oben stehender Strategie folgend würde deshalb ggf. die Leistung des Lichtbogenofens geringfügig reduziert. Gehen die Leistungsbezüge von Pfannenofen und Grundlast im weiteren Verlauf der Viertelstunde prozessbedingt, also ohne Beeinflussung durch die Lastkontrollanlage, zurück, so steht plötzlich mehr elektrische Energie für den Elektrolichtbogenofen zur Verfügung als zunächst vorgesehen. Eine weitergehende Begrenzung der Leistungsaufnahme des Ofens würde daher zu einer deutlichen Unterschreitung des Leistungslimits führen (siehe Bild 4.8 c)).
Durch sofortige Wiederherstellung des höchstmöglichen Leistungsniveaus am Lichtbogenofen durch die Lastkontrolle dagegen kann nun versucht werden, die durch die unvorhergesehene Leistungsreduktion der anderen Verbraucher frei werdende Energie noch zu beziehen. Sofern die aufgetretene Leistungsreduktion von Pfannenofen und/oder Grundlast die Leistungsdifferenz zwischen der durch die Lastkontrolle reduzierten und der maximalen Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens nicht übersteigt, ist für die betreffende Messperiode ein nahezu vollständiger Bezug des Leistungslimits auch noch erreichbar, wie Bild 4.8 d) verdeutlicht.
Dennoch ist eine gewisse Schaltverzögerung zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die Leistungsaufnahme von Grundlast und/oder Pfannenofen zurückgeht, und dem Moment der wiederhergestellten maximalen Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens unvermeidlich. Die elektrische Energie, die innerhalb dieser Zeitspanne nicht bezogen wird, kann unter den geschilderten Bedingungen jedoch auch bis zum Messperiodenende nicht mehr aufgeholt werden. Zur Veranschaulichung zeigt Bild 4.8 e) eine übertrieben lange Schaltverzögerung. Die aufgrund dessen nicht mehr beziehbare Energie spiegelt daher das von der oben beschriebenen neuen Schaltstrategie ausgehende Risiko einer ggf. unnötigen Unterschreitung des Leistungslimits wider. Dies ist bei der Auswertung der mit der neuen Lastkontrollanlage erzielten Betriebsergebnisse in Kapitel 5.2 näher zu betrachten.
Für den Fall, dass durch Leistungsreduktion an anderen Verbrauchern mehr Leistung frei wird als der Lichtbogenofen noch zusätzlich aufnehmen kann, ist ein Erreichen des Leistungslimits nicht mehr möglich, wie in Bild 4.8 f) zu sehen. Dieses Risiko lässt sich nur dadurch reduzieren, indem der frühzeitig eingreifenden Schaltstrategie eine Reduktion der Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens nicht von Beginn einer jeden Messperiode an erlaubt wird, sondern erst ab einem späteren Zeitpunkt. Um die Vorzüge der neuen Strategie damit jedoch nicht zu sehr zu beschränken, sollte dieser frühestmögliche Eingriffszeitpunkt deutlich vor dem Zeitpunkt liegen, zu dem eine herkömmliche Lastkontrollstrategie eingreift.

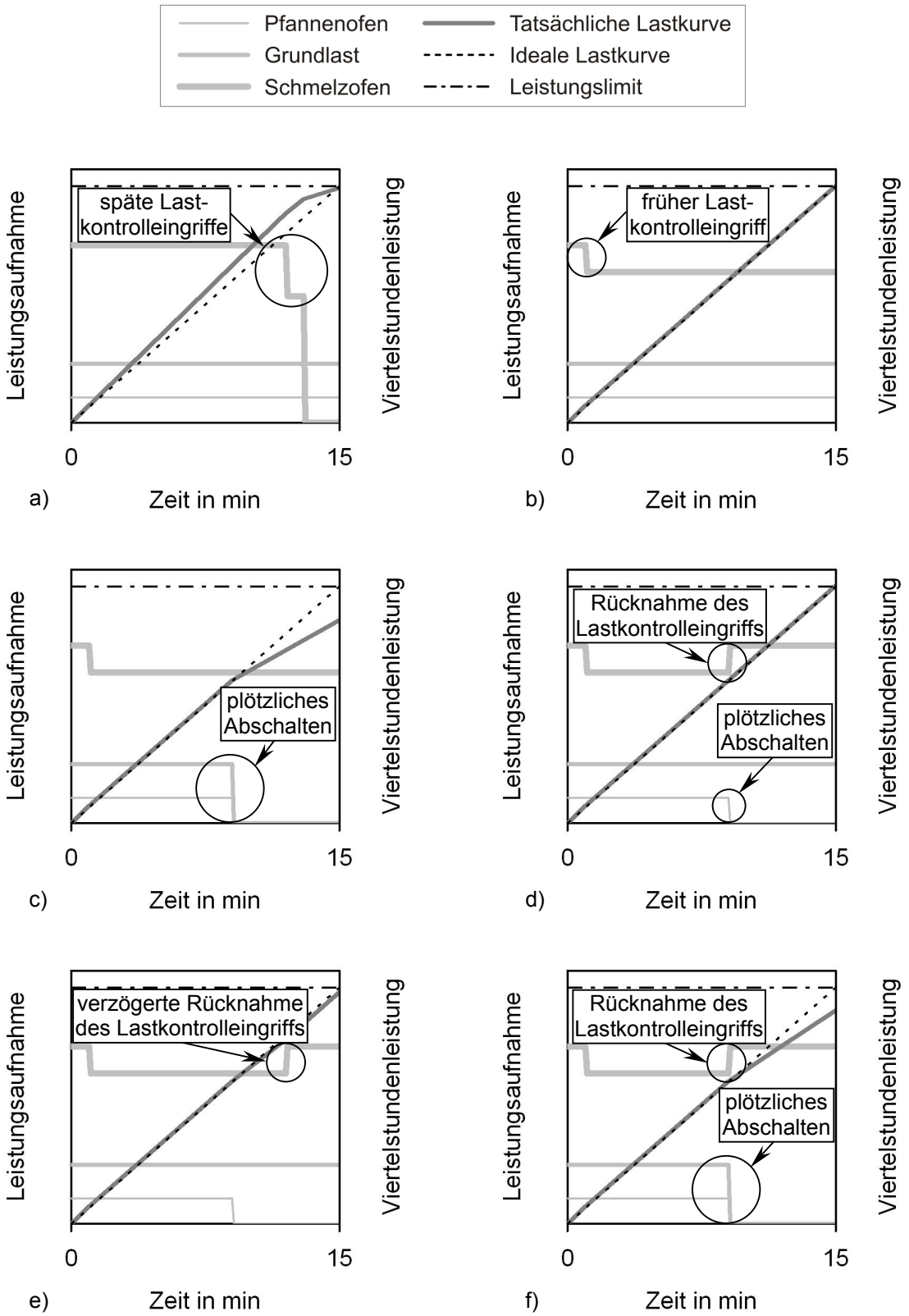


Bild 4.8: Leistungsaufnahmeverläufe und Lastkurven bei unterschiedlichen Schaltstrategien, a) bis f): Verschiedene Schaltszenarien

Aus prozesstechnischen Erwägungen erscheint darüber hinaus auch die Vermeidung von lastkontrollbedingten Schalthandlungen oder Abschaltungen am Elektrolichtbogenofen in

Phasen hoher spezifischer Verluste vielversprechend im Hinblick auf eine trotz notwendiger Lastkontrolle noch optimale Prozessführung. Wie zuvor bereits dargelegt resultiert eine Reduktion der Leistungseinbringung oder ein Abschalten des Ofens grundsätzlich in Energieverlusten, hauptsächlich aufgrund von Abwärme. Bei erneuter Zuschaltung bzw. Wiederherstellung des hohen Leistungsniveaus müssen diese Verluste zusätzlich zu der für den Schmelzprozess noch benötigten Energie wieder in den Ofen eingebracht werden, was einen erhöhten spezifischen Energiebedarf zur Folge hat. Finden die Eingriffe bzw. Unterbrechungen des Schmelzprozesses bei geringen spezifischen Verlusten statt, so ist die durch Abwärme verlorene Energie schnell wieder aufzuholen und der Gesamtenergiebedarf steigt nur unmerklich an. Bei hohen spezifischen Verlusten jedoch verlängert sich die Zeit, die zum erneuten Einbringen der Abwärmeenergie erforderlich ist und der Energiebedarf vergrößert sich deutlicher.
Die spezifischen Abwärmeverluste im Elektrolichtbogenofen sind relativ gering, solange die Lichtbögen von Schrott oder Schaumschlacke eingehüllt sind und somit keine Wärmestrahlung direkt auf die wassergekühlten Ofenwände auftrifft, wo sie zum Schmelzen oder Aufheizen des Bades ungenutzt abgeleitet wird. Deshalb ist ein Zusammenfallen der Schaumschlacke, zu dem es z.B. durch das Abschalten der Lichtbögen bzw. des Ofens kommt, zu vermeiden. Kurz vor dem Abstich ist es jedoch prozesstechnisch erforderlich, beim so genannten Abschlacken die Schlacke durch eine dafür vorgesehene Öffnung aus dem Ofengefäß abzulassen. Die letzten Minuten der Stromflusszeit finden daher bei nicht mehr mit Schlacke eingehüllten Lichtbögen statt. Zusätzlich dazu hat die Schmelze in diesem Prozessschritt bereits fast die Abstichtemperatur von 1640 °C erreicht und strahlt somit erhebliche Abwärme ab. Beides resultiert in besonders hohen spezifischen Abwärmeverlusten kurz vor dem Abstich. Dieser letzte Abschnitt der Schmelze ist also möglichst ununterbrochen und bei höchster Leistungseinbringung durchzuführen, da sich so die kürzeste Dauer dieser Prozessphase und damit auch die kleinstmöglichen Verluste ergeben.
Adams beziffert die spezifischen Verluste bezogen auf eine Minute Chargendauerverlängerung zu Beginn der Schmelze mit 0,4 $\frac{kWh}{t}$ und zum Ende mit 1,7 $\frac{kWh}{t}$ [Adams 01], wobei diese nicht weiter in Abgas- und Ofenkühlungsverluste aufgeschlüsselt werden. Die Untersuchungen von Kühn an einem 125 t-DC-EAF ergeben einen spezifischen Kühlungsenergieverlust von 0,886 $\frac{kWh}{t}$ pro zusätzlicher Minute Chargendauer [Kühn 03]. Anhand der Aufzeichnung der spezifischen Abgas- und Kühlungsverluste über den Verlauf einer exemplarischen Charge zeigt Simoes, dass erstere bei ausgeschaltetem Ofen zwischen 0,2 $\frac{kWh}{t}$ zu Schmelzbeginn und 1 $\frac{kWh}{t}$ kurz vor Abstich und letztere konstant bei 2 $\frac{kWh}{t}$ liegen, wiederum bezogen auf eine Minute [Simoes 05]. Konstante Kühlungsverluste von 2,11 $\frac{kWh}{t}$ beobachtet auch Nyssen an einem 110 t-Lichtbogenofen [Nyssen 99]. Damit lässt sich unter Berücksichtigung der in den Quellen genannten tatsächlichen Abstichgewichte bzw. eines angenommenen Abstichgewichtes von 100 t die durch Kühlwassererwärmung hervorgerufene Verlustleistung auf ca. 6,6 – 13,9 MW, die im Abgas verloren gehende Leistung auf ca. 1,2 – 6 MW und die gesamte Abwärmeverlustleistung auf ca. 2,4 – 18 MW abschätzen. Dabei gelten für den hier relevanten Prozessabschnitt kurz vor Abstich die jeweils größeren Werte.
Eine dementsprechende Leistung muss nach erneuter Zuschaltung des Elektrolichtbogenofens mindestens für eine der Dauer des lastkontrollbedingten Eingriffs entsprechende Zeitspanne zusätzlich in die Schmelze eingebracht werden, um die Verluste auszugleichen. In der Größenordnung entspricht die Verlustleistung der elektrischen Leistungsdifferenz zwischen bis zu vier benachbarten Transformatorstufen des Lichtbogenofens (vgl. Kapitel 2.1.2).

Diese nicht zu vernachlässigenden Abwärmeverluste unterstreichen auch aus prozesstechnischer Sicht die Notwendigkeit, bei einer optimalen Lastkontrollstrategie Eingriffe in die Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens nach Möglichkeit nicht kurz vor Abstich vorzunehmen. Dies deckt sich mit der zuvor formulierten, auf Energiekostenoptimierung abzielenden lastkontrolltechnischen Betrachtung.
Weiterhin erlaubt diese Verlustabschätzung eine Neubewertung der in den vorherigen Absätzen geschilderten möglichen negativen Konsequenzen einer früh eingreifenden Schaltstrategie. Eine solche Strategie trägt prinzipbedingt u.a. auch dazu bei, Lastkontrolleingriffe kurz vor Chargenende zu vermeiden, so dass diese tendenziell in die prozesstechnisch günstigeren Abschnitte des Schmelzprozesses mit geringeren spezifischen Verlusten verlagert werden. Damit erscheint das Risiko, aufgrund früher Lastkontrolleingriffe das Leistungslimit nicht vollständig beziehen zu können, nun vertretbar, insbesondere wenn der frühestmögliche Eingriffszeitpunkt nicht auf den Messperiodenbeginn, sondern einige Minuten später gelegt wird. Eine abschließende Gegenüberstellung der mit den unterschiedlichen Schaltstrategien zu erwartenden Verluste stellt sich aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten der Einflussgrößen untereinander als äußerst schwierig dar. Diese ist daher empirisch anhand der mit dem in dieser Arbeit vorgestellten neuen Lastkontrollalgorithmus erzielten Betriebsergebnisse in Kapitel 5.2 vorzunehmen.

Ein weiteres Mittel, Schalthandlungen am Elektrolichtbogenofen unter bestimmten Bedingungen ganz zu vermeiden oder auf ein Minimum zu reduzieren ist mit der in Kapitel 2.2 bereits geschilderten Möglichkeit gegeben, den Zuschaltzeitpunkt des Pfannenofens ggf. in die nächste Messperiode hinein zu verschieben. Dies erscheint insbesondere in den Fällen vielversprechend, in denen der Abstich des Schmelzofens in der aktuellen Viertelstunde auftritt. Die vorgestellten Prognosemodelle erlauben die Feststellung, ob die in der jeweiligen Messperiode noch verfügbare elektrische Energie ausreicht, um den Schmelzofen bis zum Abstich und die Grundlast bis zum Ende der Periode ohne Lastkontrolleingriffe weiter zu betreiben. Falls darüber hinaus jedoch nicht mehr genügend Energie für ein Zuschalten des Pfannenofens verfügbar ist, so sollte in der neuen Lastkontrollstrategie versucht werden, dieses Zuschalten bis zum Beginn der nächsten Viertelstunde zu verschieben. Auf diese Weise kann das anzustrebende schnelle Beenden der aktuellen Charge des Schmelzofens ohne Lastkontrolleingriffe an diesem Aggregat unterstützt werden. In den Viertelstunden ohne Abstich trägt eine gleichartige Behandlung des Pfannenofens zu einer aus o.g. Gründen ebenso wünschenswerten gleichmäßigen Energieeinbringung in den Schmelzofen bei, da das Nicht-Zuschalten des Pfannenofens ggf. eine Leistungsreduktion am Schmelzofen verhindert.

Bevor der neue Algorithmus formuliert werden kann, der die Integration der vorgenannten Optimierungsansätze in das Lastkontrollsystem des in dieser Arbeit betrachteten Stahlwerkes erlaubt, sind zunächst die aufgrund der bestehenden Installationen und Regelungen gegebenen Randbedingungen sowie deren gegenseitige Abhängigkeiten zu untersuchen. Daraus lassen sich die für eine verbesserte Lastkontrolle zur Verfügung stehenden Eingriffsmöglichkeiten und auch die zu beachtenden Einschränkungen ableiten, die anschließend bei der Entwicklung des prädiktiven Lastkontrollalgorithmus zu beachten sind.

4.4.2 Rahmenbedingungen im Stahlwerk

Bereits in den voranstehenden Kapiteln wird mehrfach darauf verwiesen, dass für die Verbesserung der Lastkontrolle in dem hier betrachteten Elektrostahlwerk eine möglichst einfache Strategie zu verfolgen ist. Insbesondere werden daher die Anzahl der Einflussparameter bei der Herleitung der Lastprognosemodelle für die einzelnen elektrischen Verbraucher in Kapitel 2 auf eine geringe Anzahl beschränkt. Dies erleichtert einerseits die Einbindung der neu zu entwickelnden Lastkontrolllösung in die bestehende Installation, da nur wenige Prozessdaten zur Verfügung gestellt werden müssen und andererseits kann so auch der zur Prognoseberechnung erforderliche Rechenaufwand gering gehalten werden, um die Zielhardware mit dem zusätzlichen prädiktiven Lastkontrollalgorithmus so wenig wie möglich zu belasten.
Weiterhin ist es nicht Ziel der Arbeit, durch die Optimierung der Lastkontrolle eine Einbindung des elektrischen Lastmanagements in die gesamte Produktionsplanung des Stahlwerkes zu erreichen, so wie sie z.B. in [Fleissig 98], [Krüger 01] und [Jennert 99] bei ähnlicher Problemstellung vorgestellt wird. Die Implementation einer mit dem von Jennert in [Jennert 99] beschriebenen System vergleichbaren Lastkontroll-Leitwarte ist ebenso wenig anzustreben. Vielmehr sollen die Lastkontrolleingriffe nach wie vor weitestgehend selbsttätig und automatisch erfolgen. Ausgenommen davon ist allein die zuvor erwähnte mögliche Zuschaltverzögerung am Pfannenofen, worauf im Folgenden noch näher eingegangen wird.
Technisch ist die Erweiterung der im Stahlwerk bestehenden elektrischen Lastkontrollanlage wenn möglich so zu realisieren, dass keine neue Hardware wie z.B. SPS, Embedded PCs oder gewöhnliche PCs erforderlich ist. Insbesondere sollen die zur Berechnung der Prognosedaten erforderlichen Prozessdaten sowie die aktuellen Stände der Stromzähler, die zur Überwachung des Messperiodentakts und der in der Viertelstunde noch verfügbaren elektrischen Energie notwendig sind, durch Anbindung an die bereits vorhandene Hard- und Software ausgelesen werden. Ebenso sind die mittels des neuen prädiktiven Algorithmus berechneten Stellbefehle zur Durchführung der erforderlichen Lastkontrolleingriffe durch bereits vorhandene Hardware an die entsprechenden Lastschalter weiterzuleiten.

Zur Realisierung der zuvor diskutierten Schaltstrategie muss der prädiktive Lastkontrollalgorithmus durch die Ausgabe entsprechender Stellbefehle erstens ggf. Schalthandlungen der herkömmlichen Lastkontrollanlage kurz vor Abstich des Schmelzofens blockieren, zweitens die Leistungsaufnahme dieses Ofens durch Veränderung der dort anliegenden Transformatorstufe anpassen und drittens die Verzögerung des Zuschaltzeitpunktes des Pfannenofens veranlassen können. Es werden also Eingriffsmöglichkeiten auf die herkömmliche Lastkontrollanlage, den Transformatorstufenschalter des Schmelzofens und den Ofenschalter des Pfannenofens benötigt. Die beiden letztgenannten Stellglieder werden jedoch auch von anderen im Stahlwerk vorhandenen Regelungen bzw. vom Ofenbedienpersonal beeinflusst. Eine Übersicht über den Stromlaufplan der im Stahlwerk vorhandenen elektrischen Verbraucher sowie diverser Steuer- und Regeleinrichtungen und deren jeweilige Eingriffspunkte in **Bild 4.9** verdeutlicht dies.
Wie in diesem Bild zu sehen ist, wird die Transformatorstufe des Elektrolichtbogenofens auch von der Schmelzofenregelung beeinflusst. Dies ist notwendig, um gemäß der hinterlegten Fahrdiagramme bzw. entsprechend den Vorgaben der übergeordneten Leistungsregelung die zugehörigen Spannungsarbeitspunkte einzustellen. Im hier betrachteten Stahlwerk ist darüber hinaus in der besagten Leistungsregelung eine Temperaturüberwachung integriert, die bei drohender Überhitzung der Kühlkreisläufe des Schmelzofens den Spannungs-

arbeitspunkt reduziert. Im Sinne der Prozessführung und auch der Lebensdauer des Ofens ist es daher unabdingbar, dass die installierten Regelungen durch die Eingriffe des neu hinzukommenden prädiktiven Algorithmus in ihrer grundsätzlichen Funktionalität nicht beeinflusst werden.
Zur eigentlichen Ansteuerung des Transformatorstufenschalters ist eine vorhergehende Auswertung aller von den verschiedenen Regelungen eintreffenden Stellbefehle durch eine entsprechende Logikschaltung implementiert. Diese Schaltung wertet die von der Lastkontrollanlage vorgegebene Transformatorstufe als Maximum, d.h. Stellbefehle der anderen Regelungen werden nur durchgeführt, wenn sie das Anfahren einer kleineren Stufe als dieser Maximalstufe anfordern. Auf diese Weise ist zum einen die Einhaltung des Leistungslimits durch entsprechende Transformatorstellbefehle der Lastkontrollanlage sichergestellt, da diese auf keinen Fall überschritten werden können. Zum anderen bleibt so die prozesstechnische und schützende Wirkung der anderen Regelungen unbeeinträchtigt, da das Anfahren kleinerer Arbeitspunkte nach wie vor möglich ist.

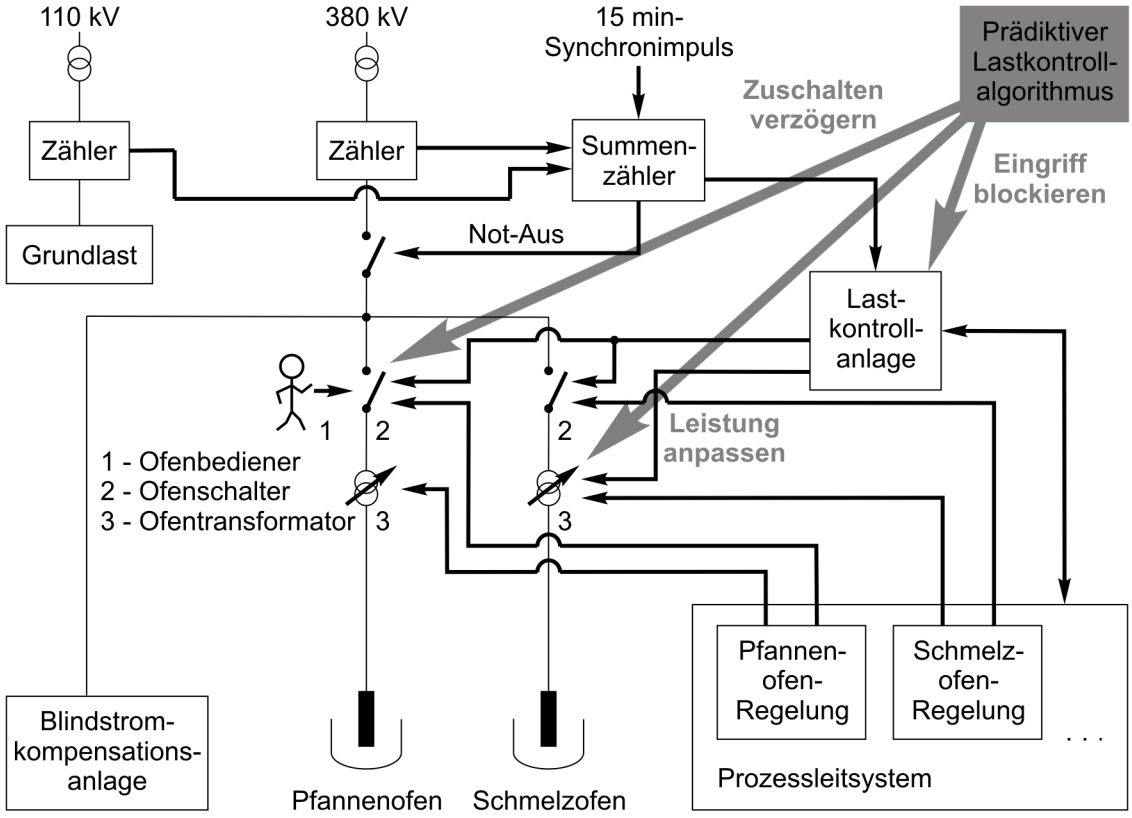


Bild 4.9: Übersicht über elektrische Verbraucher, Regelungen, bisherige Lastkontrollanlage und Eingriffsmöglichkeiten des prädiktiven Lastkontrollalgorithmus im Stahlwerk

Es ist daher mit dem prädiktiven Schaltalgorithmus nicht nur zu überprüfen, ob ggf. aus lastkontrolltechnischer Sicht eine Leistungsreduktion am Schmelzofen erforderlich ist, sondern auch, ob die Leistungsaufnahme dieses Ofens ggf. sogar erhöht werden kann. Falls für den Weiterbetrieb des Ofens bei der aktuellen Transformatorstufe noch genügend Energie zur Verfügung steht, so ist darüber hinaus die maximal mögliche Transformatorstufe, bei der das Leistungslimit noch eingehalten würde, zu bestimmen und als Stellbefehl an die Auswertelo-

gik des Stufenschalters zu übermitteln. Damit ist es den anderen einwirkenden Regelungen möglich, den ggf. zwischen aktueller und maximaler Transformatorstufe vorhandenen Spielraum zur optimalen Prozessführung zu nutzen. Die Berechnung der Maximalstufe ist dabei auf das in Kapitel 2.1.2 hergeleitete transformatorstufenabhängige Lastprognosemodell zu stützen.
Neben dieser Hierarchie der Regelungen sind auch Signallaufzeiten und die mechanische Trägheit des Transformatorstufenschalters bei der Stellbefehlsausgabe zu beachten. Dahingehende Auswertungen zeigen, dass zwischen der Ausgabe eines Stellbefehls und dem Zeitpunkt, zu dem die gewünschte Stufe angefahren ist, bis zu 15 s vergehen können. Der Stufenschalter kann daher auch den Stellbefehlen des neuen Lastkontrollalgorithmus nur bis zu einer dementsprechenden Frequenz folgen. Zur Vermeidung von Schwingungsreaktionen ist daher bei der Ausgabe von Stellbefehlen darauf zu achten, diese maximale Frequenz nicht zu überschreiten und zwischen zwei Stellbefehlen mindestens die o.g. Zeitverzögerung abzuwarten.

Die Möglichkeit, mit der erweiterten Lastkontrollanlage das Zuschalten des Pfannenofens wenn nötig zu verzögern, wird in Kapitel 2.2 bereits erläutert und als eher schwach beurteilt. Wie aus obiger Abbildung zu erkennen ist, sind auch hier mehrere Instanzen im Stahlwerk vorhanden, die ebenfalls auf die Betätigung des Pfannenofenschalters einwirken. Dies sind zum einen die Pfannenofenregelung und zum anderen das Ofenbedienpersonal, das mit höchster Priorität in den Betrieb des Pfannenofens eingreift und damit einen unterbrechungsfreien Gießprozess im Anschluss an die Behandlung der Schmelze im Pfannenofen sicherstellt. Die Lastkontrolle darf daher nicht direkt Einfluss auf den Pfannenofenschalter nehmen und diesen beispielsweise automatisch für eine gewisse Zeit blockieren, da ein daraus resultierender Gießabbruch inakzeptabel ist.
Die Beeinflussung an dieser Stelle ist nur indirekt möglich, indem wie zuvor beschrieben eine entsprechende Meldung in der Leitwarte angezeigt wird. So obliegt es dem Ofenbedienpersonal, der Empfehlung der erweiterten Lastkontrollanlage je nach Prozesssituation zu folgen oder nicht. Vor diesem Hintergrund sind die zugehörigen Meldungen so zu gestalten, dass diese dem Ofenbedienpersonal nachvollziehbar erscheinen. Es ist daher insbesondere zu vermeiden, die Empfehlung zur Zuschaltverzögerung aufgrund von Schwankungen im Energiebezug innerhalb kurzer Zeit ein- und wieder abzuschalten, da solche Unstetigkeiten unweigerlich zu einem Glaubwürdigkeitsverlust führen und die entsprechenden Meldungen in der Folge keine Beachtung mehr finden würden.
Weiterhin ist die Dauer einer möglichen Zuschaltverzögerung des Pfannenofens durch den neuen Lastkontrollalgorithmus auf einen den Erfahrungen des Bedienpersonals entsprechenden Maximalwert von 1,5 min zu limitieren, d.h. die zugehörige Empfehlung des prädiktiven Algorithmus ist höchstens für diese Dauer auszugeben. Darüber hinaus sind unnötige Verschiebungen zu vermeiden. Es ist zu erwarten, dass die Prognose der für die einzelnen Verbraucher noch benötigten Energie zum Ende der jeweiligen Messperiode hin genauer wird, da der Prognosehorizont mit fortschreitender Zeit innerhalb der Messperiode kürzer wird. Daher ist auch die bestmögliche Beurteilung, ob die Verschiebung des Pfannenofen-Zuschaltzeitpunktes notwendig ist, innerhalb dieser letzten Minuten der betreffenden Viertelstunde zu erwarten. Folglich erscheint es sinnvoll, die Zuschaltverschiebung zur Erreichung eines optimalen Energiebezugs und insbesondere zur Vermeidung von Lastkontrolleingriffen am Schmelzofen nur innerhalb dieses letzten Zeitfensters einer jeden Messperiode höchs-

tens für die maximale Dauer zu nutzen. Dies ist bei der nachfolgenden Entwicklung des prädiktiven Algorithmus zu berücksichtigen.

Aufgrund der in Kapitel 3.2.4 dargestellten möglichen Prognoseungenauigkeiten bei ungewöhnlichen Prozessverläufen im Elektrolichtbogenofen wird dort gefordert, bei der Entwicklung der erweiterten Lastkontrollstrategie Maßnahmen einzuplanen, die ein Überschreiten des Leistungslimits auch bei drastischen Fehlprognosen wirkungsvoll verhindern. Zu diesem Zweck lässt sich die bereits im Stahlwerk vorhandene herkömmliche Lastkontrollanlage verwenden. Wie zuvor beschrieben sollen durch den neuen prädiktiven Algorithmus die Eingriffe der bestehenden Lastkontrolle blockiert werden, sobald durch die Prognosemodelle der Abstich des Schmelzofens für die aktuelle Viertelstunde vorhergesagt wird. Dabei ist von einer unzutreffenden Prognose auszugehen, sobald die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit negative Werte annimmt. Dies ist gemäß der Modellgleichungen (3.6), (3.10) und (3.12) gleichbedeutend mit der Feststellung, dass bereits mehr elektrische Energie in die Schmelze eingeflossen ist als laut Abschätzung des Modells insgesamt benötigt wird. In diesem Fall ist es mit der neuen, prognosebasierten Schaltstrategie nicht mehr möglich, die Einhaltung des Leistungslimits sicherzustellen, wohl aber mittels der herkömmlichen Lastkontrollanlage. Diese kann durch die in Bild 4.9 dargestellten Eingriffsmöglichkeiten bei drohender Überschreitung des Limits die Transformatorstufe des Schmelzofens drastisch herunter- und ggf. sogar Schmelz- und Pfannenofen bis zum Ende der Messperiode abschalten. Da die Grundlast von der Lastkontrolle zwar nicht beeinflusst werden kann, trotzdem jedoch mit in die Bestimmung des Viertelstunden-Leistungsmittelwertes im abrechnungsrelevanten Summenzähler eingeht, ist in der herkömmlichen Lastkontrollanlage ein einfacher Prognosealgorithmus für diese Last implementiert. Die Herunter- bzw. Abschaltungen der Öfen zur Einhaltung des Leistungslimits werden daher von dieser Anlage bereits dann eingeleitet, wenn in die in der betreffenden Viertelstunde noch verfügbare Energie gerade noch für die Versorgung der Grundlast ausreicht. Um diese intelligente Abschaltung auch im Falle einer drastischen Fehlprognose durch den neuen prädiktiven Algorithmus noch nutzen zu können, ist die Blockierung der vorhandenen Lastkontrollanlage aufzuheben, wenn die prognostizierte Restzeit bis zum Abstich negativ wird und gleichzeitig in der aktuellen Messperiode nur noch wenig Zeit verbleibt.

Als zusätzliche Schutzmaßnahme zur Vermeidung von Überschreitungen des Leistungslimits ist wie in Bild 4.9 zu sehen noch eine zusätzliche Not-Aus-Zählerfunktion in den Summenzähler der elektrische Anlage integriert, durch die unabhängig von allen weiteren Regelungen und an übergeordneter Stelle bei Erreichen des eingestellten Maximalleistungsbezugs die Öfen abschaltet werden. Auch dieser Zähler kann nicht die Grundlast abschalten, so dass der Maximalwert etwas niedriger als das tatsächlich mit dem EVU vereinbarte Leistungslimit einzustellen ist. Die verbleibende Differenz steht dann im Notfall noch für die Grundlast zur Verfügung, so dass eine Limitüberschreitung durch den Energiebezug der Grundlast vermieden wird.

4.4.3 Aufbau des Algorithmus

Anhand der zuvor definierten Schaltstrategie kann nun unter Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel 4.4.2 dargelegten Randbedingungen der prädiktive Lastkontrollalgorithmus in Form des in **Bild 4.10** dargestellten Entscheidungsbaums formuliert werden.

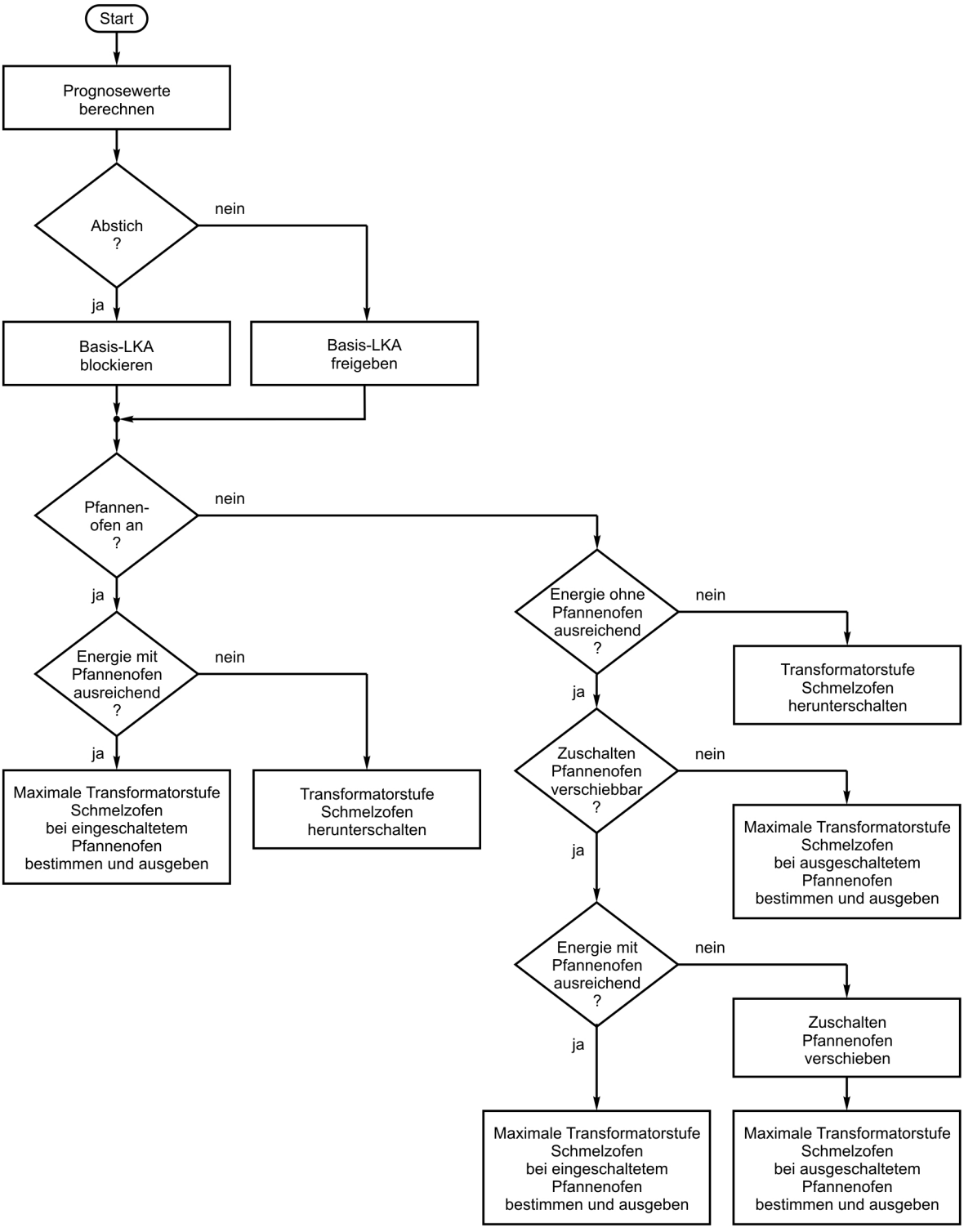


Bild 4.10: Entscheidungsbaum für den prädiktiven Lastkontroll-Algorithmus

Dieser Entscheidungsbaum wird in einer festen zeitlichen Taktung durchlaufen, so dass die Prognoseberechnungen mit den jeweils aktuellen Prozess- und Stromzählerdaten in diesem Takt ständig aktualisiert werden. Bei Wahl einer entsprechend kurzen Taktzeit ermöglicht dies die geforderte schnelle Reaktion auf Veränderungen der Lastsituation, die sich beispielsweise durch Zu- oder Abschaltungen des Pfannenofens sowie der Gießanlage oder des Walzwerkes ergeben können. Eine solche veränderte Lastsituation führt dazu, dass

beim nächsten Durchlauf des Entscheidungsbaums ein anderer Weg gewählt wird, der wie gewünscht zur Ausgabe entsprechend geänderter Stellbefehle führt.
Nach Berechnung der Prognosewerte für die verbleibende Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens sowie für die zu erwartenden Energiebezüge dieses Ofens, der Grundlast und des Pfannenofens beginnt die Vorgehensweise zunächst mit der Blockierung bzw. Freigabe der bestehenden LKA in Abhängigkeit davon, ob der Abstich für die aktuelle Bezugsperiode zu erwarten ist oder nicht. Der Funktionsblock "Basis-LKA blockieren" enthält dabei zusätzlich noch die in 4.4.2 beschriebene Überprüfung auf Vorliegen einer Fehlprognose bezüglich des Abstichzeitpunktes. Der entsprechende Blockierbefehl wird aufgehoben, wenn innerhalb der letzten Minute der Bezugsperiode eine Fehlprognose festgestellt wird.
Bei den nachfolgenden Abfragen bezüglich ausreichender Energie besteht die grundsätzliche Vorgehensweise darin, bei ausreichender Energie die größtmögliche Transformatorstufe am Schmelzofen mittels des Lastprognosemodells zu bestimmen und auszugeben und bei nicht ausreichender Energie die aktuelle Transformatorstufe um Eins zu reduzieren. Dies wird der geplanten Umsetzung frühzeitiger leichter Eingriffe gerecht. Unterschiede in den Abfragen ergeben sich nur dadurch, ob für den Schmelzofen eine Energiemenge bis zum Abstich oder bis zum Ende der Messperiode einkalkuliert wird und ob für den Pfannenofen Energie vorzusehen ist.
Durch die Abfolge der Abfragen bezüglich des Schaltzustandes des Pfannenofens und der Möglichkeit, dessen Zuschalten ggf. zu verschieben, wird die zuvor beschriebene Schaltstrategie umgesetzt, was im Folgenden kurz skizziert wird.
Die erste dieser Abfragen teilt den Entscheidungsbaum in zwei Äste auf. Im rechten Ast, bei ausgeschaltetem Pfannenofen, besteht die Möglichkeit, dessen Zuschalten zu verschieben, während dies im linken nicht gegeben ist. Hier ist also bei der nachfolgenden Überprüfung, ob die in der Bezugsperiode noch verfügbare Energie ausreicht, und bei der Berechnung der maximalen Transformatorstufe am Schmelzofen der für den Pfannenofen prognostizierte Energiebedarf mit einzukalkulieren.
Im rechten Zweig steht zunächst die Abfrage bezüglich ausreichender Energie ohne Berücksichtigung des Pfannenofens. Weiterhin wird geprüft, ob die Beibehaltung des ausgeschalteten Zustandes zum aktuellen Zeitpunkt aktiv durch eine entsprechende Befehlsausgabe des Lastkontrollsystems unterstützt werden darf, d.h. ob der aktuelle Zeitpunkt innerhalb des zuvor beschriebenen letzten Zeitfensters von 1,5 min liegt. Sofern dies der Fall ist und die verbleibende Energie bis zum Erreichen des Leistungslimits nicht mehr für ein Zuschalten des Pfannenofens ausreicht, wird die Empfehlung zur Verschiebung des Zuschaltens ausgegeben. Falls das Zuschalten zwar verschoben werden könnte, die verfügbare Energie jedoch noch für alle Verbraucher inklusive Pfannenofen ausreicht, so wird die Empfehlung nicht ausgegeben und bei der Kalkulation der maximal möglichen Transformatorstufe am Schmelzofen eine entsprechende Energiemenge für den Pfannenofen reserviert. Dies trägt zu einer gleichmäßigen Leistungsaufnahme am Schmelzofen bei, da so auch bei plötzlichem Zuschalten des Pfannenofens noch genügend Energie zur Verfügung steht und somit ein ebenso plötzliches Herunterschalten der Leistung des Schmelzofens mit größter Wahrscheinlichkeit vermieden werden kann. Die durch die Reservierung eines Energiekontingents für den ausgeschalteten Pfannenofen mögliche Unterschreitung des Leistungslimits ist als gering anzunehmen, da der Abfragezweig, in dem die Verschiebung des Zuschaltens möglich ist, nur für einen kurzen Zeitraum am Ende der Viertelstunde beschritten werden kann.
Bis auf diesen Sonderfall folgt die grundsätzliche Aufteilung des Entscheidungsbaums damit der bei der Modellierung in Kapitel 2.2 getätigten Annahme, dass der Pfannenofen, wenn er

zum aktuellen Zeitpunkt ausgeschaltet ist, auch weiterhin ausgeschaltet bleibt. Trotzdem werden die tatsächlichen Energiebezüge innerhalb der Viertelstunde beobachtet. Sobald der Pfannenofen zuschaltet, wird beim nächsten Durchlauf des Entscheidungsbaums eine entsprechende Energiemenge vorgesehen und die für dann ggf. notwendige Schalthandlungen erforderlichen Stellbefehle ausgegeben.

Die in Bild 4.10 dargestellten Funktionsblöcke stellen eine Übersicht über den prinzipiellen Ablauf dar, gemäß dem die notwendigen Stellbefehle für eine nach den zuvor genannten Kriterien optimale Lastkontrolle zu bestimmen sind. Im Folgenden werden daher die nicht dargestellten, den Entscheidungsbaum übergreifenden Funktionen sowie die in den einzelnen Funktionsblöcken enthaltenen Algorithmen noch näher erläutert.
Grundsätzlich wird der Entscheidungsbaum inklusive der Prognoseberechnung nur durchlaufen, solange eine Charge im Schmelzofen prozessiert wird, d.h. vom erstmaligen Beginn der Stromflusszeit bis zum Chargenende. Letzteres wird anhand der Vergabe einer neuen Chargennummer erkannt. In den Zeiten zwischen dem Ende der vorherigen und dem Stromflussbeginn der aktuellen Charge werden keine Stellbefehle zur Blockierung der herkömmlichen LKA oder zur Zuschaltverschiebung des Pfannenofens ausgegeben und der Ausgabewert für die maximale Transformatorstufe am Schmelzofen wird auf 18 gesetzt, da dies der tatsächlich vorhandenen maximalen Stufe des Transformators entspricht. Somit findet die Lastkontrolle in diesen Zeiträumen ausschließlich durch die herkömmliche LKA statt, wobei jedoch aufgrund des ausgeschalteten Schmelzofens mit so geringen Energiebezügen zu rechnen ist, dass es höchstwahrscheinlich nicht zu Lastkontrolleingriffen kommt.
Weiterhin wird zu Beginn einer neuen Messperiode die Empfehlung für die Einschaltverzögerung des Pfannenofens zurückgesetzt. Da nur der Funktionsblock "Zuschalten Pfannenofen verschieben" diesen Stellbefehl erneut setzen kann und alle anderen Blöcke diesen Wert nicht verändern, ergibt sich die Funktionalität, dass die Empfehlung zur Zuschaltverschiebung immer bis zum Bezugsperiodenende gesetzt bleibt, sobald innerhalb dieser Messperiode einmal der Block "Zuschalten Pfannenofen verschieben" durchlaufen wird. Damit wird ein wenig glaubwürdiges An- und Abschalten der entsprechenden Meldung in der Ofenleitwarte wie gewünscht vermieden. Auch die maximal mögliche Dauer der Empfehlungsausgabe wird so eingehalten, weil der entsprechende Funktionsblock aufgrund der vorherigen Abfrage erst innerhalb des letzten Zeitfensters in einer jeden Messperiode erreicht werden kann.
Die Funktionsblöcke "Transformatorstufe Schmelzofen herunterschalten" beinhalten eine Abfrage, ob der momentane Zeitpunkt in der aktuellen Messperiode nach dem frühestmöglichen erlaubten Eingriffszeitpunkt von 7,5 min liegt. Nur wenn dies der Fall ist, wird als neuer Transformatorstufen-Maximalwert der aktuelle Wert minus Eins, ansonsten jedoch der Wert 18 ausgegeben. Durch diese Abfrage werden allzu frühzeitige Lastkontrolleingriffe verhindert und damit das Risiko, aufgrund dieser frühen Schalthandlungen das Leistungslimit nicht vollständig nutzen zu können, begrenzt.
Schließlich sind die Funktionsblöcke "Maximale Transformatorstufe Schmelzofen bei aus- / eingeschaltetem Pfannenofen bestimmen und ausgeben" näher zu betrachten. Diese unterscheiden sich in ihrer Funktionalität in Abhängigkeit davon, ob der Abstich der Schmelze im Elektrolichtbogenofen für die aktuelle Bezugsperiode prognostiziert wird oder nicht.
Findet der Abstich voraussichtlich nicht in der aktuellen Viertelstunde statt, so wird in diesen Blöcken mittels einer Schleife die höchstmögliche Stufe bestimmt, bei der das Leistungslimit voraussichtlich noch eingehalten wird. Diese iterative Vorgehensweise wird bei der Trans-

formatorstufe begonnen, die um Eins größer ist als die aktuelle. Eine Überprüfung der aktuellen Stufe bezüglich ausreichender noch verfügbarer Energie ist dabei nicht notwendig, da im Entscheidungsbaum jedem der hier beschriebenen Funktionsblöcke eine dementsprechende Abfrage vorausgeht. In der Schleifenabbruchbedingung ist nicht nur die bei der zu prüfenden Transformatorstufe im Leistungs-Erwartungswerte-Kennfeld (vgl. Kapitel 2.1.2) hinterlegte mittlere Leistungsaufnahme zu berücksichtigen, sondern auch deren mögliche Schwankungsbreite. Wird diese nicht mit einkalkuliert, so ergibt sich möglicherweise beim nächsten Durchlauf der Prognoseberechnungen und des Entscheidungsbaums wieder die Notwendigkeit zur Herunterschaltung. Dieser Fall tritt insbesondere dann ein, wenn die sich bei der erhöhten Stufe einstellende Leistungsaufnahme über dem Erwartungswert liegt, zusätzlich noch Schwankungen in den Leistungsaufnahmen der Grundlast und des Pfannenofens auftreten und die aktuelle Gesamtleistungsaufnahme des Stahlwerkes dicht am Leistungslimit liegt. Der resultierende Wechsel zwischen Herauf- und Herunterschalten kann auch als schwingendes Verhalten bezeichnet werden, das aufgrund der dadurch hervorgerufenen übermäßigen Belastung des Stufenschalters unbedingt zu vermeiden ist.
Die notwendige Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens kommt der Implementation einer Hysterese zwischen Herauf- und Herunterschaltpunkt bei der Bestimmung der maximal anzufahrenden Transformatorstufe gleich. **Bild 4.11** verdeutlicht dies für die Schaltpunkte zwischen zwei benachbarten Stufen n und $n+1$, wobei W_{el15Rest} die in der Viertelstunde noch verfügbare Energie, W_{el15prog} die laut den Prognoserechnungen unter den aktuellen Bedingungen insgesamt noch benötigte elektrische Energie und $\Delta W_{\mathrm{elHysterese}}$ die Hysterese repräsentiert.

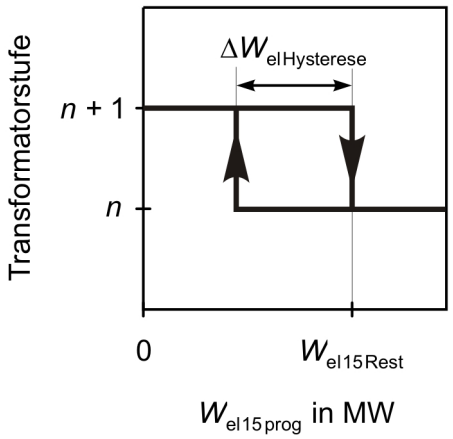


Bild 4.11: Hysterese zwischen Herauf- und Herunterschaltpunkt bei der Transformatorstufenvorgabe durch den prädiktiven Lastkontrollalgorithmus

Der Abfall der Kurve um eine Stufe bei $W_{\mathrm{el15prog}} = W_{\mathrm{el15Rest}}$ entspricht der zuvor beschriebenen Funktionalität der Funktionsblöcke "Transformatorstufe Schmelzofen herunterschalten", da diese, unter Beachtung der erwähnten zeitlichen Bedingung, sofort eine Herunterschaltung herbeiführen, sobald die Prognoseenergie größer als die verfügbare ist. Eine erneute Heraufschaltung kann dagegen aufgrund der Hysterese erst erfolgen, wenn die prognostizierte noch benötigte Energie W_{el15prog} bei der höheren Stufe die noch beziehbare Energie mindestens um den Wert von $\Delta W_{\mathrm{elHysterese}}$ unterschreitet.
Die Bemessung dieser Hysterese $\Delta W_{\mathrm{elHysterese}}$ erfolgt anhand der in Abhängigkeit von Transformatorstufe und Schmelzfortschritt bestimmten elektrischen Wirkleistung P_{elEAF} des Elekt-

rolichtbogenofens. Dazu werden diese Messwerte zunächst entsprechend der in Kapitel 3.2.4 dargestellten Vorgehensweise mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests und des χ^2-Tests jeweils zum Konfidenzniveau von 95 % auf Normalverteiltheit untersucht. Beide Tests bestätigen in diesem Fall die Hypothese, dass die Leistungsmesswerte normalverteilt sind. Daher entspricht die aus diesen Messwerten bestimmte Streuung $s_{P\,\mathrm{elEAF}}$ hier der Standardabweichung $\sigma_{P\,\mathrm{elEAF}}$ der zu Grunde liegenden Normalverteilung. Je nach Transformatorstufe und Schmelzfortschritt liegt diese Streuung bzw. Standardabweichung zwischen 3 MW und 8 MW, mit abnehmender Tendenz zu höheren Transformatorstufen und späteren Schmelzphasen.
Die Festlegung des Hysteresewertes kann nun analog zu der ebenfalls in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Argumentation bezüglich der Bemessung des Sicherheitsaufschlags für die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit bis zum Abstich erfolgen. Hier lässt sich aufgrund der Normalverteiltheit direkt feststellen, dass 84 % der Leistungswerte P_{elEAF} kleiner als der zugehörige Mittelwert plus eine Standardabweichung $\sigma_{P\,\mathrm{elEAF}}$ sind. Wird nun die Schalthysterese dementsprechend gewählt, so sollte in mindestens ebenso vielen Fällen die sich bei der erhöhten Stufe einstellende Leistungsaufnahme in den mit der Hysterese berücksichtigten Bereich fallen. Somit wird ein schwingendes Verhalten vermieden. Zu beachten ist hierbei, dass diese Hysterese ein Energiewert ist, der sich durch

$$\Delta W_{\mathrm{elHysterese}} = \sigma_{P\,\mathrm{elEAF}} \cdot t_{15\mathrm{Rest}} \tag{4.6}$$

aus der Standardabweichung der Leistungsmesswerte und der in der Viertelstunde verbleibenden Restzeit $t_{15\mathrm{Rest}}$ berechnet.
Da sich je nach aktueller Transformatorstufe und aktuellem Schmelzfortschritt unterschiedliche Standardabweichungen ergeben, wäre es zum einen möglich, während der Laufzeit die bei den Schalthandlungen zu berücksichtigende Hysterese ebenfalls in Abhängigkeit von diesen Größen zu bestimmen. Zum anderen ist durch diese Vorgehensweise wegen der im Vergleich zur Anschlussleistung des Lichtbogenofens geringen Unterschiede jedoch keine nennenswerte Verbesserung bei der Vermeidung von schwingendem Schaltverhalten zu erwarten. Daher wird für die Hystereseberechnung im Folgenden nur ein von Transformatorstufe und Schmelzfortschritt unabhängiger Leistungsschwankungswert herangezogen. In einem ersten Versuch wird dieser Wert auf 3 MW festgelegt. **Bild 4.12** zeigt ein mit dieser Einstellung erzieltes Ergebnis im Verlauf einer Charge.
In der zweiten Hälfte der Messperiode zwischen 14 min und 29 min tritt im Verlauf dieser Charge trotz der zwischen den Herauf- und Herunterschaltpunkten liegenden Hysterese das zu vermeidende schwingende Verhalten der Transformatorstufenvorgabe durch den prädiktiven Lastkontrollalgorithmus auf. Dies ist hier auf die zu diesem Zeitpunkt vorherrschende hohe Leistungsaufnahme aller Verbraucher zurückzuführen, die auch daran erkennbar wird, dass die tatsächliche Lastkurve zum Zeit dieses Eingriffs sehr dicht an der idealen Lastkurve liegt. Auch ist zu beobachten, dass die Schwankungen in den Leistungsaufnahmen des Elektrolichtbogenofens und der Grundlast in diesem Zeitraum größer als 3 MW sind, so dass obige Bemessung der Hysterese auf genau diesen Wert zu klein erscheint. Im Weiteren wird daher der Hysteresewert auf 6 MW verdoppelt, womit das Auftreten von Verläufen wie dem oben dargestellten wirkungsvoll vermieden werden kann.
Damit ist für den Fall, dass der Abstich des Schmelzofens nicht in der aktuellen Bezugsperiode vorgesehen wird, ein zweckmäßiges und schwingungsreduzierendes Zusammenspiel der Funktionsblöcke, welche die Transformatorstufen-Stellbefehle bestimmen, gegeben.

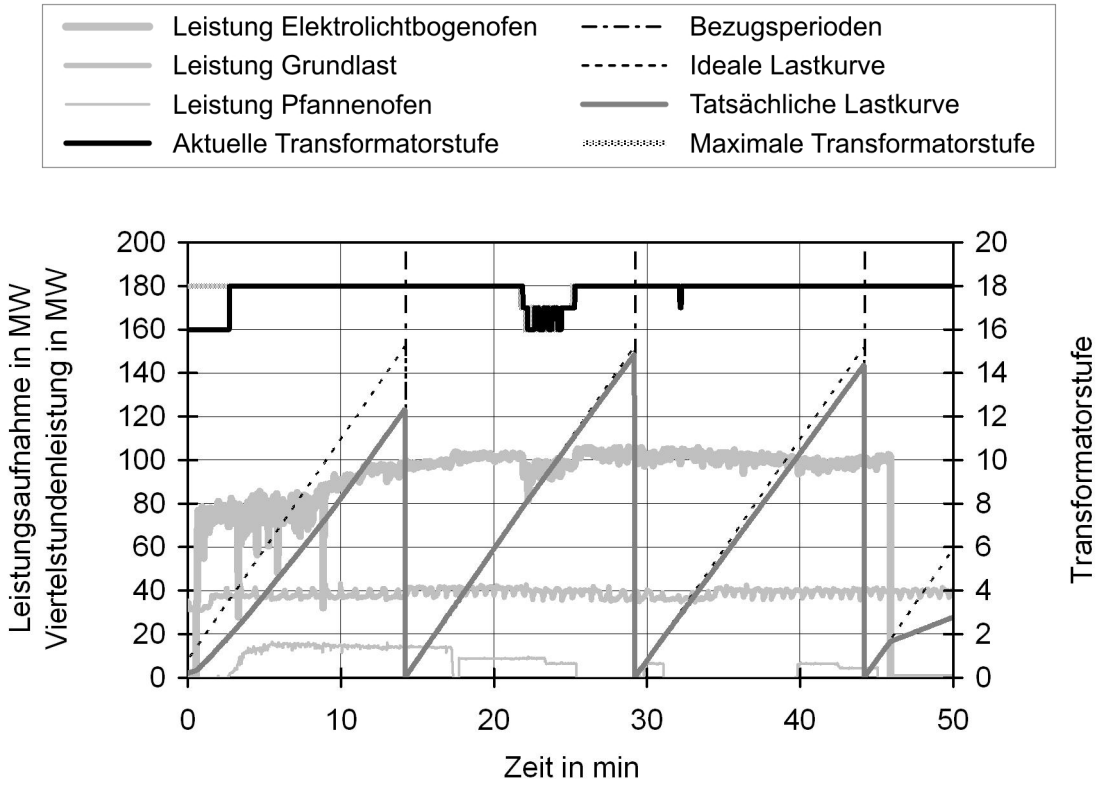


Bild 4.12: Leistungsaufnahmen, Lastkurven sowie aktuelle und vom prädiktiven Lastkontrollalgorithmus vorgegebene maximale Transformatorstufe im Verlauf einer Einzelcharge mit schwingendem Verhalten der Eingriffe des neuen Algorithmus

Falls die Prognose der verbleibenden Stromflusszeit den Abstich des Schmelzofens jedoch für die aktuelle Viertelstunde vorsieht, so wird die maximale Transformatorstufenvorgabe in den entsprechenden Funktionsblöcken nicht mittels einer Schleife bestimmt, sondern es wird grundsätzlich die höchstmögliche Stufe, d.h. 18, ausgegeben. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass in den Viertelstunden mit Abstich für den Elektrolichtbogenofen die für die aktuelle Schmelze laut Prognose noch benötigte elektrische Energie vorgesehen wird. Diese ist per Definition in den Modellgleichungen (3.5), (3.9) und (3.11) unabhängig von der Transformatorstufe, d.h. wenn die aktuelle Lastsituation der Prognoserechnung nach ein Beenden der Schmelze innerhalb der jeweiligen Messperiode erlaubt, so kann dies aus lastkontrolltechnischer Sicht bei der höchstmöglichen Transformatorstufe geschehen.
Die Wahrscheinlichkeit, dass diese pauschale Maximalstufenvorgabe ein schwingendes Verhalten auslöst, wird als sehr gering eingeschätzt. In Einzelfällen kann es zwar vorkommen, dass bei prognostiziertem Abstich die zur Fertigstellung der aktuellen Charge in der betreffenden Bezugsperiode benötigte Energie nicht mehr verfügbar ist. Dies ist jedoch vorrangig in solchen Situationen zu erwarten, in denen der Abstichzeitpunkt laut Prognose kurz vor dem Ende der Viertelstunde liegt. Gemäß dem Entscheidungsbaum würde in dieser Situation die Transformatorstufe trotz bevorstehendem Abstich frühzeitig leicht heruntergeschaltet. Damit würde sich jedoch aufgrund der verminderten Leistungsaufnahme des Schmelzofens die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit entsprechend verlängern, wobei eine Verschiebung über das Messperiodenende hinaus sehr wahrscheinlich erscheint. Somit würde beim nächsten Durchlauf des Entscheidungsbaums nicht mehr von einem in

der aktuellen Viertelstunde anstehenden Abstich ausgegangen und die zuvor beschriebene, hysteresebehaftete Heraufschaltfunktionalität würde wieder greifen. Letztendlich ist anhand der Betriebsergebnisse in Kapitel 5.2 zu beurteilen, ob die getätigten Annahmen im Langzeitbetrieb Gültigkeit zeigen.

Über die bisher beschriebene Funktionalität hinaus enthalten alle Funktionsblöcke, die Transformatorstufen-Stellbefehle bestimmen und ausgeben können, zunächst eine Abfrage, ob seit dem letzten Transformatorstufen-Stellbefehl mindestens 15 s vergangen sind. Nur wenn dies der Fall ist, wird die weitere Funktionalität des betreffenden Blocks durchlaufen. Damit wird der geforderte zeitliche Mindestabstand zwischen aufeinander folgenden Stellbefehlen eingehalten.

5 Implementation und Ergebnisse

5.1 Technischer Aufbau im Stahlwerk

Die Implementation des in Kapitel 4.4 entwickelten prädiktiven Lastkontrollalgorithmus erfolgt über die Anbindung an die im Stahlwerk installierte herkömmliche Lastkontrollanlage, die somit um die prognosebasierten Funktionen erweitert wird. Insgesamt ergibt sich so eine auf Elektrostahlwerke zugeschnittene Lösung, die über die üblichen lastkontrolltechnischen Zielsetzungen hinaus auch eine an den Produktionsprozess angepasste Ausführung der notwendigen Lastkontrolleingriffe bietet.

Die im Stahlwerk vorhandene herkömmliche Lastkontrollanlage besteht im Wesentlichen aus einem Embedded PC, der eine übliche Maximumwächter-Lastkontrollstrategie ausführt. Die dazu notwendigen Messdaten erhält dieser PC dabei über die Anbindung an die von den Stromzählern ausgegebenen Zählimpulse sowie an das vom EVU übertragene 15 min-Synchronsignal. Weiterhin besteht eine serielle Datenverbindung zum Prozessleitsystem des Stahlwerkes, über die weitere Messdaten der einzelnen elektrischen Verbraucher abgerufen werden können. In umgekehrter Richtung können über diese Verbindung auch Stellbefehle an das Prozessleitsystem zurück übertragen werden, beispielsweise zur Beeinflussung der Transformatorstufe des Elektrolichtbogenofens. Darüber hinaus kann der Embedded PC durch Ausgabe elektrischer Steuersignale auch direkt die Lastschütze (Ofenschalter) ansteuern, über die Schmelz- und Pfannenofen mit Strom versorgt werden.
Um eine hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten, ist der Embedded PC redundant ausgeführt, d.h. es gibt zwei exakt gleiche Geräte, die parallel arbeiten. Zu jedem Zeitpunkt werden jedoch immer nur die Stellbefehle eines der beiden Embedded PCs an die angeschlossenen Anlagen weitergeleitet. Bei Störungen im Betrieb des gerade aktiven PCs wird automatisch auf den anderen umgeschaltet, so dass nun dessen Stellbefehle ausgeführt werden. Damit ist ein nahezu ausfallsicherer Betrieb der Gesamtanordnung möglich, da ein Ausfall beider Geräte zur selben Zeit als äußerst unwahrscheinlich anzunehmen ist. In den folgenden Darstellungen wird auf diese Redundanz nicht weiter eingegangen und die Parallelstruktur wird der Einfachheit halber als ein einzelnes Gerät betrachtet.
Die Parametrierung des Embedded PCs erfolgt über eine dazugehörige Software auf einem Microsoft Windows-basierten Industrie-PC, mit dem eine Ethernetverbindung besteht. In dieser Software können so die für die Lastkontrolle wichtigen Parameter wie z.B. das Leistungslimit, die Prioritäten, mit welchen bestimmte elektrische Verbraucher zu- oder abzuschalten sind, sowie bestimmte Schaltschwellen eingestellt werden, um die Lastkontrolle an die Erfordernisse der zu kontrollierenden elektrischen Gesamtanlage anzupassen. Weiterhin erlaubt es die Software, die aktuellen Leistungsverbrauchswerte sowie eine Reihe von weiteren Messwerten aus dem Embedded PC auszulesen und zu visualisieren. Auch umfangreiche Auswerte- und Archivierungsmöglichkeiten gehören zum Funktionsumfang dieser Software [Berg 08].
Darüber hinaus kann das zu der im Stahlwerk vorhandenen Lastkontrollanlage gehörende Softwarepaket sämtliche Messdaten über eine OPC-Schnittstelle anderen Anwendungen zur Verfügung stellen, die auf dem selben Industrie-PC ausgeführt werden. Diese Schnittstelle erlaubt es diesen anderen Anwendungen im Gegenzug auch, ihrerseits Daten an das Lastkontroll-Softwarepaket zurückzusenden.

Unter Beachtung der in Kapitel 4.4.2 dargestellten Rahmenbedingungen zur Entwicklung und Implementation der verbesserten, prognosebasierten elektrischen Lastkontrolle bietet es sich daher an, den vorgestellten prädiktiven Lastkontrollalgorithmus in Form eines Softwaremoduls an die bestehende Lastkontrollanlage anzubinden. Über die mit der OPC-Schnittstelle gegebenen umfangreichen Kommunikationsmöglichkeiten können diesem Softwaremodul sämtliche erforderlichen Daten aus dem Prozessleitsystem sowie die aktuellen Stromzählerwerte und das 15 min-Synchronsignal zugeführt werden. Ebenso können die im Modul entsprechend dem neuen Lastkontrollalgorithmus bestimmten Stellbefehle auf diesem Wege an die herkömmliche Lastkontrollanlage übermittelt werden. **Bild 5.1** zeigt diesen Gesamtaufbau der erweiterten Lastkontrollanlage.

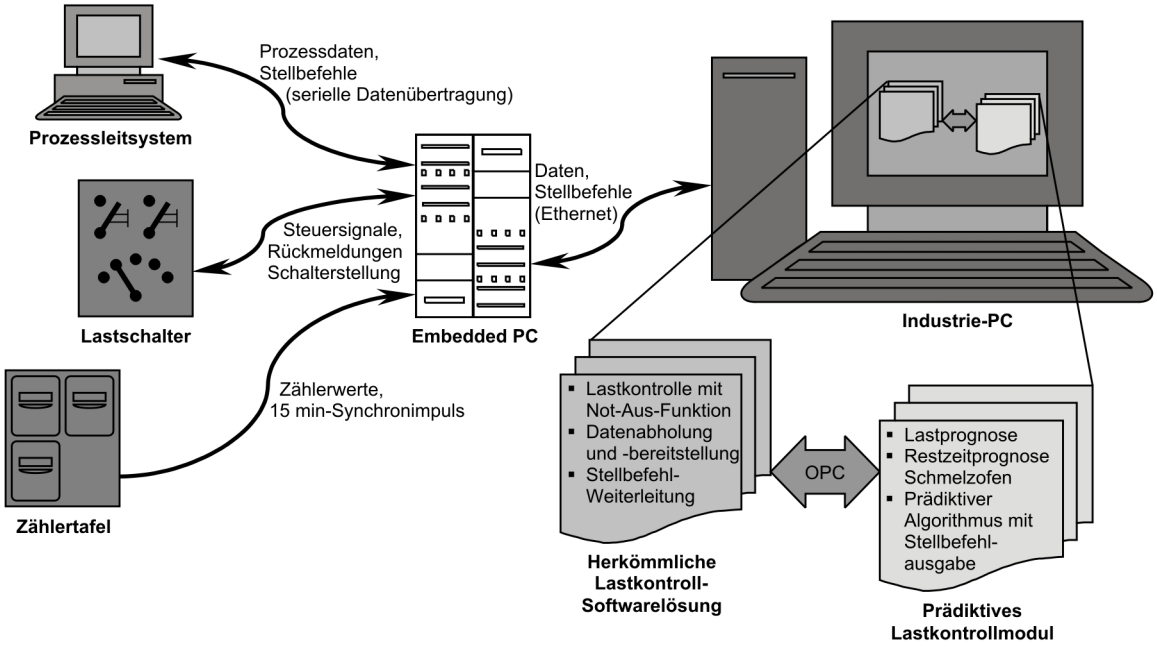


Bild 5.1: Technischer Aufbau der erweiterten Lastkontrollanlage im Stahlwerk

Die Signalllaufwege der drei vom prädiktiven Lastkontrollmodul ausgegebenen Stellbefehle ergeben sich demnach wie folgt. Die maximal anzufahrende Transformatorstufe am Schmelzofen sowie die Empfehlung zur Zuschaltverschiebung des Pfannenofens werden zunächst per OPC an die herkömmliche Lastkontrollsoftware übertragen, von dort über die Verbindung zum Embedded PC weitergegeben und schließlich über dessen serielle Anbindung an das Prozessleitsystem dorthin übermittelt. Das Prozessleitsystem konfiguriert die Ansteuerlogik des Transformatorstufenschalters daraufhin so, dass die vorgegebene Maximalstufe auch von den anderen Regelungen nicht überschritten werden kann. Weiterhin gibt das Prozessleitsystem bei Eintreffen des entsprechenden Stellbefehls auf einem Bildschirm in der Ofenleitwarte eine Meldung aus, welche dem Ofenbediener ein Verschieben des Zuschaltzeitpunktes des Pfannenofens empfiehlt. Der dritte Stellbefehl des neuen Lastkontrollmoduls betrifft die Blockierung von Eingriffen der herkömmlichen Lastkontrollanlage und wird nicht an das Prozessleitsystem weitergeleitet, sondern direkt in der herkömmlichen Lastkontrollsoftware ausgewertet. Wenn dieser Befehl die Software per OPC erreicht, veranlasst sie den Embedded PC, etwaige zu diesem Zeitpunkt bereits eingeleitete Lastkontrolleingriffe

zurückzunehmen und auch keine weiteren Eingriffe zu tätigen, solange bis das Signal zur Blockierung aus dem prädiktiven Algorithmus nicht mehr ansteht.
Über diese zur prozessangepassten Lastkontrolle notwendigen Stellsignale hinaus sendet das prädiktive Lastkontrollmodul ebenfalls über die OPC-Schnittstelle ein so genanntes Life-Tick-Signal in Form eines in regelmäßigen Abständen von 5 s alternierenden Datenbits an die herkömmliche Software. Wird dieses Life-Tick-Signal nicht mehr gesendet, so ist von einer Fehlfunktion oder einem Absturz des prädiktiven Moduls auszugehen und die herkömmliche Software ignoriert in diesem Fall alle ggf. noch anstehenden Stellbefehle dieses Moduls. Somit ist die Aufrechterhaltung der Lastkontrolle mittels der herkömmlichen Strategie auch bei Störungen im neuen Softwaremodul sichergestellt.
Kommt es auf Seiten der herkömmlichen Lastkontrollsoftware zu Fehlfunktionen in der OPC-Kommunikation, so wird dies im neuen prädiktiven Modul erkannt, da in diesem Fall bei dem Versuch, auf die entsprechenden OPC-Daten zuzugreifen ein Fehler zurückgegeben wird. Die entsprechende Fehlerbehandlung im neuen Modul besteht darin, bei Abbruch der OPC-Verbindung alle 5 min einen neuen Verbindungsaufbau zu versuchen. Auf diese Weise ist eine zügige Wiederherstellung der gesamten erweiterten Lastkontrollfunktionalität gewährleistet, sobald die in der herkömmlichen Software aufgetretene Fehlfunktion behoben ist.

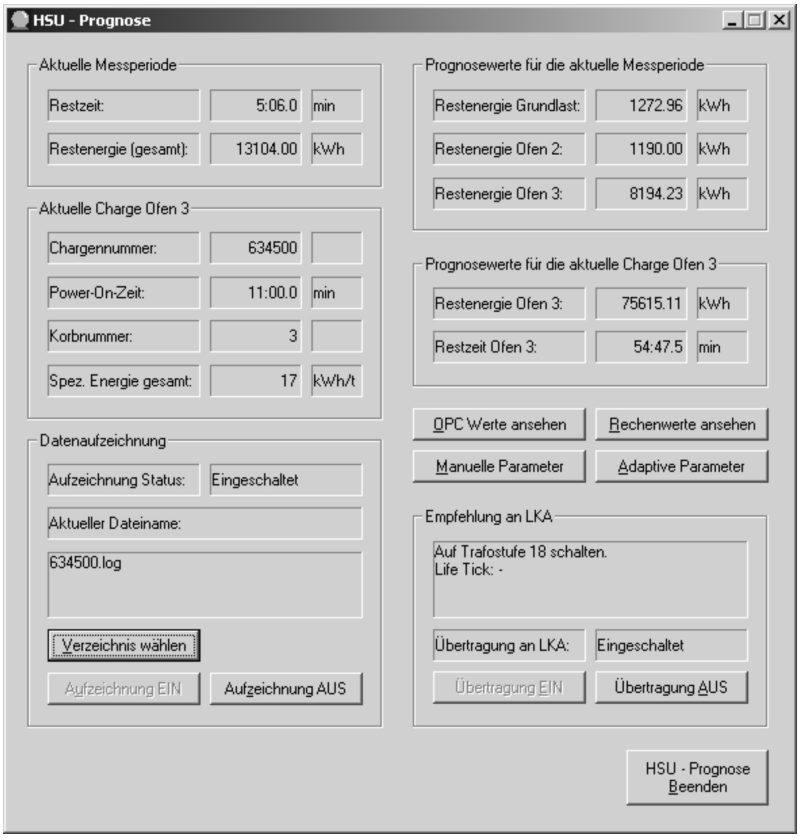


Bild 5.2: Benutzeroberfläche des prädiktiven Lastkontrollmoduls

Für den Benutzer bietet das neue prädiktive Lastkontrollmodul zunächst das in **Bild 5.2** dargestellte Übersichtsfenster, in dem die wichtigsten aktuellen Prognosedaten sowie die aktuelle Lastsituation angezeigt werden. Weiterhin ist es hier möglich, eine Datenaufzeichnung zu konfigurieren und zu starten sowie den Betriebsmodus auszuwählen. Dieser Modus entscheidet dabei darüber, ob die errechneten Stellbefehle an die herkömmliche Lastkontroll-

software übermittelt werden oder nicht. Letzteres kann z.B. zu Beobachtungszwecken erwünscht sein.
Aus dem Hauptfenster heraus sind vier weitere Fenster aufrufbar. Das erste dient zur Visualisierung des OPC-Kommunikationsstatus und der aktuellen Werte, die darüber zu bzw. von der herkömmlichen Software übertragen werden. Hier kann bei Vorliegen eines Verbindungsfehlers darüber hinaus auch manuell ein neuer Verbindungsaufbau gestartet werden. Ein weiteres Fenster zeigt zu Überwachungszwecken die aktuellen Prognosewerte inklusive aller Zwischenrechenwerte an. Die Möglichkeit zur Beobachtung der aktuellen Werte der adaptiven Parameter besteht in einem dritten Fenster. Die Liste dieser adaptiven Parameter umfasst dabei die Leistungserwartungswerte für Schmelz- und Pfannenofen sowie für die Grundlast und die zur Prognose der verbleibenden Stromflusszeit des Schmelzofens erforderlichen Energiebedarfskoeffizienten und Einsatzmassenerwartungswerte. Das vierte Fenster schließlich beinhaltet eine Reihe von Eingabefeldern, in die der Benutzer Werte für die manuellen Parameter eintragen kann. Unter manuellen Parametern sind hierbei die Dauer der Bezugsperioden, das einzuhaltende Leistungslimit, die zeit- und einsatzmassenbezogenen Grenzen für die sichere Erkennung des charakteristischen Rückgangs der DRI-Zufuhrrate, die Größe des Sicherheitsaufschlags für die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit des Schmelzofens sowie die Werte der Zeitfenster für die frühzeitigen Lastkontrolleingriffe am Schmelzofen, die Verschiebung des Zuschaltzeitpunktes des Pfannenofens und die Freigabe der Blockierung der herkömmlichen Lastkontrollanlage bei fehlerhafter Prognose zu verstehen.

Die programmiertechnische Implementierung erfolgt objektorientiert auf Basis eines Beobachter-Entwurfsmusters (Observer Design Pattern). Zentrales Objekt ist hierbei das Prozessdatenobjekt, das alle berechnungs- und prognoserelevanten Daten enthält. Alle weiteren Funktionen des Programms sind in weiteren Objekten untergebracht, die sich als so genannte Beobachter an diesem Prozessdatenobjekt anmelden können. Auf Anforderung setzt das Prozessdatenobjekt alle registrierten Beobachter über erfolgte Änderungen in den gespeicherten Prozessdaten in Kenntnis. Dieser prinzipielle Aufbau besitzt den Vorteil, dass alle Objekte stets auf dieselbe Datenbasis mit den gerade aktuellen Werten zugreifen. Darüber hinaus ist so eine leichte Integration weiterer Objekte möglich, die durch einfache Anmeldung am zentralen Datenobjekt sofort über sämtliche Daten verfügen können. Auch das Hinzufügen weiterer Prozessdaten wird durch eine dem Entwurfsmuster entsprechende Programmstruktur erheblich erleichtert, da dies nur einmal an zentraler Stelle erfolgen muss [Gamma 94].
Das prädiktive Lastkontrollmodul enthält neben dem Prozessdatenobjekt je ein Objekt zur Ansteuerung der verschiedenen Dialogfenster, d.h. zur Visualisierung der jeweiligen Daten sowie zum Auslesen der Benutzereingaben. Die Kommunikation mit der herkömmlichen Lastkontrollsoftware ist in einem als OPC-Client bezeichneten Objekt implementiert und ein Datenlogger-Objekt beinhaltet die notwendigen Funktionen zur Aufzeichnung der Mess- und Prognosedaten auf die Festplatte des Industrie-PCs. Angesteuert werden alle diese Objekte von einem so genannten LKA-Objekt, welches nach einmaliger Initialisierung aller Objekte und Anmeldung am Prozessdatenobjekt ein im 1 s-Takt timergesteuertes Zeitraster ausführt. In diesem Zeitraster werden die Prognoseberechnungen, der eigentliche Lastkontrollalgorithmus und die Parameteradaption durchgeführt, wobei die aktuellen Parameter in einer Datei abgespeichert werden, damit diese beim nächsten Programmstart wieder zur Verfügung stehen. Auch werden in jedem Zeitrasterdurchlauf indirekt über das Prozessdatenob-

jekt die Funktionen aller Beobachter-Objekte zur Datenaktualisierung aufgerufen. Daraufhin werden durch den OPC-Client die in diesem Zeitschritt bestimmten Stellbefehle an die herkömmliche Software übermittelt und neue Prozessdaten von dort abgeholt sowie die aktuellen Mess- und Rechenwerte vom Datenlogger in die Aufzeichnungsdatei geschrieben. Darüber hinaus wird so die regelmäßige Aktualisierung der Anzeigewerte und das Auslesen der Benutzereingaben in den Dialogfenster-Objekten angestoßen. **Bild 5.3** veranschaulicht diese Programmstruktur.

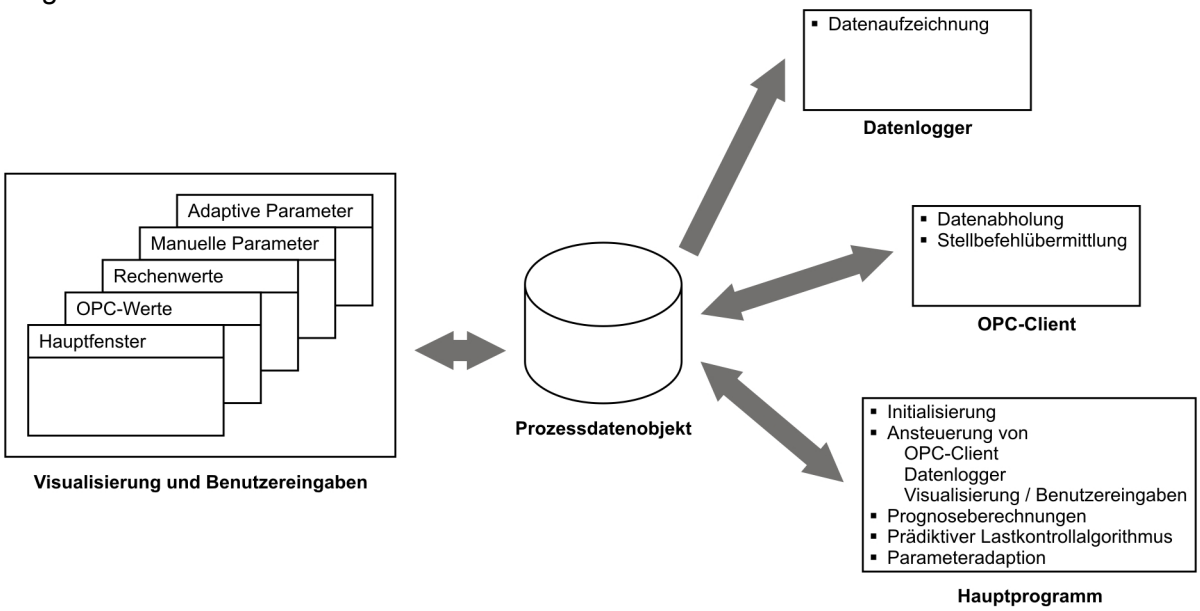


Bild 5.3: Interne Programmstruktur des prädiktiven Lastkontrollmoduls

Für die anzustrebende zuverlässige erweiterte Lastkontrolle ist die Echtzeitfähigkeit des zu erstellenden prädiktiven Lastkontrollmoduls unerlässlich. Insbesondere ist die Einhaltung der 1 s-Programmtaktung wichtig, da diese Taktzeit unter anderem bei der Integration der Leistungswerte zur Berechnung der bereits in die Schmelze eingebrachten elektrischen Energie herangezogen wird. Die Erstellung echtzeitfähiger Anwendungen in einer Microsoft Windows-Umgebung, wie sie auf dem hier verwendeten Industrie-PC besteht, ist zwar aufgrund der ereignisgesteuerten Struktur dieses Betriebssystems grundsätzlich nicht möglich, dennoch kann aber durch hardwarenahe Programmierung die Zykluszeit des zu erstellenden Programms auf ein Minimum reduziert werden. So ist auch in diesem Fall eine Quasi-Echtzeitfähigkeit zu erreichen. Aufgrund dieser Erwägungen erfolgt die Implementierung des prädiktiven Lastkontrollmoduls in Visual C++.
Die dazu verwendete Programmierumgebung gestattet die Messung der Zykluszeiten bei der Ausführung der neu erstellten Anwendung. Diese Messwerte sollten deutlich unter der durch den einzuhaltenden Zeittakt vorgegebenen Maximaldauer liegen, die ein Programmdurchlauf in Anspruch nehmen darf. Somit erlaubt die gemessene Zykluszeit eine Beurteilung der zu erwartenden Echtzeitfähigkeit der Anwendung.
Bei Ausführung des prädiktiven Lastkontrollmoduls unter Microsoft Windows XP auf einem PC mit einem Intel Pentium 4 Prozessor mit einer Taktfrequenz von 3 GHz und 1 GB Hauptspeicher ergibt sich die Zykluszeit eines Programmdurchlaufs im Normalfall bei eingeschalteter Datenaufzeichnung zu 24,1 ms. Dabei werden die Zeiten für die grafische Darstellung der Dialogfenster nicht berücksichtigt. Wenn in dem betreffenden Durchlauf zusätzlich noch die Berechnung und Abspeicherung der neuen Werte für die adaptiven Parameter stattfindet,

weil die aktuelle Charge am Schmelzofen beendet ist, erhöht sich diese Zeit auf 32,4 ms. Bei ausgeschalteter Datenaufzeichnung fallen die Zykluszeiten rund 3,2 ms kürzer aus. Zusätzlich zu diesen für die eigentliche Berechnung der Prognosewerte und Stellsignale benötigten Zeiten entfallen ca. 87,9 ms auf die grafische Visualisierung mittels der dazu im Betriebssystem vorhandenen Funktionen. Insgesamt ergibt sich also für einen kompletten Programmdurchlauf eine Zykluszeit von ca. 112 ms wenn keine Adaptionsberechnungen durchgeführt werden und mit diesen Berechnungen werden gut 120 ms benötigt. Die bei Programmstart stattfindende Initialisierung dauert ca. 2 s.
Da die einzuhaltende Taktzeit für die Prognoseberechnungen mit 1 s sehr viel größer als die gemessenen Zykluszeiten von maximal 120 ms sind, kann davon ausgegangen werden, dass nach erfolgter Programminitialisierung die timergesteuerte Ausführung des Programms innerhalb des vorgegebenen Takts in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle gelingt. Damit ist hier die geforderte Quasi-Echtzeitfähigkeit gegeben.

5.2 Betriebsergebnisse

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellte Gesamtanordnung wird im hier betrachteten Elektrostahlwerk der Arcelor Mittal GmbH in Hamburg zur prozessoptimierten erweiterten Lastkontrolle in Betrieb genommen. Über einen Zeitraum von sechs Tagen werden die im Folgenden auszuwertenden Betriebsergebnisse aufgezeichnet.
Die Lastkontrolloption zur Verschiebung des Zuschaltpunktes des Pfannenofens ist während dieses Testbetriebs nicht im Einsatz, da die dazu notwendigen Einstellungen im Prozessleitsystem des Werkes noch nicht vollständig implementiert sind. Daher kann hier eine Bewertung des Nutzens dieser Option noch nicht vorgenommen werden.
Alle weiteren Optionen werden aktiv im Betrieb genutzt. Die manuelle Parametrierung des prädiktiven Lastkontrollmoduls erfolgt entsprechend der in den vorherigen Kapiteln dieser Arbeit genannten Grenzwerte und anhand des zum Zeitpunkt der Messung gültigen Leistungslimits von 152,5 MW. Die Werte der verwendeten adaptiven Parameter beruhen auf der fortwährenden automatischen Anpassung über eine Dauer von ca. acht Monaten. In dieser Zeitspanne, die dem hier betrachteten Messzeitraum vorausgeht, läuft das neue Lastkontrollmodul zu Beobachtungs- und Validierungszwecken ohne die Ausgabe eigener Stellbefehle. Es kann daher zum Zeitpunkt der Aktivierung der Stellbefehlsausgabe des prädiktiven Moduls von bestmöglich an den Prozess angepassten Parametern ausgegangen werden.
Während der Messung werden 109 Einzelchargen prozessiert. Die Messdatenaufzeichnung durch das prädiktive Lastkontrollmodul erfolgt chargenbasiert in Einzeldateien, und damit unabhängig von der lastkontrolltechnisch relevanten Viertelstundenaufteilung. Die Messperioden zu Beginn und Ende der einzelnen Chargendateien sind daher in vielen Fällen nicht vollständig in der jeweiligen Datei enthalten. Für die Auswertung sind diese nicht komplett aufgezeichneten Bezugsperioden nicht relevant und werden nicht berücksichtigt, da hier kein oder nur ein kurzzeitiger Leistungsbezug durch den Elektrolichtbogenofen stattfindet und die resultierende Viertelstundenleistung deutlich unter dem Leistungslimit liegt.

Im Folgenden werden verschiedene Teilaspekte der neuen erweiterten Lastkontrollanlage im Betrieb entsprechend der in Kapitel 4.4 genannten Zielsetzungen ausgewertet. Zunächst erfolgt eine Abschätzung der aufgrund der frühzeitig eingreifenden Schaltstrategie möglichen Unterschreitung des Leistungslimits. Wie in Kapitel 4.4.3 dargelegt, hängt dieses Potential im Wesentlichen von der Schaltverzögerung zwischen der Ausgabe eines Transformatorstufen-

stellbefehls durch das neue Lastkotrollmodul und dem Zeitpunkt, zu dem diese Stufe tatsächlich angefahren ist, ab. Anhand der Auswertung von 30 repräsentativen Schaltspielen ergibt sich eine mittlere Schaltverzögerung von 10 s. Während dieser Zeit können die Leistungsdifferenz zwischen der aktuellen Stufe und der nächsthöheren sowie zusätzlich dazu die der Schalthysterese entsprechende Leistung nicht aufgenommen werden. Da die mittlere Leistungsdifferenz zwischen zwei benachbarten Transformatorstufen ca. 5 MW und die implementierte Hysterese 6 MW betragen, ist somit eine Energie von

$$(5\ \text{MW} + 6\ \text{MW}) \cdot 10\ \text{s} = 30{,}6\ \text{kWh} \tag{5.1}$$

nicht mehr zu beziehen. Umgerechnet auf 15 min entspricht dies einer Viertelstundenleistung von 0,12 MW. Um diesen Wert würde also das Leistungslimit im ungünstigen Fall eines unnötigen frühzeitigen Lastkontrolleingriffs unterschritten werden. Dieser Wert ist gegenüber den genannten Vorzügen dieser Schaltstrategie und im Vergleich zu dem wesentlich größeren Leistungslimit von 152,5 MW vertretbar.

Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung der Häufigkeit der Transformatorstufenschaltungen, welche durch das neue Lastkontrollmodul hervorgerufen werden. Bei dieser Auswertung werden alle vollständig aufgezeichneten Messperioden herangezogen sowie diejenigen, deren Aufzeichnung am Ende einer Chargendatei abbricht. Letztere können trotz der Unvollständigkeit unter diesem Teilaspekt betrachtet werden, da davon auszugehen ist, dass der Schmelzofen während der fehlenden, aufgrund des Chargenendes nicht mehr aufgezeichneten Minuten stillsteht, so dass sich eine geringe Gesamtleistungsaufnahme des Werkes und damit keine weiteren Lastkontrolleingriffe ergeben. Aufgrund dieser Auswahl kann die Auswertung der Schalthäufigkeiten auf Basis von 448 Messperioden erfolgen. Dabei wird für jede dieser Viertelstunden zum einen die Gesamtzahl der beobachteten Änderungen der Transformatorstufe bestimmt und zum anderen die Zahl solcher Schaltungen, die vom neuen Lastkontrollmodul verursacht werden. Letztere werden daran erkannt, dass einer Änderung der Maximalstufenvorgabe innerhalb eines Zeitfensters von 13 s eine entsprechende Änderung der aktuellen Transformatorstufe folgt. Die Länge des Zeitfensters wird anhand der mittleren, aus den Messungen bestimmten Schaltverzögerung von 10 s plus einem Sicherheitsbeiwert von 3 s gewählt.
In **Bild 5.4** ist das sich ergebende Histogramm der Schalthäufigkeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass in über 90 % der Messperioden keine Transformatorstufenschaltung vom neuen Lastkontrollmodul verursacht wird. In weiteren 6 % werden zwei solcher Schaltungen registriert. Dies erscheint plausibel, da aufgrund der frühzeitig eingreifenden Schaltstrategie in vielen Messperioden eine einmalige Herunter- und eine darauf in gewissem Abstand folgende Heraufschaltung zu erwarten ist. Die restlichen 4 % entfallen auf die übrigen Häufigkeitsklassen. Die Zahl der insgesamt beobachteten Schalthandlungen dagegen verteilt sich deutlich anders auf die Messperioden, hier ist die Anzahl der Bezugsperioden mit einer oder mehreren Schaltungen immer höher als bei der Verteilung der vom neuen Lastkontrollmodul hervorgerufenen Stufenänderungen. Die Schaltstrategie des neuen Moduls erhöht die Zahl der erforderlichen Transformatorstufenschaltungen daher gegenüber dem Betrieb des Werkes ohne Lastkontrollanlage nicht nennenswert, was der Zielsetzung einer möglichst geringen Mehrbeanspruchung der Lastschalter durch die erweiterte LKA entspricht.

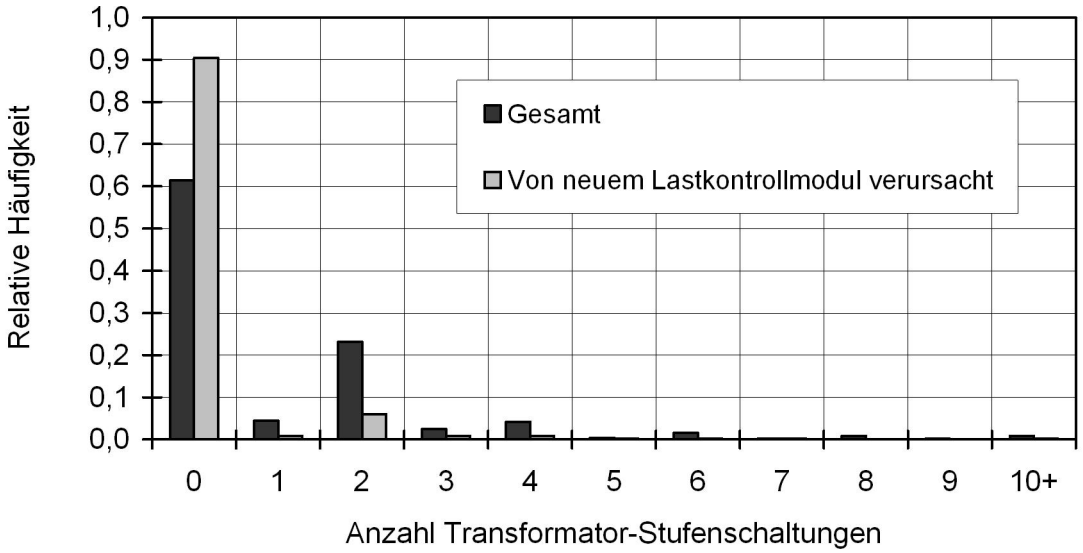


Bild 5.4: Häufigkeit der gesamten und der vom prädiktiven Lastkontrollmodul verursachten Transformatorstufenschaltungen

Im Folgenden werden zwei Einzelfälle näher betrachtet, in denen eine größere Zahl von lastkontrollbedingten Schalthandlungen durch das neue Modul verursacht wird.

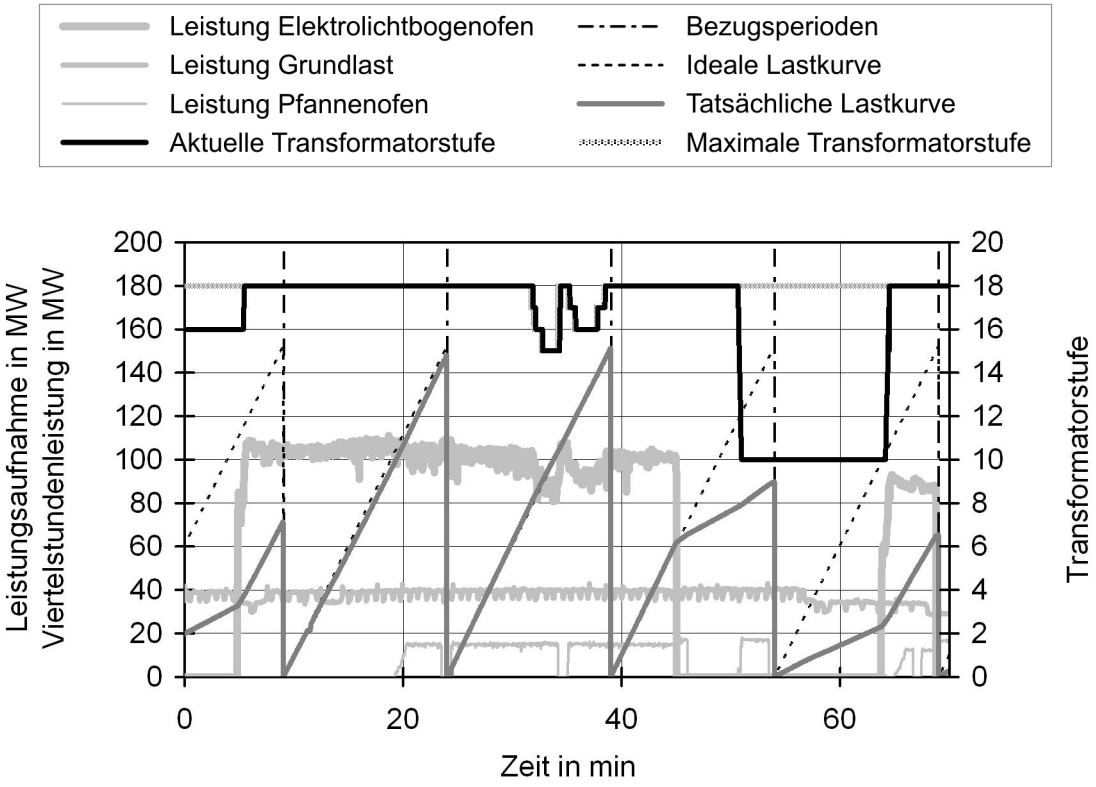


Bild 5.5: Leistungsaufnahmen, Lastkurven sowie aktuelle und vom prädiktiven Lastkontrollmodul vorgegebene maximale Transformatorstufe im Verlauf einer Einzelcharge mit sieben Eingriffen des neuen Moduls

Der Verlauf einer Einzelcharge in **Bild 5.5** verdeutlicht, dass hier in der Messperiode zwischen 24 min und 39 min sieben Lastkontrolleingriffe getätigt werden, da zum einen eine hohe Gesamtleistungsaufnahme des Stahlwerkes mit teilweise über dem idealen Verlauf liegender Lastkurve zu verzeichnen ist und zum anderen der Pfannenofen in der Phase dieser hohen Leistungsaufnahme kurzzeitig abgeschaltet wird. Dies hat entsprechend der implementierten Schaltstrategie zur Folge, dass nach der frühzeitigen Herunterschaltung bei 32 min mit dem Abschalten des Pfannenofens bei 35 min sofort wieder hochgeschaltet wird, weil ab diesem Zeitpunkt keine weitere Energie für den Pfannenofen vorgesehen wird. Da dieser jedoch bei 37 min mit hoher Leistungsaufnahme erneut zugeschaltet wird, erfolgt zur Einhaltung des Leistungslimits ein weiterer Lastkontrolleingriff.
Die beobachtete Häufung von Transformatorstufenschaltungen ist also konform mit dem implementierten Algorithmus. Ein Verschieben des erneuten Zuschaltens des Pfannenofens wäre in diesem Einzelfall nicht möglich gewesen, da diese Option erst innerhalb der letzten 1,5 min der Messperiode genutzt werden kann. Eine Verbesserung des Schaltverhaltens, das in gleichartigen Situationen weniger oft eingreift, lässt sich daher bestenfalls durch eine andere Modellierung des zu erwartenden Lastgangs des Pfannenofens erzielen. Würde hier beispielsweise trotz des ausgeschalteten Pfannenofens ein gewisser Energiebedarf für die restlichen Minuten der Bezugsperiode für diesen Verbraucher vorgesehen, so würde der Transformator nicht, wie beobachtet, schlagartig um drei Stufen wieder heraufgeschaltet, sondern sukzessive. Damit könnte zwar eventuell das Leistungslimit nicht mehr ganz bezogen werden, doch es würden sich insgesamt weniger Schalthandlungen am Stufenschalter ergeben.

Die Verläufe der prognose- und lastkontrolltechnisch relevanten Prozessdaten für einen weiteren extremen Einzelfall zeigt **Bild 5.6**. Hier werden in der Messperiode von 35 min bis 50 min über zehn Herunter- und Heraufschaltungen durch das neue Lastkontrollmodul ausgelöst und es zeigt sich ein schwingendes Verhalten in der Stufenvorgabe. Dabei ist zu beachten, dass in der betreffenden Viertelstunde der Abstich des Schmelzofens prognostiziert wird und daher entsprechend der bei der Entwicklung des Schaltalgorithmus getätigten Annahmen in Kapitel 4.4.3 keine Hysterese zwischen den Herauf- und Herunterschaltpunkten wirkt.
Da in diesem Fall die erstmalige Reduktion der Transformatorstufe bei 43 min offensichtlich nicht wie vermutet zu einer Verlängerung der prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens über die in der Bezugsperiode verbleibende Zeit hinaus führt, schwingt die Stufenvorgabe im Folgenden entsprechend der Schwankungen der Gesamtleistungsaufnahme. Die Tatsache, dass der Abstich hier zusätzlich noch eher eintritt als prognostiziert, resultiert letztendlich in einer deutlichen Unterschreitung des Leistungslimits am Ende der Messperiode. Somit sind die hier erfolgten massiven Lastkontrolleingriffe und die erhebliche Belastung des Stufenschalters nicht zu rechtfertigen.
Der entwickelte Schaltalgorithmus bedarf daher an dieser Stelle einer Verbesserung, um zukünftig eine bessere Reaktion auf ähnliche Fälle zu gewährleisten. In Frage kämen hierzu die folgenden Optionen. Zunächst ließe sich die Transformatorstufenvorgabe gewissermaßen festsetzen, sobald in einer Bezugsperiode mit prognostiziertem Abstich einmal Heruntergeschaltet worden ist. Auf diese Weise würde zwar einerseits keine erneute Hochschaltung erfolgen und das schwingende Verhalten somit unterdrückt. Andererseits könnte das Leistungslimit entweder bei der reduzierten Stufe aufgrund eines frühzeitigen Abstichs oder aufgrund des Abschaltens anderer Verbraucher nicht mehr erreicht werden oder, falls die

geringfügige Leistungsreduktion um eine Stufe nicht ausreicht, sogar ein Eingriff der Not-Aus-Funktion hervorgerufen werden. Diese Lösung ist daher zu verwerfen.

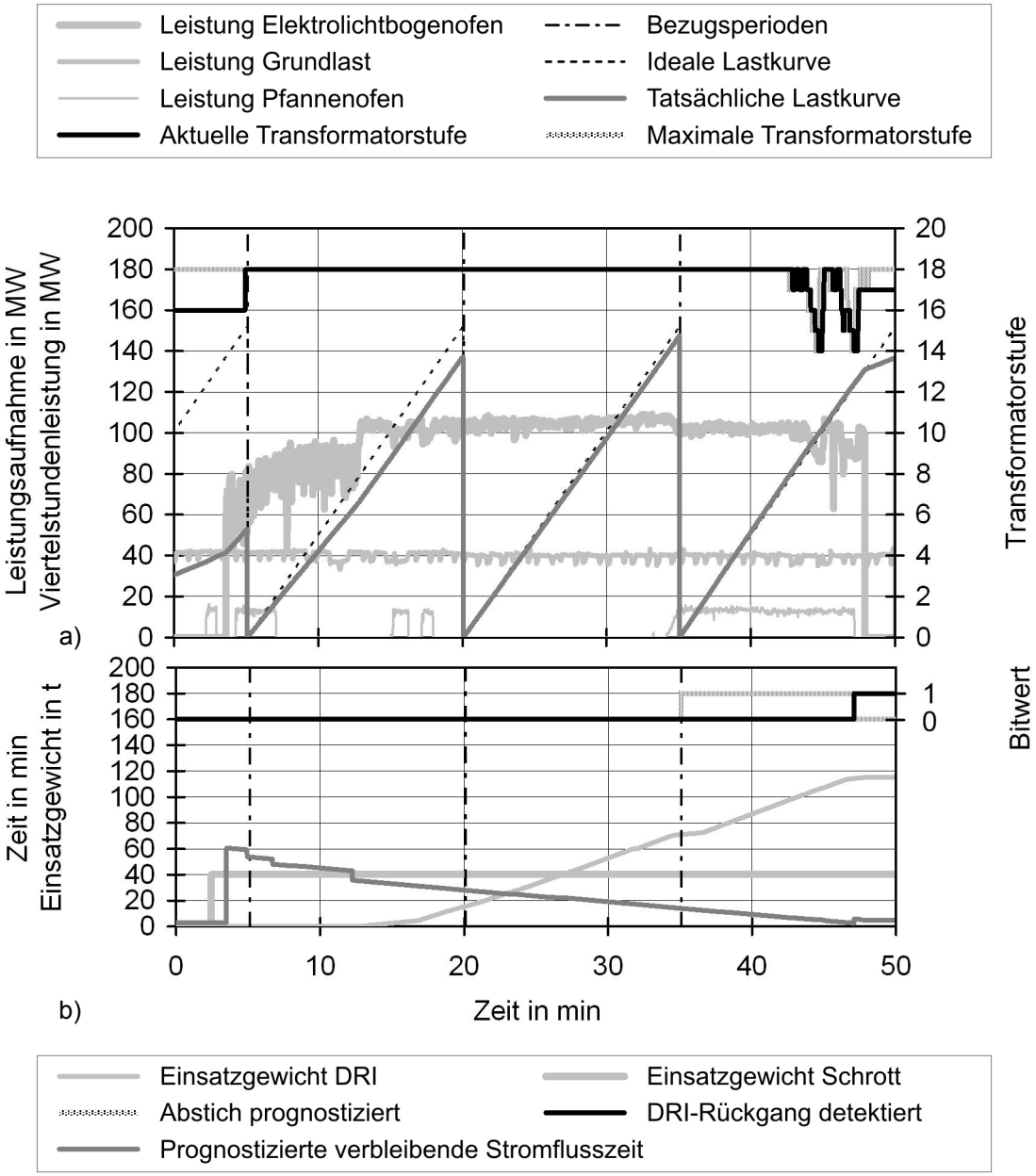


Bild 5.6: Verlauf einer Einzelcharge mit über zehn Eingriffen des prädiktiven Lastkontrollmoduls und schwingendem Verhalten bei prognostiziertem Abstich, a) Leistungsaufnahmen, Lastkurven sowie aktuelle und vom neuen Modul vorgegebene maximale Transformatorstufe, b) Einsatzgewichte, prognostizierte verbleibende Stromflusszeit sowie Status der Detektion des charakteristischen Rückgangs der DRI-Zufuhrrate und der Abstichprognose für die aktuelle Bezugsperiode

Eine weitere Verbesserungsoption besteht in der Verlängerung des Zeitfensters, das zwischen zwei aufeinander folgenden Schalthandlungen einzuhalten ist, für die Messperioden mit prognostiziertem Abstich. Auch diese Möglichkeit würde zwar eine Verringerung der Schwingungsfrequenz und damit auch der absoluten Anzahl der Schaltspiele erzielen, doch es könnten sich ähnliche Konsequenzen wie die vorgenannten ergeben. Die vielverspre-

chendste Lösung besteht daher auch hier in der Implementation einer Hysterese zwischen den Schaltpunkten wie in den Viertelstunden ohne Abstichprognose. Die Bemessung dieser Hysterese kann in diesem Fall jedoch nicht anhand der Leistungserwartungswerte des Elektrolichtbogenofens erfolgen, da für diesen hier grundsätzlich nur noch die bis zum Abstich benötigte Energiemenge veranschlagt wird. Vielmehr sind hier die Schwankungen in den Leistungsaufnahmen der anderen Verbraucher zu berücksichtigen.

Bei der Formulierung des neuen prädiktiven Schaltalgorithmus in Kapitel 4.4 besteht ein weiterer wesentlicher Aspekt in der Vermeidung von Lastkontrolleingriffen kurz vor Abstich, da diese als prozesstechnisch äußerst ungünstig zu bewerten sind und darüber hinaus in vielen Fällen zu einer unnötigen Unterschreitung des Leistungslimits führen. Es ist daher mit einer weiteren Auswertung der Betriebsergebnisse zu überprüfen, in wie weit dieses Ziel erreicht wird. Dazu werden alle Messperioden zunächst in solche mit und solche ohne Lastkontrolleingriff aufgeteilt. Bei letzteren ist es darüber hinaus notwendig, den jeweiligen Grund für das Nichteingreifen anhand einer weiteren Fallunterscheidung festzustellen. Zusätzlich werden für jede dieser Bezugsperioden die Transformatorstufenvorgaben, die von einer herkömmlichen Maximumwächter-Lastkontrollanlage zu erwarten wären, mittels einer Simulation bestimmt. So ist eine Feststellung darüber möglich, ob und wie häufig die neue Strategie die o.g. unerwünschten Eingriffe erfolgreich vermeidet.
Bei der Betrachtung der Abstiche werden nur diejenigen als relevante Ereignisse gewertet, die innerhalb der letzten 7,5 min der betreffenden Messperiode auftreten, da das prädiktive Lastkontrollmodul bei der gewählten Parametrierung nur innerhalb dieser Zeitspanne etwaige Transformatorstufenstellbefehle ausgeben kann. Darüber hinaus ist bei Abstichen in der ersten Hälfte der Viertelstunde von einem insgesamt niedrigen Leistungsbezug für diese Periode auszugehen, so dass diese für die weitere Bewertung nicht interessant sind.

Es ergibt sich die folgende Fallunterscheidung:

- Fall 1: LKA greift nicht ein bzw. vermeidet Eingreifen,
  - Fall 1.1: Energiemenge reicht grundsätzlich aus (inkl. nicht relevanter Abstich),
  - Fall 1.2: Abstich erfolgt, wird aber nicht prognostiziert (Prognose „zu lang“),
  - Fall 1.3: Abstich erfolgt und wird prognostiziert (Prognose zutreffend),
    - Fall 1.3.1: Ohne Abstichprognose würde eingegriffen,
    - Fall 1.3.2: Ohne Abstichprognose würde auch nicht eingegriffen,
  - Fall 1.4: Aufgrund von unzutreffender Prognose werden Abschaltungen durch die herkömmliche LKA hervorgerufen,
- Fall 2: LKA greift mit Schalthandlung ein.

Bild 5.7 zeigt die entsprechende Aufteilung der beobachteten 448 Messperioden in die genannten Fälle.

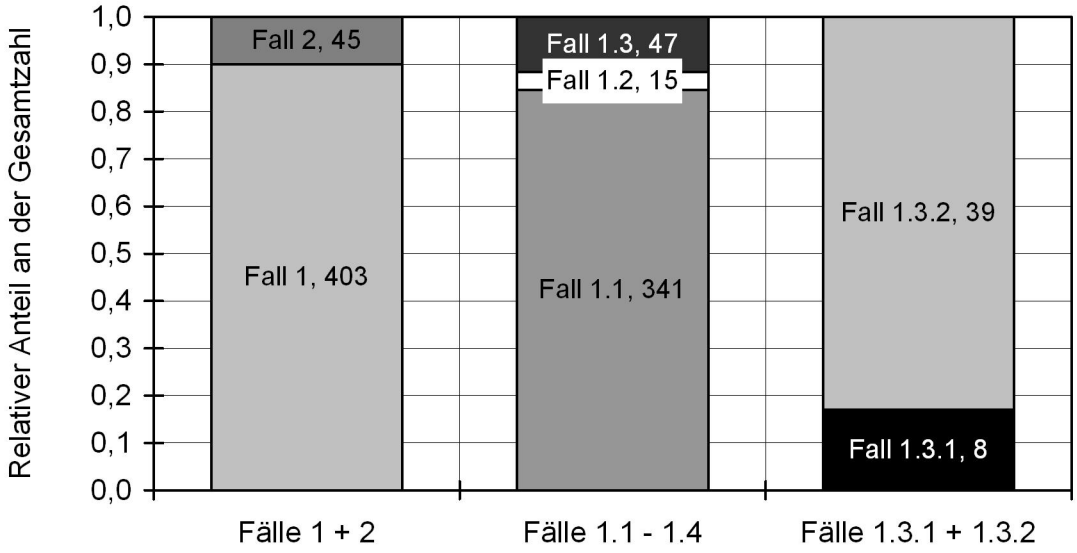


Bild 5.7: Fallunterscheidung der Eingriffe der erweiterten Lastkontrollanlage, relative Anteile bezogen auf verschiedene Fälle

Wie bei der Auswertung der Schalthäufigkeiten fällt auch hier auf, dass ein großer Anteil der Messperioden ohne Lastkontrolleingriff abläuft (Fall 1). Die weitere Unterteilung dieser Fälle zeigt, dass in der überwiegenden Zahl der Messperioden ohne Eingriff die Begründung für das Nichteingreifen in einem grundsätzlich niedrigen Leistungsbezug liegt (Fall 1.1). Zu beachten ist dabei, dass diese Fallzahl um die Messperioden mit Abstich in der ersten Hälfte der Viertelstunde erhöht ist, unabhängig davon, ob die Abstichprognose zutrifft oder nicht. Weiterhin fällt die Zahl der Fälle mit Abstich, der jedoch noch nicht prognostiziert wird, vergleichsweise gering aus (Fall 1.2). Dies zeigt, dass die in Kapitel 3.2.4 entwickelten Sicherheitsmaßnahmen nicht zu einer übermäßigen Häufung von Fehlprognosen aufgrund von zu lang abgeschätzter verbleibender Stromflusszeit führen. In Zusammenhang mit dem mehr als doppelt so großen Anteil der Fälle, in denen der Abstich richtig prognostiziert wird (Fall 1.3) kann festgestellt werden, dass die o.g. Maßnahmen sich im Betrieb der erweiterten Lastkontrollanlage als zweckmäßig erweisen. Dieses Ergebnis würde noch verstärkt, wenn die Abstiche in den ersten 7,5 min der Messperioden mit in diese Betrachtung einfließen würden. Der Fall einer wesentlich zu kurz prognostizierten Restzeit bis Abstich und eines daraus resultierenden drastischen Eingriffs der herkömmlichen Lastkontrollanlage am Messperiodenende (Fall 1.4) tritt während des Versuchszeitraums nicht auf, so dass auch hier von einer guten Wirksamkeit der ergriffenen Maßnahmen zu dessen Vermeidung (vgl. Kapitel 3.2.4) auszugehen ist. Schließlich resultiert die genauere Betrachtung der Messperioden mit zutreffender Abstichprognose im Zusammenhang mit der Simulation einer herkömmlichen Lastkontrollstrategie in der Feststellung, dass ohne das prädiktive Lastkontrollmodul in 8 von 47 Fällen ein unnötiger Lastkontrolleingriff kurz vor Abstich des Schmelzofens erfolgen würde (Fälle 1.3.1). Diese werden durch die neue prognosebasierte Schaltstrategie wirkungsvoll vermieden, so dass sich hier die erzielte Verbesserung gegenüber der herkömmlichen Lastkontrolle in besonderem Maße zeigt.

Für die Beurteilung einer Lastkontrollstrategie ist grundsätzlich auch die in den einzelnen Messperioden erreichte Viertelstunden-Durchschnittsleistung, also der Leistungsbezug, zu untersuchen, da im Sinne einer kostenoptimierenden Lastkontrolle ein möglichst vollständi-

ger Bezug der aufgrund des Leistungslimits zur Verfügung stehenden Energie anzustreben ist. Aufgrund der zuvor geschilderten chargenbasierten Aufzeichnung können für diese Auswertung nur diejenigen Messperioden herangezogen werden, die vollständig in einer Datei enthalten sind. **Bild 5.8** zeigt dazu das Histogramm der Viertelstunden-Leistungsbezüge für diese im Betrieb des neuen Lastkontrollmoduls vollständig aufgezeichneten 338 Messperioden. Das Ergebnis entspricht den zuvor bereits geschilderten Beobachtungen, in denen für den überwiegenden Teil der Bezugsperioden eine ausreichende Energiemenge und in Folge dessen keine Lastkontrolleingriffe festgestellt werden. So ergibt sich hier eine Häufung von Fällen, in denen der erreichte Leistungsbezug um 10 MW oder mehr unter dem Leistungslimit von 152,5 MW liegt. Diese schlechte Ausnutzung der verfügbaren Energie resultiert im Wesentlichen aus den Lastcharakteristiken der elektrischen Verbraucher und der Aufteilung der elektrischen Last im hier betrachteten Stahlwerk. Unabhängig von der angewandten Lastkontrollstrategie sind hier aufgrund prozesstechnischer Belange nur selten alle Verbraucher bei größtmöglicher Leistungsaufnahme gleichzeitig für einen längeren Zeitraum zugeschaltet, so dass ein vollständiger Bezug des Leistungslimits auch nur in diesen seltenen Fällen erzielt werden kann.

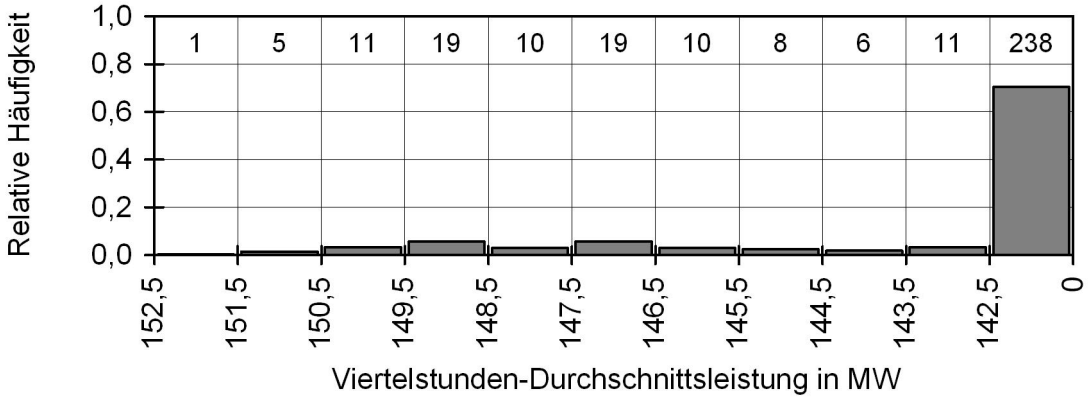


Bild 5.8: Histogramm der erreichten Viertelstunden-Durchschnittsleistungen über alle Bezugsperioden und Chargen einer Messkampagne

Es ist davon auszugehen, dass Lastkontrolleingriffe des prädiktiven Lastkontrollmoduls aufgrund der implementierten neuen Schaltstrategie nur in diesen grundsätzlich seltenen Fällen andauernd hoher Gesamtleistungsaufnahme auftreten. Die neue Lastkontrollstrategie ist daher im Folgenden daran zu bewerten, ob in den Messperioden mit von diesem neuen Modul verursachten Eingriffen ein möglichst hoher Leistungsbezug erreicht wird, oder ob das Eingreifen ggf. ein vollständiges Ausnutzen des Leistungslimits verhindert. In **Bild 5.9** ist das hierfür notwendige Leistungsbezugshistogramm dieser Viertelstunden dargestellt.
Im Bereich zwischen 152,5 MW und 143,5 MW zeigt sich ein, bis auf ein lokales Minimum in der Klasse von 147,5 MW bis 148,5 WM, augenscheinlich der Normalverteilung ähnelnder Verlauf, in dem über 80 % der beobachteten Leistungsbezüge liegen. Dies entspricht dem aufgrund der frühzeitig eingreifenden Strategie zu erwartenden Ergebnis. Da ein Überschreiten des Leistungslimits von 152,5 MW auf diese Weise sicher verhindert wird, ergibt sich eine unterhalb dieses Grenzwertes liegende Verteilung der erzielten Viertelstundenleistungen, die jedoch wie im Diagramm dargestellt mit dem Höchstwert in der Klasse zwischen 148,5 MW und 149,5 MW relativ dicht am Leistungslimit liegt. Dieses wird daher für über 60 % der innerhalb dieser Verteilung liegenden Messperioden nur um 4 MW oder weniger

unterschritten. Die vom prädiktiven Lastkontrollalgorithmus ausgelösten Schalthandlungen zeigen also eine gute Wirksamkeit zur Einhaltung und gleichzeitig möglichst vollständigen Ausnutzung des Leistungslimits. Eine Verteilung mit dem Höchstwert in der höchsten Leistungsklasse und abfallendem Verlauf in Richtung der niedrigeren Klassen ließe sich indes nur mit einer spät eingreifenden Strategie erzielen, da so die Energie bis zum Erreichen des Limits auf jeden Fall bezogen, dann jedoch drastische Herunter- bzw. Abschaltmaßnahmen getätigt würden. Die prozesstechnischen Nachteile einer solchen Strategie werden in Kapitel 4.4 ausführlich diskutiert. Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass die frühzeitig eingreifende Strategie zwar tendenziell nicht so hohe Leistungsbezüge erlaubt wie eine spät eingreifende, dennoch aber das Leistungslimit im Mittel nicht wesentlich schlechter ausnutzt.

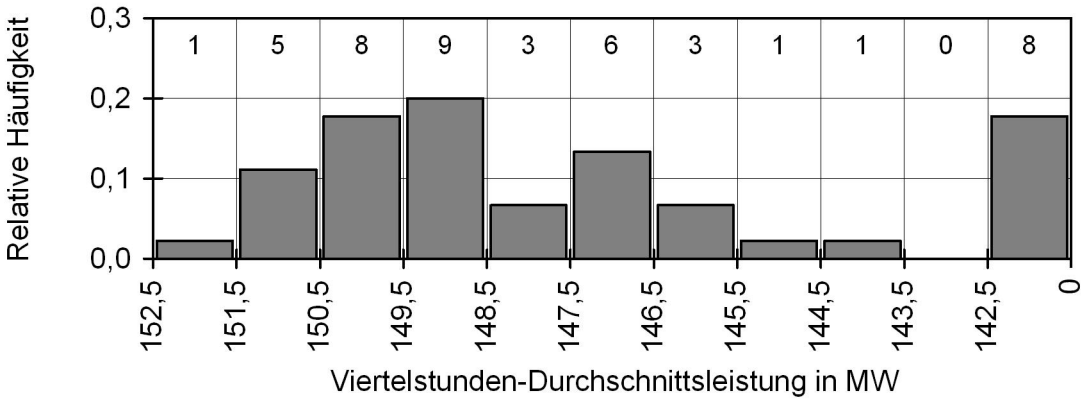


Bild 5.9: Histogramm der erreichten Viertelstunden-Durchschnittsleistungen über die Bezugsperioden mit Eingriff des prädiktiven Lastkontrollmoduls und alle Chargen einer Messkampagne

Neben dieser erklärlichen Verteilung zwischen Leistungslimit und 143,5 MW ist in Bild 5.9 in der Klasse von 0 MW bis 142,5 MW eine weitere Häufung von acht Messperioden erkennbar, in denen der Leistungsbezug trotz Lastkontrolleingriff um 10 MW oder mehr unter dem Leistungslimit liegt. Diese Fälle werden im Folgenden anhand von zwei exemplarischen Einzelchargenverläufen näher untersucht.

Bild 5.10 zeigt den ersten dieser Verläufe, wobei die beobachtete deutliche Unterschreitung des Leistungslimits in der Viertelstunde zwischen 33 min und 48 min auftritt. Hier wird entsprechend der frühzeitigen Schaltstrategie bereits bei 41 min die Transformatorstufe aufgrund von der hohen Gesamtleistungsaufnahme und dem laut Prognoserechnung noch nicht anstehenden Abstich reduziert. Im weiteren Verlauf kommt es bei 45 min zu einem unerwarteten, ca. 3 min dauernden Stillstand des Schmelzofens, so dass ab diesem Zeitpunkt wieder genügend Energie für den Betrieb des Ofens bei der höchsten Transformatorstufe zur Verfügung steht. Dies wird durch entsprechende Stufenvorgabe durch das prädiktive Lastkontrollmodul berücksichtigt. Dennoch ist aufgrund der während Stillstands nicht bezogenen Energie ein Erreichen des Leistungslimits nicht mehr möglich und der frühzeitige Lastkontrolleingriff erweist sich als unnötig. Eine Verbesserung der in diesen Fällen erzielten Ergebnisse ist nur durch Prognose der nicht abstichbezogenen Stillstände des Schmelzofens zu erzielen, die jedoch wie in Kapitel 2.1.2 erläutert kaum realisierbar erscheint.

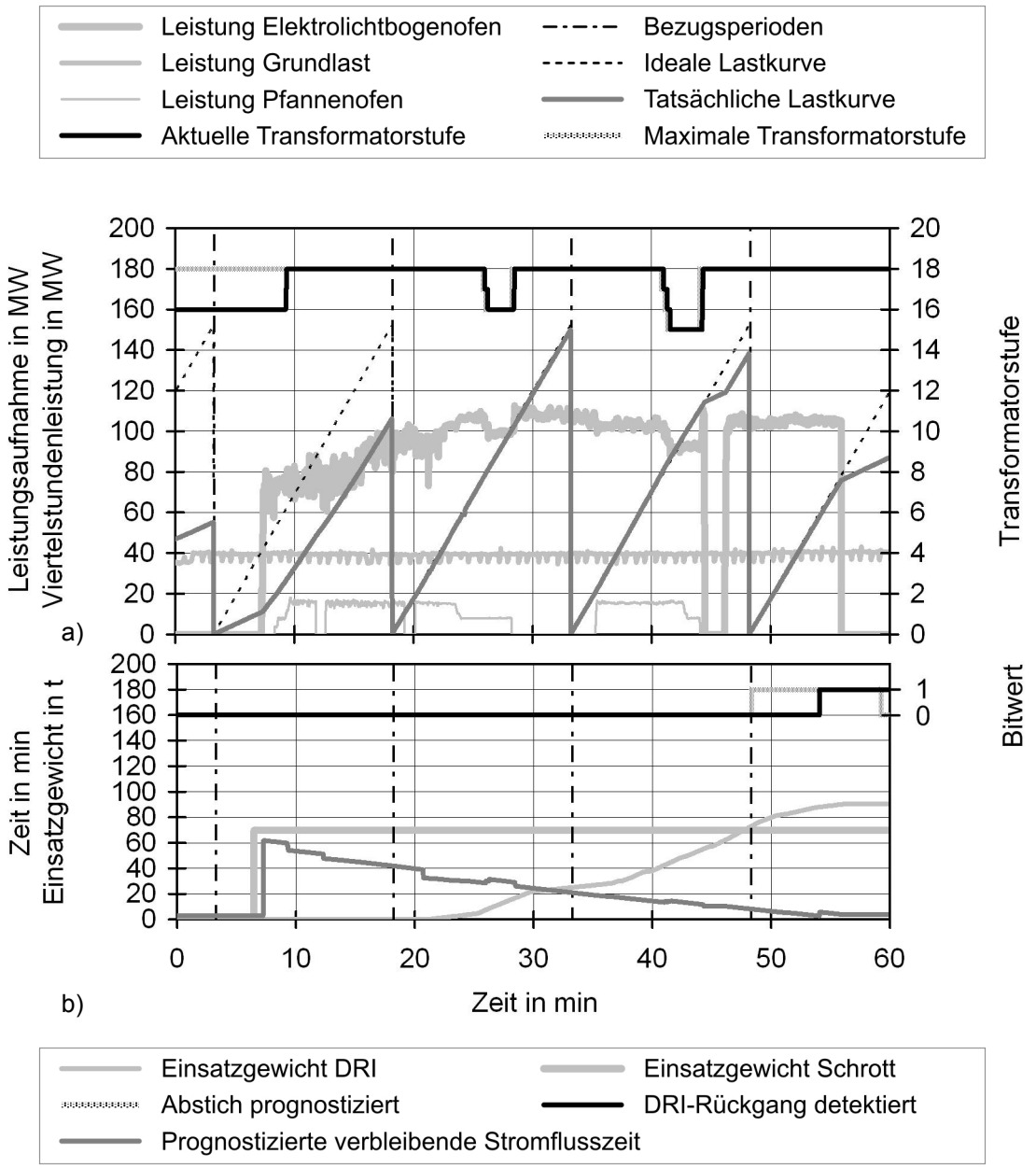


Bild 5.10: Verlauf einer Einzelcharge mit geringer Durchschnittsleistung in einer Bezugsperiode bei Eingriff des prädiktiven Lastkontrollmoduls wegen unerwartetem Stillstand des Elektrolichtbogenofens,
a) Leistungsaufnahmen, Lastkurven sowie aktuelle und vom neuen Modul vorgegebene maximale Transformatorstufe,
b) Einsatzgewichte, prognostizierte verbleibende Stromflusszeit sowie Status der Detektion des charakteristischen Rückgangs der DRI-Zufuhrrate und der Abstichprognose für die aktuelle Bezugsperiode

Der zweite Einzelchargenverlauf ist in **Bild 5.11** dargestellt. Hier tritt in der Messperiode zwischen 38 min und 53 min ein frühzeitiger, nicht prognostizierter Abstich des Schmelzofens auf. Aufgrund der vorangehenden hohen Gesamtleistungsaufnahme und der dicht an der idealen Kurve verlaufenden Lastkurve reduziert das neue Lastkontrollmodul bei 46 min die Transformatorstufe, da für den Elektrolichtbogenofen noch ein weiterer Energiebezug bis zum Bezugsperiodenende hin vorgesehen wird. Der frühzeitige Abstich führt jedoch dazu,

dass das Leistungslimit nicht mehr erreicht wird, so dass auch der in dieser Viertelstunde auftretende Lastkontrolleingriff des neuen Moduls nicht nötig gewesen wäre.

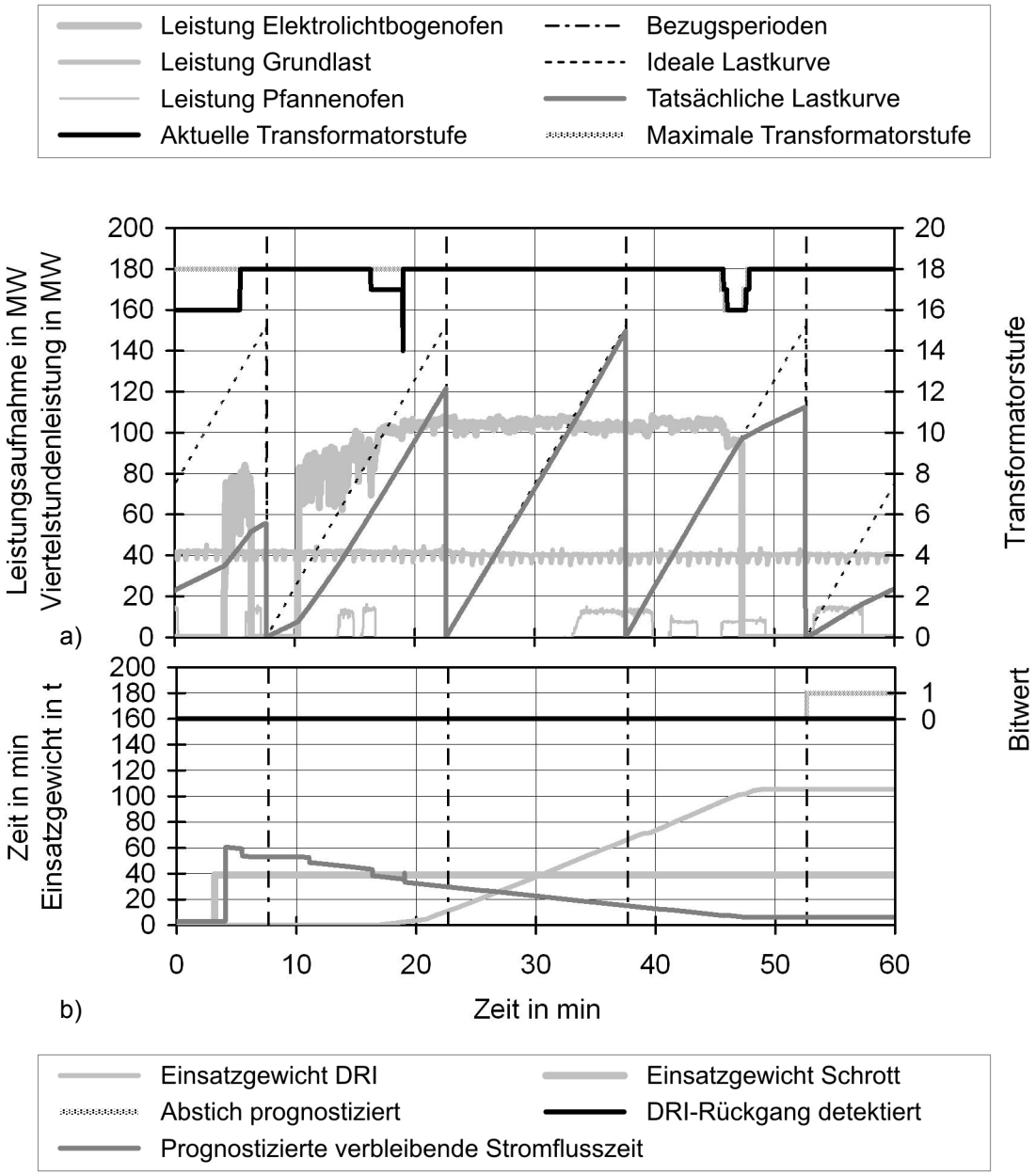


Bild 5.11: Verlauf einer Einzelcharge mit geringer Durchschnittsleistung in einer Bezugsperiode bei Eingriff des prädiktiven Lastkontrollmoduls wegen nicht prognostiziertem, frühzeitigem Abstich des Elektrolichtbogenofens, a) Leistungsaufnahmen, Lastkurven sowie aktuelle und vom neuen Modul vorgegebene maximale Transformatorstufe, b) Einsatzgewichte, prognostizierte verbleibende Stromflusszeit sowie Status der Detektion des charakteristischen Rückgangs der DRI-Zufuhrrate und der Abstichprognose für die aktuelle Bezugsperiode

Das Auftreten dieser Fälle einer unzutreffend langen prognostizierten verbleibenden Stromflusszeit des Schmelzofens wird in Kapitel 3.2.4 behandelt. Der dortigen Argumentation folgend, sind auch die nicht erforderlichen Eingriffe kurz vor Abstich wie in diesem Einzelfall aufgrund der Prognosemethodik nicht zu vermeiden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass

mit dem neuen Lastkontrollmodul deutlich weniger dieser unerwünschten Eingriffe auftreten als mit der herkömmlichen Lastkontrollstrategie, da diese nicht über eine Abstichprognose verfügt. Die neue Strategie verringert demnach die Zahl dieser Fälle auf diejenigen, in denen die Prognose des Abstichs aufgrund von ungewöhnlichen Prozessverläufen nicht zutrifft.

Damit ist aus den im Betrieb der erweiterten Lastkontrollanlage gewonnenen Ergebnissen insgesamt der Schluss zu ziehen, dass die neue Schaltstrategie bis auf wenige Einzelfälle die beim Entwurf des Algorithmus verfolgten Ziele erreicht. Darüber hinaus zeigen beinahe alle in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Maßnahmen zur Eindämmung der aus der neuen Strategie möglicherweise erwachsenden Nachteile Wirksamkeit. Allein das festgestellte mögliche schwingende Verhalten der maximalen Transformatorstufenvorgabe in den Messperioden mit prognostiziertem Abstich gibt Anlass zu einer Verbesserung des Algorithmus, die sich jedoch mit der Implementation einer weiteren Schalthysterese vergleichsweise einfach erreichen lässt.
Aufgrund der vorliegenden Betriebsergebnisse lässt sich eine Abwägung zwischen dem Nutzen der neuen Strategie einerseits und dem in besonderen Fällen möglicherweise nicht optimalen Schaltverhalten andererseits treffen. Die insgesamt beobachtete geringe Schalthäufigkeit, die trotz des frühzeitigen Eingreifens geringen zu erwartenden Verluste im Bezug auf den vollständigen Bezug des Leistungslimits, die wirkungsvolle Vermeidung von Lastkontrolleingriffen kurz vor Abstich des Schmelzofens sowie die insgesamt gute Ausnutzung des Leistungslimits zeigen, dass die vorgestellte Lösung das zuvor identifizierte Optimierungspotential gut ausschöpft.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit Methoden von überschaubarer Komplexität eine Verbesserung der elektrischen Lastkontrolle für ein Elektrostahlwerk zu erzielen. Die bisher im Werk vorhandene Lastkontrollanlage ermöglicht zwar das Erreichen lastkontrolltechnischer Ziele, berücksichtigt dabei jedoch nicht die besonderen Charakteristiken und die ungewöhnliche Aufteilung der elektrischen Lasten. Daher ergibt sich beim Betrieb dieser herkömmlichen Anlage ein großes Optimierungspotential, das es durch eine bessere Einbindung der prozesstechnischen Vorgänge, insbesondere am Elektrolichtbogenofen, in die Lastkontrollstrategie zu erschließen gilt.

Die zentrale Idee der Arbeit zur Lösung dieser Aufgabe besteht in der Vorhersage bzw. Prognose des für die einzelnen elektrischen Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen im Stahlwerk zu erwartenden Energiebedarfs. Aufgrund der durch die Tarifgestaltung des EVUs vorgegebenen 15 min-Taktung besteht ein besonderes Interesse daran, die Energiebezüge für eine dementsprechende Zeitspanne zu prognostizieren. Auf dieser Basis erscheint die anzustrebende, möglichst unmerkliche, dennoch aber wirkungsvolle Lastkontrolle realisierbar.

Einen ersten Ansatzpunkt zur Prognose der Energiebezüge stellt die Charakterisierung und Modellierung der Lastgänge der elektrischen Einzelverbraucher bzw. Verbrauchergruppen dar. Anhand der Beschreibung der Prozessvorgänge im Elektrolichtbogenofen und deren Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme dieses Aggregats wird ein auf den wesentlichen Einflussparametern Transformatorstufe und Schmelzfortschritt basierendes mathematisches Modell entwickelt. Gleichzeitig werden Methoden vorgestellt und evaluiert, die eine fortwährende Adaption dieses Modells an den Prozess erlauben. Damit ist die Vorhersage bzw. Prognose der für die nächsten Minuten erwarteten Leistungsaufnahme dieses Schmelzofens möglich. Zusätzlich gestattet es das entwickelte Modell, Veränderungen der Leistungsaufnahme durch Eingriffe der Lastkontrollanlage im Vorhinein abzuschätzen. Zur Prognose des Energiebedarfs innerhalb der aktuellen Bezugsperiode ist darüber hinaus die zeitliche Komponente zu berücksichtigen, d.h. es wird neben der Modellierung der Leistungsaufnahme auch ein Modell der zeitlichen Abfolge von Stromfluss- und Nebenzeiten im Betrieb des Elektrolichtbogenofens gefordert. Insbesondere ist es die Zielsetzung, mit diesem weiteren Modell eine Prognose der verbleibenden Stromflusszeit bis zum Beenden der aktuellen im Ofen befindlichen Schmelze zu ermöglichen.

Für den Pfannenofen des Werkes gestaltet sich die Modellbildung des Lastganges weitaus schwieriger, da hier innerhalb des für diese Arbeit zu verwendenden Prozessdatensatzes nur die momentane Leistungsaufnahme dieses Verbrauchers enthalten ist. Eine auf weiteren Daten aufbauende Prognose kann hier daher nicht erfolgen. Somit beschränkt sich die Abschätzung dieser Leistungsaufnahme zunächst auf die kontinuierliche Beobachtung des höchsten Leistungsaufnahmewertes, da dies vor dem Hintergrund, eine bestimmte Viertelstunden-Durchschnittsleistung nicht zu überschreiten, die am sichersten erscheinende Lösung darstellt. Für den Schluss von der Leistungsaufnahme auf den einzuplanenden Energiebedarf besteht im Falle des Pfannenofens eine weitere Schwierigkeit darin, dass dieser nicht vollautomatisiert zu- und abgeschaltet wird. Es ergibt sich daher eine aus Sicht der

Lastkontrollanlage stochastische Abfolge von Stromfluss- und Nebenzeiten dieses elektrischen Verbrauchers, die kaum zu prognostizieren ist. In einem ersten Ansatz wird daher zur Abschätzung des Energiebedarfs im Modell davon ausgegangen, dass der Pfannenofen seinen momentanen Schaltzustand zunächst beibehält.

Als letzte Verbrauchergruppe, deren Leistungsaufnahme in der Lastkontrolle zu berücksichtigen ist, stellt sich die Grundlast des Stahlwerkes dar. Auch hier kann die Modellierung ausschließlich auf den Leistungsmesswerten selbst aufbauen. Aufgrund der Ähnlichkeit der gemessenen Lastgänge mit auf stochastischen Prozessen beruhenden Zeitreihen wird hier eine entsprechende Zeitreihenmodellierung durchgeführt. Nach einer ausführlichen Vorstellung der anzuwendenden mathematischen Methoden erfolgt die Analyse des Lastganges mit dem Resultat, dass sechs einzelne stochastische Prozesse identifiziert und mittels den üblichen autoregressiven Moving-Average-Prozessmodellen (ARMA) zumindest ansatzweise beschrieben werden können. Damit ergibt sich eine erste Modellbildung, wobei sich die notwendige Zuordnung eines momentan gemessenen Leistungswerts zu einem dieser sechs Prozesse während der Laufzeit als schwierig darstellt. In Anbetracht des hohen Rechenaufwands, der zur Bestimmung der Modellparameter im Sinne einer adaptiven und damit über lange Zeit einsetzbaren Prognosestrategie notwendig ist und aufgrund der geringen Prognosegenauigkeit werden die stochastischen Prozessmodelle jedoch wieder verworfen. Es folgt die auf wesentlich einfacheren mathematischen Methoden basierende Modellbildung mit Hilfe der exponentiellen Mittelung. Diese beinhaltet eine fortwährende Adaption des Prognosewertes an den aktuellen zeitlichen Verlauf der Leistungsaufnahme, so dass hier eine einfache, hinreichend genaue und für den Langzeiteinsatz geeignete Prognose des Lastgangs gegeben ist.

Das geforderte Modell der zeitlichen Komponente des am Elektrolichtbogenofen auftretenden Leistungsaufnahmeverlaufs wird auf die Modellierung des für einen Schmelzprozess insgesamt zu erwartenden elektrischen Energiebedarfs gestützt. Dazu werden entsprechende bereits vorhandene Energiemodelle beschrieben und auf ihre Eignung zur chargenbegleitenden Prognose des für die aktuelle Schmelze noch erforderlichen elektrischen Energieeintrags untersucht. Die vorhandenen Modelle verwenden einerseits eine große Anzahl von Prozessparametern als Eingangsgrößen, von denen viele in den für diese Arbeit zu verwendenden Messwerten nicht zur Verfügung stehen oder die prinzipiell erst nach Fertigstellung der betreffenden Schmelze bestimmt werden können. Daher eignen sie sich ihrer Intention entsprechend ausschließlich zur Abschätzung des mittleren elektrischen Energiebedarfs für einen bestimmten Elektrolichtbogenofen in Abhängigkeit von den genannten umfangreichen Prozessdaten. Eine Prognose der für eine Einzelschmelze benötigten elektrischen Energie erscheint indes mit diesem Modellen nicht zweckmäßig.

Es werden daher drei Modelle identifiziert, die eine geringere Anzahl von Eingangsgrößen benötigen. Die in diesem Sinne einfacheren Modelle basieren im Wesentlichen auf der Berechnung eines einsatzmassenabhängigen elektrischen Energiebedarfs. Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen bestehen hierbei in der Aufteilung der einbezogenen Massewerte sowie in der zu Grunde gelegten elektrischen Energiemenge, die in die Schmelze einzubringen ist. Bei zwei Modellen wird der gesamte elektrische Energiebedarf betrachtet während das dritte ausschließlich die zum Warmfahren der Schmelze erforderliche Energie modelliert. Auch die Parameter dieser neuen Modelle stützen sich auf die mittleren beobachte-

ten Energieverbräuche vergangener Schmelzen und erlauben damit zunächst prinzipiell nur die Prognose eines mittleren Energiebedarfswertes für die aktuelle Schmelze. Insbesondere steht zu Schmelzbeginn die gesamte einzusetzende Masse an direktreduziertem Eisen (Eisenschwamm) noch nicht fest und ist daher zu diesem Zeitpunkt anhand der Erwartungswerte aus der Vergangenheit abzuschätzen und in die Prognoserechnung einzubeziehen. Um im weiteren Verlauf der Schmelze jedoch eine besser angepasste Prognoserechnung erreichen zu können, wird eine Methode zur kontinuierlichen Beobachtung der Eisenschwammzufuhr vorgestellt. Anhand dieser Methode gelingt es, zu charakteristischen Zeitpunkten im Schmelzverlauf eine Aktualisierung der Prognose vorzunehmen, so dass in den für die Lastkontrolle wichtigsten Minuten kurz vor dem Abstich der betreffenden Schmelze eine sehr genaue Prognose des noch erwarteten Energiebedarfs errechnet werden kann. Die Untersuchung der identifizierten Energiemodelle mit Hilfe von statistischen Methoden ergibt hohe Bestimmtheitsmaße sowie eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, was die Eignung der Modelle zur Prognose bestätigt.

Die für den anzustrebenden Langzeiteinsatz im Stahlwerk erforderliche Adaption der Modellparameter an sich ändernde Prozessbedingungen ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Bei der erstmaligen Modellidentifikation erfolgt die Bestimmung der notwendigen Parameterwerte anhand der nachträglichen Auswertung von Messdaten. Diese Methode kann jedoch zur Berechnung von jeweils aktuellen Parametern für die aktuelle Schmelze während der Laufzeit nur mit erheblichem Rechenaufwand angewandt werden. Daher werden verschiedene Methoden zur Parameteradaption diskutiert und es wird eine gegenüber der ausführlichen Regressionsanalyse stark vereinfachte Rechenvorschrift gefunden, die jedoch ähnlich gute Ergebnisse erzielt. Auf diese Weise ist die fortwährende Anpassung des Prognosealgorithmus an den Prozess gegeben, was anhand von Langzeitmessungen bestätigt wird.

Die für die verbesserte elektrische Lastkontrolle erforderliche Abschätzung der für die aktuell prozessierte Schmelze noch verbleibenden Stromflusszeit kann nun anhand der Kombination der Energiemodelle mit dem zuvor identifizierten Leistungsaufnahmemodell vorgenommen werden. Entsprechende Messungen belegen, dass die mit dieser Methodik erreichbare Prognosegenauigkeit ausreicht, um für die überwiegende Anzahl der 15 min-Leistungsbezugsperioden eine korrekte Abschätzung darüber zu treffen, ob das Beenden der im Ofen befindlichen Schmelze in die aktuelle Viertelstunde fällt oder nicht. Dennoch werden aufgrund von unvorhersehbaren Ereignissen in wenigen Einzelfällen stark vom Durchschnitt abweichende Prozessverläufe beobachtet, bei denen eine hinreichend genaue Prognose nicht möglich ist.

Anhand einer statistischen Auswertung wird ein Sicherheitsbeiwert für die prognostizierte verbleibende Stromflusszeit bemessen. Durch weitere Messungen wird bestätigt, dass die Berücksichtigung dieses Sicherheitswertes den Anteil der Fälle, in denen der Zeitpunkt des Abstichs richtig oder geringfügig zu spät prognostiziert wird, deutlich vergrößert und damit die möglichen negativen Auswirkungen einer wesentlich zu kurzen Prognosezeit auf die zu entwickelnde neue Lastkontrollstrategie auf ein Minimum zu reduziert.

Mit der Möglichkeit, das bevorstehende Abschalten des Elektrolichtbogenofens in der aktuellen Messperiode vorauszusagen, ist ein wesentlicher Aspekt für eine verbesserte elektrische

Lastkontrolle gegeben. Bevor jedoch ein dementsprechender neuer Lastkontrollalgorithmus formuliert wird, erfolgt eine Betrachtung der grundsätzlichen Zielsetzungen elektrischer Lastkontrolle. Diese bestehen hauptsächlich darin, einerseits das vertraglich vereinbarte Leistungslimit in keiner der Viertelstunden zu überschreiten. Andererseits ist gleichzeitig die durch dieses Limit repräsentierte pro Messperiode verfügbare Energie möglichst vollständig zu beziehen, da sich somit eine Optimierung der elektrischen Energiekosten ergibt. Herkömmliche Lastkontrollanlagen sind zwar auf die Erreichung dieser Ziele hin optimiert, können jedoch prozesstechnische Besonderheiten der einzelnen elektrischen Verbraucher nur bedingt in die Schaltstrategie mit einbeziehen. Grundsätzlich werden hier bei Annäherung des momentanen Energiebezugs an den maximal zulässigen bestimmte Verbraucher ab- oder in der Leistungsaufnahme heruntergeschaltet, wobei diese Schalthandlungen tendenziell spät im Verlauf der Bezugsperiode durchgeführt werden, wenn der Großteil der Energie bereits verbraucht ist. Demnach können sich unter Umständen drastische Eingriffe in den Lastverlauf eines bestimmten Verbrauchers ergeben.

Im Elektrostahlwerk besteht die größte elektrische Last im Elektrolichtbogenofen, so dass das Wirken der Lastkontrolle beinahe ausschließlich in der Beeinflussung der Leistungsaufnahme dieses Ofens besteht. Für eine verbesserte Lastkontrolle ist es daher von großer Bedeutung die prozesstechnischen Besonderheiten dieses Aggregats neben den allgemeinen energiekostenoptimierenden Zielen in der Schaltstrategie zu berücksichtigen. Die dieser Arbeit vorangegangenen Erfahrungen mit einer herkömmlichen Lastkontrollanlage im hier betrachteten Stahlwerk zeigen insbesondere, dass oftmals kurz vor dem Beenden einer Schmelze in die Leistungsaufnahme des Ofens eingegriffen wird. Dies ist jedoch in vielen Fällen nicht notwendig, da der Leistungsbezug in der betreffenden Messperiode aufgrund des auf das Beenden der Schmelze folgenden Ofenstillstands ohnehin weit unterhalb des Leistungslimits bleibt. Vermieden werden können diese unnötigen Eingriffe indes nur, wenn der voraussichtliche Zeitpunkt, zu dem der Ofen abgeschaltet wird, im Vorhinein bekannt ist. Dies wird mit den hier vorgestellten Prognosemodellen ermöglicht.

Weitere Analysen der Energieeinbringung in die Schmelze im Lichtbogenofen und insbesondere die Betrachtung der im Schmelzverlauf veränderlichen energetischen Verluste erlauben die Festlegung einer weiteren, mit der neuen Schaltstrategie zu verfolgenden Zielsetzung. Da die Verluste kurz vor Fertigstellung der Schmelze überproportional hoch sind, erscheinen lastkontrollbedingte Leistungsreduktionen oder gar Abschaltungen des Ofens in dieser Phase als äußerst ungünstig. Es wird daher für die verbesserte Lastkontrolle eine frühzeitig, dafür aber nur geringfügig eingreifende Strategie verfolgt. Der aus dieser Vorgehensweise möglicherweise erwachsende Nachteil, dass ein vollständiger Bezug der zur Verfügung stehenden Leistung aufgrund frühzeitiger Lastkontrolleingriffe in der betreffenden Messperiode nicht mehr gelingt, wird gegenüber den energetischen Ersparnissen als vertretbar eingestuft.

Zur Formulierung des neuen Lastkontrollalgorithmus, der als Erweiterung der bestehenden Lastkontrollanlage zu implementieren ist, können drei Eingriffsmöglichkeiten identifiziert werden. Zunächst ist ein unnötiges Eingreifen der herkömmlichen Lastkontrollanlage kurz vor dem Beenden des Schmelzprozesses zu verhindern. Dies kann auf Basis der mit den hier entwickelten Prognosemodellen vorausgesagten verbleibenden Stromflusszeit geschehen. Weiterhin sind lastkontrolltechnische Schalthandlungen möglichst frühzeitig durch leichte Reduktion der Leistungsaufnahme des Elektrolichtbogenofens durchzuführen, sobald an-

hand der auf den Leistungsaufnahmemodellen basierenden Energiebedarfsprognosen ein drohendes Überschreiten des Leistungslimits abzusehen ist. Drittens kann ggf. bei ausgeschaltetem Pfannenofen versucht werden, dessen erneutes Zuschalten in die nächste Messperiode zu verschieben, wenn damit ein Lastkontrolleingriff am Lichtbogenofen vermieden werden kann.

Ein entsprechender Algorithmus wird in Form eines prädiktiven Lastkontrollmoduls als Zusatzprogramm zur bestehenden Lastkontrollanlage im Stahlwerk installiert und zunächst über einen Zeitraum von sechs Tagen im aktiven Betrieb getestet. Die Betriebsergebnisse zeigen, dass die so verbesserte Lastkontrollstrategie das Leistungslimit einhält. Weiterhin wird eine insgesamt geringe Häufigkeit von Schalthandlungen beobachtet, was vor dem Hintergrund einer möglichst unmerklichen Lastkontrolle positiv zu bewerten ist. Allerdings treten in Einzelfällen Messperioden mit übermäßig vielen Schalthandlungen auf, für die jedoch in der dazugehörigen Auswertung ein plausibler Grund und auch eine Methode zur Vermeidung derartiger Vorkommnisse in der Zukunft gefunden wird. Weiterhin ist anhand der Betriebsergebnisse nachweisbar, dass unnötige Eingriffe vor Fertigstellung der Schmelze wirkungsvoll verhindert werden können, so dass hier eine deutliche Verbesserung gegenüber der vorherigen Lastkontrollanlage zu verzeichnen ist. Die erreichten Viertelstunden-Durchschnittsleistungen in Messperioden hohen Leistungsbezugs liegen bis auf wenige Ausnahmen nahe am Leistungslimit. Daher ist hier erneut festzustellen, dass der aufgrund der frühzeitigen Lastkontrolleingriffe mögliche Nachteil eines nicht vollständigen Leistungsbezugs vernachlässigbar ist.

Über diese durchaus positiven Betriebsergebnisse hinaus sind weitere Verbesserungen an der neuen Lastkontrollstrategie denkbar. Zunächst erscheint eine erneute Analyse des Lastganges des Pfannenofens notwendig, da aufgrund der in diesem ersten Ansatz gewählten vom Einschaltzustand abhängigen Prognoseberechnung in einigen Einzelfällen eine Häufung von Eingriffen am Elektrolichtbogenofen zu verzeichnen ist. Bei zeitlich dicht aufeinander folgenden Zu- und Abschaltungen des Pfannenofens wird die Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens unter ungünstigen Bedingungen aufgrund der hier implementierten Schaltstrategie gegengleich herunter- und wieder heraufgeschaltet. Abhilfe könnte hier in der Abschätzung einer mittleren Leistungsaufnahme für den Pfannenofen bestehen, in welcher dessen Nebenzeiten ohne Stromfluss durch entsprechende Verringerung des Mittelwertes zu berücksichtigen wären.

Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Prognose der verbleibenden Stromflusszeit des Elektrolichtbogenofens ist eine entsprechende Rückmeldung an das Ofenbedienpersonal vorstellbar. Auf diese Weise könnte versucht werden, innerhalb der prozesstechnisch möglichen Toleranzen die Schmelze genau zum prognostizierten Zeitpunkt zu beenden. Daraus ergäbe sich der Vorteil, dass die prognostizierte restliche Stromflusszeit weniger häufig überschritten würde. Insbesondere da die Konsequenz einer solchen Überschreitung schlimmstenfalls in drastischen Lastkontrolleingriffen der implementierten Notabschaltung besteht, erscheint diese Idee vielversprechend für eine noch bessere Lastkontrolle am Elektrolichtbogenofen.

7 Literaturverzeichnis

[Abel 07] Abel, M.; Hein, M.: Ultimate and RCB Process Performance Technology – Superior Solutions for Increasing EAF Productivity; in: METEC 3rd International Steel Conference on New Developments in Metallurgical Process Technologies (Düsseldorf 2007). Düsseldorf: Steel Institute VDEh 2007, S. 530–537.

[Adams 01] Adams, W. et al.: Factors Influencing the Total Energy Consumption in Arc Furnaces; in: 59th Electric Furnace Conference (Phoenix, Arizona 2001). Phoenix, Arizona: Iron and Steel Society 2001, S. 691–702.

[Adams 02] Adams, W. et al.: Total Energy Consumption in Arc Furnaces. MPT International 25 (2002), Nr. 6, S. 44–50.

[Ahlers 88] Ahlers, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen von frei brennenden Gleichstromlichtbögen bis 12 MW an Elektrostahlöfen. Hamburg, Universität der Bundeswehr, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1988.

[Ameling 86a] Ameling, D. et al.: Metallurgie und Verfahrenstechnik in der Elektrostahlerzeugung – Entwicklung und heutige Bedeutung. Stahl und Eisen 106 (1986), Nr. 1, S. 35–43.

[Ameling 86b] Ameling, D. et al.: Untersuchungen zur Schaumschlackenbildung im Elektrolichtbogenofen. Stahl und Eisen 106 (1986), Nr. 11, S. 45–50.

[Argenta 05] Argenta, P.; Bianchi-Ferri, M.: Electric Arc Furnace Technology Breaks Record. Stahl und Eisen 125 (2005), Nr. 2, S. 27–33.

[Arlt 06] Arlt, D.: Static Power Converters for DC Arc Furnaces and their Network Disturbances; in: International Symposium on Electrical Engineering of Arc Furnaces (Braunschweig 2006). Düsseldorf: Stahl-Akademie 2006.

[Bandusch 05] Bandusch, L.: The EAF Route for Production of High Quality Steel Grades Based on DRI; in: 8th European Electric Steelmaking Conference (Birmingham 2005). London: IOM Communications Ltd 2005, S. 49–54.

[Bär 83] Bär, H.-P.; De Vries, H.: Die Begrenzung von Lastspitzen mit einem neuartigen Lastregler. Elektrizitätswirtschaft 82 (1983), Nr. 23, S. 865–867.

[Berg 08] N.N.: Produkthandbuch BZEM/BHS. Firmenschrift, Version 1.99. Martinsried: Berg Energiekontrollsysteme GmbH 2008.

[Bergmann 92] Bergmann, K.: Danieli High-Impedance Electric Arc Furnace. Iron and Steel Engineer 69 (1992), Nr.7, S. 37–42.

[Block 95] Block, O.: Spektroskopische Untersuchungen von frei brennenden Gleichstromlichtbögen mit hoher Leistung an einem Elektrostahlofen. Hamburg, Universität der Bundeswehr, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1995.

[Bowman 95] Bowman, B.: Performance Comparison Update – A-C vs. D-C Furnaces. Iron and Steel Engineer 72 (1995), Nr.6, S. 26–29.

[Box 70a] Box, G.E.P.; Jenkins, G.M.: Time Series Analysis – Forecasting and Control. San Francisco, Kalifornien: Holden-Day 1970.

[Box 70b] Box, G.E.P.; Pierce, D.A.: Distribution of the Autocorrelations in Autoregressive Moving Average Time Series Models. Journal of the American Statistical Association 65 (1970), Nr. 332, S. 1509–1526.

[Box 94] Box, G.E.P.; Jenkins, G.M.; Reinsel, G.: Time Series Analysis – Forecasting and Control. 3rd Edition. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall 1994.

[Brown 63] Brown, R.G.: Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall 1963.

[Dittmer 89] Dittmer, M.: Lastmanagement bei zeitvariabler Elektrizitätspreisbildung in Industriebetrieben. Berlin – Heidelberg – New York: Springer Verlag 1989.

[Fahrmeir 07] Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen. Berlin – Heidelberg – New York: Springer Verlag 2007.

[Fett 93] Fett, F.N.; Reh, M.; Strohschein, H: Energiemanagement und Energiebedarfsprognose eines Hüttenwerkes. Stahl und Eisen 113 (1993), Nr. 5, S. 109–119.

[Fleissig 98] Fleissig, P.; Fett, F.N.: Optimierung des Lastmanagements in einem Hüttenwerk mit Hilfe eines Energiemodells. Stahl und Eisen 118 (1998), Nr. 2, S. 73–79.

[Friedrich 02] Friedrich, C. et al.: The World's First 800 mm Diameter Graphite Electrode for a DC Electric Arc Furnace. MPT International 25 (2002), Nr. 2, S. 42–49.

[Friedrich 04] Friedrich, C.: Grafitelektroden für Lichtbogenöfen; in: Seminar Elektrotechnik des Lichtbogenofens (Bad Rothenfelde 2004). Düsseldorf: Stahl-Akademie 2004.

[Gamma 94] Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R.E.; Vlissides, J.M.: Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley 1994.

[Gossen 03] N.N.: Kosten Senken durch Optimierung des Energiebezugs – Das Handbuch für den Einsatz von Maximumoptimierungssystemen U1500. Firmenschrift, Version 1.0 vom 17.02.2003. Nürnberg: Gossen-Metrawatt GmbH 2003.

[Grigat 86] Grigat, R.-R.: Messung und Modellbildung elektrischer Lichtbogengrößen in Drehstrom-Lichtbogenöfen. Hamburg, Universität der Bundeswehr, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1986.

[Homeyer 01] Homeyer, K.-O.: Automatisierung der Kohlezugabe zur Schaumschlackenbildung im Lichtbogenofen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 862. Düsseldorf: VDI Verlag 2001.

[Jellinghaus 94] Jellinghaus, M.: Stahlerzeugung im Lichtbogenofen. 3., vollst. neue Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1994.

[Jennert 99] Jennert, O.; Schlücking, U.; Dubbel, A.: Bezugssteuerung elektrischer Energie mit einem neuartigen Prognoseverfahren in einem Hüttenwerk. Stahl und Eisen 119 (1999), Nr. 2, S. 75–81.

[Jordan 76] Jordan, G.R.; Sheridan, A.T.; Montgomery, R.W.; Danby, M.: Basic Properties of High-Intensity Electric Arcs Used in Steelmaking; in: ECSC Convention No. 6210.93/8/801. ECSC 1976.

[Jorge 93] Jorge, H.; Martins, A.; Gomes, A.: Maximum Demand Control: A Survey and Comparative Evaluation of Different Methods. IEEE Transactions on Power Systems 8 (1993), Nr. 3, S. 1013–1019.

[Kirschen 07a] Kirschen, M.: Energieeffizienz und Emissionen der Lichtbogenöfen in der Stahlindustrie. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 2007.

[Kirschen 07b] Kirschen, M.; Kronthaler, A.; Molinari, T.; Rahm, C.: Energiebilanzen von Elektrolichtbogenöfen mit Kühlelementen in der feuerfesten Zustellung. Stahl und Eisen 127 (2007), Nr. 6/7, S. 96–100.

[Köhle 94] Köhle, S.: Gegenüberstellung von Gleichstrom- und Drehstrom-Lichtbogenöfen. Stahl und Eisen 114 (1994), Nr. 5, S. 37–41.

[Köhle 02] Köhle, S.: Recent Improvements in Modelling Energy Consumption of Electric Arc Furnaces; in: 7th European Electric Steelmaking Conference (Venedig 2002). Venedig: Associatione Italiana di Metallurgia 2002, S. 1.305–1.314.

[Konstantin 08] Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft – Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 2., bearb., aktual. Aufl. Berlin – Heidelberg: Springer Verlag 2008.

[Kriz 1929] Kriz, S.: Abmessungen, Betriebsverhältnisse und Leistungen deutscher Elektrostahlöfen. Stahl und Eisen 49 (1929), Nr. 13, S. 417–426.

[Krüger 98] Krüger, K.: Modellbildung und Regelung der elektrothermischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6 Nr. 382. Düsseldorf: VDI Verlag 1998.

[Krüger 01] Krüger, E.; Berger, R.; Büchholz, M.; Elliger, R.: Energiekosten vorausschauend unter Kontrolle halten. Stahl und Eisen 121 (2001), Nr. 10, S. 49–53.

[Kühn 03] Kühn, R.: Untersuchungen zum Energieumsatz in einem Gleichstromlichtbogenofen zur Stahlerzeugung. Aachen: Shaker Verlag 2003.

[Ljung 78] Ljung, G.M.; Box, G.E.P.: On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models. Biometrika 65 (1978), Nr. 2, S. 297–303.

[Lüngen 06] Lüngen, H.-B.; Knop, K.; Steffen, R.: State of the Art of the Direct Reduction and Smelting Reduction Processes. Stahl und Eisen 126 (2006), Nr. 7, S. 25–40.

[Mombauer 05] Mombauer, W.: Flicker in Stromversorgungsnetzen – Messung, Berechnung, Kompensation. VDE-Schriftenreihe Normen verständlich Nr. 110. Berlin – Offenbach: VDE Verlag 2005.

[Nanjo 73] Nanjo, T.; Yasukawa, S.: The Improvement of Productivity in Steelmaking Electric Arc Furnace, Part I–III. Kogyo Karetsu (Industrial Heating) 10 (1973), Nr. 2, S. 39–51, Nr. 3, S. 27–41, Nr. 4, S. 51–63.

[Neumann 1904] Neumann, B.: Die elektrothermische Erzeugung von Eisen und Eisenlegierungen. Stahl und Eisen 24 (1904), Nr. 13, S. 761–769.

[Nyssen 99] Nyssen, P. et al.: A New Metallurgical Model for the Control of EAF Operations; in: 6th European Electric Steelmaking Conference (Düsseldorf 1999). Düsseldorf: Steel Institute VDEh 1999, S. 43–50.

[Pfeiler 93] Pfeiler, T.: Untersuchung zur Leistungsumsetzung im Drehstrom-Lichtbogenofen. Hamburg, Universität der Bundeswehr, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1993.

[Rehm 99] Rehm, M.: Lastmanagement und dynamische Stromtarife in regenerativen Energieversorgungssystemen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6 Nr. 419. Düsseldorf: VDI Verlag 1999.

[Riecke 1926] Riecke, E.: Arbeitsweise von Lichtbogen-Elektroöfen. Berichte der Fachausschüsse des Vereins deutscher Eisenhüttenleute, Stahlwerksausschuss Bericht Nr. 102 (1926), Unterausschuss für Elektrostahlöfen.

[Rinne 02] Rinne, H.; Specht, K.: Zeitreihen – Statistische Modellierung, Schätzung und Prognose. München: Verlag Franz Vahlen 2002.

[Sandberg 05] Sandberg, E.: Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process Data. Luela, University of Technology, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Diss., 2005.

[Schlittgen 99] Schlittgen, R.; Streitberg, B.H.J.: Zeitreihenanalyse. 8., überarb. Aufl. München – Wien: R. Oldenbourg Verlag 1999.

[Siemens 1880] Siemens, W.: Ueber die Anwendung des dynamoelektrischen Stromes zur Schmelzung schwerflüssiger Stoffe in beträchtlichen Mengen. Elektrotechnische Zeitschrift 1 (1880), S. 325–328.

[Simoes 05] Simoes, J.; Kirschen, M.; Pfeifer, H.: Theoretische Untersuchungen zum elektrischen Energiebedarf der Lichtbogenöfen in der Stahlindustrie. Teil 1: Einfluss von Ausbringen, Schlackenbildner, Abstichtemperatur, Chargenzeit und Erdgasbrenner. Elektrowärme International 63 (2005), Nr. 1, S. 38–45.

[Treppschuh 08] Treppschuh, A.: Regelung der elektrischen Leistung eines Gleichstrom-Lichtbogenofens. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 1144. Düsseldorf: VDI Verlag 2008.

[Uyen 02] Uyen, J.: EAF Closed Door Process at Corporacion Aceros Arequipa S.A.; in: 7th European Electric Steelmaking Conference (Venedig 2002). Venedig: Associatione Italiana di Metallurgia 2002, S. 1.47–1.56.

[Walker 1931] Walker, G.: On Periodicity in Series of Related Terms. Proceedings of the Royal Society of London (A) 131 (1931), Nr. 818, S. 518–532.

[Wilson 69] Wilson, G.: Factorization of the Covariance Generating Function of a Pure Moving Average Process. SIAM Journal on Numerical Analysis 6 (1969), Nr. 1, S. 1–7.

[Worldsteel 08] World Steel Association (Hrsg.): World Steel in Figures 2008. 2nd Edition. Brüssel – Peking: World Steel Association 2008.

[Yule 1927] Yule, G.U.: On a Method of Investigating Periodicities in Disturbed Series, with Special Reference to Wolfer's Sunspot Numbers. Philosophical Transactions of the Royal Society of London (A) 226 (1927), Nr. 636–646, S. 267–298.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Vico Haverkamp

Geburtsdatum: 12.10.1979
Geburtsort: Emsdetten

Eltern: Inge Haverkamp, Fotolaborantin
Karl-Heinz Felix Haverkamp, Dipl.-Ing. Elektrotechnik

Bildungsweg

08.1986 – 05.1990 Wilhelmschule Emsdetten

08.1990 – 05.1999 Gymnasium Martinum Emsdetten
Abschluss: Abitur

10.1999 – 03.2001 Fachhochschule Münster
Grundstudium Elektrotechnik im European Engineering Programme (EEP)

10.2001 – 02.2003 University of Portsmouth, Großbritannien
Hauptstudium Electrical Engineering im EEP

03.2003 – 09.2003 Fachhochschule Münster
Diplomarbeit, Abschluss: Diplom-Ingenieur (FH)

10.2003 – 02.2004 University of Portsmouth, Großbritannien
Master-Semester, Abschluss: Master of Engineering

seit 05.2004 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent

Praktische Tätigkeiten

06.1999 – 09.1999 EMSA Werke Emsdetten
Vorpraktikum im Bereich Instandhaltung elektrischer Anlagen

04.2001 – 09.2001 Infineon Technologies NA Corp., San Jose, Kalifornien, USA
Praxissemester im Bereich ASIC-Entwicklung

07.2002 – 09.2002 Siemens VDO Automotive AG, Regensburg
Freiwilliges Zusatz-Praktikum im Bereich Fahrzeugelektronik-Entwicklung

03.2003 – 09.2003 STILL GmbH Hamburg
Diplomarbeit im Bereich Fahrzeug-Steuergeräte-Entwicklung

Auszeichnungen und Patente

IEE Southern Centre Progress Prize 2002 für sehr gute Studienleistungen, Großbritannien

VDE-Preis des Bezirksvereins Rhein-Ruhr für hervorragendes Diplom-Examen 2003

Erfindernennung im Europäischen Patent Nr. EP 1 666 301 B1 der STILL GmbH Hamburg, "Flurförderzeug mit Vorrichtung zur Regelung von Schlupf", erteilt am 01.10.2008

Veröffentlichungen des Verfassers

Haverkamp, V.; Krüger, K.; Bandusch, L.: Innovative Strategies in Controlling the Power Demand of AC Electric Arc Furnaces; in: 8th European Electric Steelmaking Conference (Birmingham 2005). London: IOM Communications Ltd 2005, S. 233–241.

Haverkamp, V.; Krüger, K.; Braun, U.: Predictive Dynamic Power Demand Control in an EAF Steel Plant; in: 9th European Electric Steelmaking Conference (Krakau 2008). Krakau: SITPH Polish Association of Metallurgical Engineers and Technicians 2008.

Haverkamp, V.; Krüger, K.; Braun, U.: Prädiktive dynamische Lastkontrolle für ein Elektrostahlwerk. Stahl und Eisen 128 (2008), Nr. 10, S. 61–68.

Haverkamp, V.; Krüger, K.: Prädiktive dynamische Lastkontrolle für ein Elektrostahlwerk; in: III. Symposium Arbeitskreis Metallindustrie und Mathematik – Prozessmodelle und Prozessauswertungen (Bad Honnef 2008).