



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Entwicklung eines Regelungskonzepts für Aluminium-Elektrolysezellen unter Berücksichtigung einer variablen Stromstärke und eines regelbaren Wärmeverlusts

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
in der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von:

Roman Düssel

Wuppertal 2016

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20170202-104541-8

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20170202-104541-8>]

Zitat

Aluminium, ein wertvolles Metall, das in jedem Ton, ja in jeder Erdkrume und jedem Gestein unseres Bodens enthalten ist, dessen Gewinnung und Bearbeitung aber noch der Technik und Wissenschaft ebenso schwierige wie lohnende Aufgaben stellt.

Max Planck

Auszug

In den Jahren der Energiewende trifft die „Virtuelle Batterie“ mit ihrer Möglichkeit des Lastmanagements den Kern der Zeit. Eine Verschiebung des Produktionslastpunktes um $\pm 25\%$ aller deutschen Aluminiumhütten für 48h ergibt eine Speicherkapazität von etwa 13GWh und erhöht damit die aktuell installierte Pumpspeicherkapazität Deutschlands um etwa 33%. Damit trägt die Virtuelle Batterie nicht nur zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende bei, sondern ist als Vorreiter in der energieintensiven Industrie maßgeblich an ihr beteiligt.

In der vorliegenden Dissertation werden die Grundlagen der Aluminiumherstellung sowie gängige Theorien zu Prozessregelsystemen der Aluminiumschmelzflusselektrolyse beschrieben. Anhand einer umfangreichen Beispielrechnung wird der Einfluss des Lastmanagements auf den Elektrolyseofen dargestellt.

Notwendig für die Flexibilisierung sind ein magnetisch kompensierter Ofen zur Erstellung einer ebenen Aluminiumoberfläche, damit Stromstärkeänderungen keinen Kurzschluss der Aluminiumoberfläche mit den Anoden erzeugen. Darüber hinaus ist eine zusätzliche Kühlung zwingend erforderlich um die Enthalpie des Ofens nicht so stark anzuheben, dass keine schützende Randkruste mehr vorhanden ist. Beide Maßnahmen wurden im Rahmen dieser Dissertation an zwölf Versuchsöfen installiert und verifiziert.

Die über einen Zeitraum von fünf Jahren (2011-2016) durchgeführten Versuche zur Flexibilisierung des Energieeintrages eines Elektrolyseofens werden erklärt und die Ergebnisse diskutiert. Mithilfe einer umfangreichen Messwertaufnahme wurde ein Echtzeit-Wärmebilanz-Modell (Energycounter) entwickelt, welches

Aufschluss über das Temperaturverhalten der Elektrolyseöfen unter Flexibilisierungsbedingungen gibt. Schlussendlich wird eine geeignete Echtzeit-Wärmebilanz-Regelung vorgestellt und im virtuellen Modell (Matlab/Simulink) und an der realen Testofengruppe verifiziert.

Der Lösungsansatz ist in drei Themenbereiche gegliedert. Im ersten Schritt den Energieeintrag so weit wie möglich zu reduzieren und im Folgeschritt den Wärmeverlust mittels der Wärmetauscher zu kompensieren. Die Umsetzung erfolgt überlagert und ist für jeden Ofentyp einzeln zu bestimmen. Jeder Ofen unterliegt thermischen und prozesstechnischen Grenzen, welche für den EPT14 Ofen des Standorts Essen bestimmt wurden. Sind minimaler Ofenwiderstand sowie die min/max Grenzen des Wärmeverlustes bekannt, können im ersten Schritt der Regelung des Wärmehaushalts nach dem Ohmschen Gesetz der Widerstand antiproportional zur Stromstärke bis zu seinem Minimum angepasst werden. Mit Erreichen des Minimums wird der Wärmeverlust über die Wärmetauscher proportional zu weiteren Stromstärkeerhöhungen vergrößert. Schlussendlich müssen Regelungen eines bestehenden Prozesssystems so angepasst werden, dass sie der Flexibilisierung nicht entgegenwirken, sondern sie begünstigen.

Ein veränderter Wärmeverlust stellt sich jedoch nicht, wie die Anpassung des Energieeintrags über den ACD, unmittelbar ein. Die Wärmeverluständerung unterliegt einer Reaktionszeit, welche beschrieben und nachgewiesen wurde. Durch ein gezielt überkompensierendes PT_1 -Glied wird der nachteiligen Wärmeverluständerung entgegengewirkt, sodass sich ein neues thermisches Gleichgewicht schneller einstellt. Die Grenzen des Systems sind bei der negativen Modulation wirtschaftlicher Art, während bei der positiven Modulation der einzustellende Wärmeverlust über die Wärmetauscher nicht beliebig erhöht werden kann.

Die vorliegende Dissertation befasst sich hauptsächlich mit der Aufnahme von Wärmebilanzen, Temperaturen und Spannungen. Im Zeitalter von BigData wäre es möglich, Eingangskontrollen zu Mengen von Aluminiumoxid und Aluminiumfluorid genauer aufzunehmen, um auch das chemische Gleichgewicht zu bilanzieren. Des Weiteren könnte mithilfe einer (Massen-) datengestützten Erfas-

sung, Überwachung und Steuerung möglichst aller relevanten Prozessparameter, der Betrieb einer Aluminiumelektrolyse unter Flexibilisierungsbedingungen bezüglich Verschleiß und Energieverbrauch verbessert werden. Diese Daten werden seit Jahren erfasst, jedoch zum Teil nicht ausgewertet und gespeichert noch zur Regelung oder einfachen Steuerung angewendet. Zur Verringerung der Komplexität wurden bislang die Einflussnahme der in Wechselwirkung stehenden Prozesse nicht berücksichtigt, welche ebenfalls in einer neuartigen Prozessregelung aufgenommen werden sollten. Schlussendlich können in einer neuartigen Prozessregelung der Energycounter, die Echtzeit-Energiebilanz-Regelung sowie die Ofenregelung in einem Mehrgrößensystem miteinander verbunden werden. So kann das Verhalten des Ofens mithilfe des virtuellen Systems schon vorausbestimmt werden und darauf frühzeitig reagiert werden. Dieses sehr umfangreiche Vorhaben muss dann alle drei Ebenen, von der Messwertaufnahme (Hardware), über die Regelung (Hard+Software), bis zur Visualisierung (Software) beinhalten. Der Grundstein zu diesem Projekt ist hiermit gelegt und die TRIMET ist bereit, diesen Paradigmenwechsel der Aluminiumherstellung zu gehen.

Stichworte: Aluminium, Wärmetauscher, Virtuelle Batterie, Lastmanagement, Erneuerbare Energie, Echtzeit-Wärmebilanz-Regelung, Energy-Counter

Abstract

The „Virtual Battery“ hits the core of this decade of energy transition in Germany due to new possibilities it provides for load management. A shift in production rate by 25% at all German aluminium smelters for 48hrs can result in a storage capacity of about 13GWh, increasing the currently installed pump storage capacity in Germany by around 33%. The Virtual Battery will be instrumental in both the energy transition strategy, as well as pioneering technology in energy-intensive industrial sectors.

The fundamentals of aluminium production as well as current theories for process control systems of aluminium electrolysis are described in this thesis. The influence of load management on an electrolysis cell is examined by extensive sample calculations.

The use of magnetic compensation on the electrolysis cell is necessary for flexible production to create a flat aluminium metal surface, and prevent short circuiting between the metal and the anode during changes in current. External cooling systems are also required to control the heat balance of the cell and prevent melting of the protective side ledge crust when current is increased rapidly. Both measures have been installed and verified in this thesis, with their characteristics researched and described.

Experiments were conducted over a period of five years (2011-2016) to improve the flexibility of energy consumption of the electrolytic cell, and the results explained and discussed. A real-time heat balance model (energy counter) was developed using extensive experimental data logging, providing information about

the temperature response of an electrolytic cell under flexible operating conditions. Finally a suitable control system for real-time heat balance control is presented, and the virtual model created in Matlab/Simulink is verified on the real furnace test group.

The approach is divided into three areas. The first step is to reduce the energy input as far as possible and to compensate in a subsequent step the heat loss by the heat exchanger. The reaction is superimposed and must be determined individually for each type of furnace. Each furnace is subject to thermal and process engineering limits, which were intended for the furnace at TRIMET Essen. If the minimum furnace resistance and the min/max limits of the heat losses are well known, the regulation of the heat balance can be done by changing the resistance. According to Ohm's law the resistance can be adjusted to its minimum inversely proportional to the current. By reaching the resistance minimum the heat loss through the heat exchanger is increased in proportion to further current increases. Finally control systems of an existing process control must be adjusted so that it does not counteract the energy flexibility, but promote it.

The cell heat balance has been maintained in a stable position during the experiments, as changes in energy input due to the line current are also adjusted by changing the cell ACD. The reaction time for changes in heat balance are described and demonstrated, and heat loss changes rapidly counteracted to a thermal equilibrium using a targeted overcompensation. The limits of the virtual battery system are both of an economic nature for negative modulation, and physical for positive modulation, due to limits on the rate that heat loss can be changed via the shell heat exchangers.

This thesis mainly deals with the recording of cell heat balances, temperatures and voltages. The chemical equilibrium of the cells can also be accurately recorded by measurement of input amounts of alumina and aluminium fluoride. Furthermore all relevant process parameters may be recorded, monitored, and controlled for the operation of an aluminium smelter under flexible conditions to improve energy consumption and efficiency. This information is routinely recor-

ded by all smelters for extensive time periods, but has not been exploited fully for the most effective control strategy. These parameters are highly interrelated, and their multivariate interactions have not been analysed to reduce the complexity of the system, which should be included in a new process control scheme. Finally, the Energy Counter, real-time energy balance control and heat regulation system can also be linked to the process parameters in a multivariate process control system. This will allow the behaviour of the cell to be pre-determined during flexible operation, and compensated in advance. This extensive range of projects spans three levels, including the recording of measured values (hardware), arrangement and calculation of data (hardware and software) and data analysis and visualisation (software). The basis for the future direction of this project has been set by TRIMET, allowed for a paradigm shift in the production of aluminium metal.

Keywords: aluminum, heat exchanger, virtual battery, energy demand management, renewable energy, realtime heat balance control, energy counter

Inhaltsverzeichnis

Auszug	vi
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xiv
Nomenklatur	xv
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	2
1.1.1 Energiewende in Deutschland	2
1.1.2 Problematik der Strommodulation	4
1.1.3 Die Virtuelle Batterie	5
1.1.4 Projektpartner	7
1.2 Motivation	10
1.2.1 Ziel	11
2 Stand der Technik	14
2.1 Aluminiumelektrolyse	14
2.1.1 Grundlagen	15
2.1.2 Rohstoffe	23
2.2 Prozesskontrolle	28
2.2.1 Regelungstechnische Grundlagen	28
2.2.2 Regelungsgrundsatz	40

2.2.3	Regelungskonzepte	46
3	Der Elektrolyseofen	50
3.1	Massenbilanz	50
3.1.1	Elektrolytbilanz	51
3.1.2	AlF ₃ Bilanz	52
3.2	Wärmebilanz	54
3.3	Energiemanagement	58
3.3.1	Spannungsaufteilung / Widerstände	58
3.3.2	Unruheerkennung	63
3.3.3	Verringerung des ACD	63
3.3.4	Prozessfenster des Elektrolyseofens	64
4	Lastmanagement	66
4.1	Geschichtlicher Hintergrund	67
4.2	Modulationskonzept	68
4.2.1	Stromhandel der TRIMET	70
4.3	Lastmanagement einer Elektrolysezelle	71
4.3.1	Beispiel Wärmehaushaltsänderung	77
4.3.2	Beispiel verändern der Wärmeverluste	79
4.3.3	Beispiel Phasenänderung Elektrolyt	80
4.3.4	Beispiel Chemische Zusammensetzung	81
4.3.5	Fazit	81
5	Experimentelle Untersuchungen	83
5.1	Machbarkeit und Pilotprojekt	83
5.1.1	Ausgleichen der Rohrleitungsströme	85
5.1.2	IBA PDA Software	88
5.2	Positive Modulationsversuche	90
5.2.1	Kurzzeitige positive Modulation	93
5.2.2	Flusstemperatur und Superheat	94
5.2.3	Randkruste und Elektrolytvolumen	99
5.2.4	Seitenwandtemperaturen und Ventilatorsteuerung	101

5.2.5	Einfluss auf Energieverbrauch und Stromausbeute	103
5.2.6	Wärmeeintrag und SHE-Wärmeverlust	105
5.2.7	Fazit der positiven Modulation	106
5.3	Negative Modulationsversuche	106
5.3.1	Wärmehaushalt der Öfen ohne Wärmetauscher	107
5.3.2	Fazit der negativen Modulation	111
5.4	Versuche mit Spannungsreduzierung	112
5.5	Magnetfeldkompensation	114
5.5.1	Metallwölbung	114
5.5.2	Fazit Magnetfeldkompensation	119
5.6	Elektrolyt-Temperatur, -Menge und -Chemie	119
6	Energycounter	124
6.1	Gleichungsermittlung	124
6.1.1	Wärme-Eintrag	125
6.1.2	Wärme-Verlust	125
6.1.3	Wärme-Umwandlung	127
6.1.4	Wärme-Inhalt (Enthalpie)	128
6.2	Fehleranalyse	128
6.3	Fazit Energycounter	131
7	Echtzeit-Energiebilanz-Regelung	133
7.1	Systemgrößen	133
7.1.1	Regelgrößen	133
7.1.2	Störgrößen	134
7.1.3	Weitere Systemgrößen	137
7.2	Lösungsansatz	138
7.2.1	Kühlung anhand Wärmebilanzdifferenz (PI)	139
7.2.2	Proportionale Spannungsanpassung	141
7.2.3	Unruhe Unterdrückung	142
7.2.4	Anpassen der 9Box	143
7.2.5	Der neue Algorithmus	146

7.3	Untersuchung des Verhaltens des geregelten Systems	149
7.3.1	Aufbau eines virtuellen Systems	149
7.3.2	Test des virtuellen Systems	153
7.3.3	Reale Versuchsdurchführung	157
8	Ergebnis und Zukunft	161
8.1	Fazit	161
8.2	Ausblick	162
	Literaturverzeichnis	165
	Veröffentlichungen und eigene Arbeiten	176
	Betreute Arbeiten	178
	Lebenslauf	180
	Eidesstattliche Erklärung	182
	Anhang	183
.1	Elektrolysezelle EPT14	183
.2	Messgeräte	185
.3	Versuche	186
.4	Messungen	191
.5	Pläne	193
.6	Berechnungstools	196
.7	CellSim	207

Tabellenverzeichnis

2.1	Spannungsverteilung bei 162kA	22
3.1	Elektrolytzusammensetzung der TAE	50
3.2	AlF_3 Massenbilanz	52
3.3	Massenanteil von AlF_3 in festem Elektrolyt	53
3.4	CVD von End to End Öfen	62
4.1	Prozessänderung während der Modulation (von +/-500 h/Jahr) .	69
4.2	Änderungsrate der Liquidustemperatur pro Überschuss an AlF_3 .	82
5.1	Berechnete Zielspannungen für Öfen ohne Wärmetauscher bei neg. Modulation	107
5.2	Thermische Reaktionen eines 170kA Elektrolyseofens [Wel98] .	122
6.1	Wärmeübergangskoeffizienten bei Konvektion [Ome98]	126
6.2	Wärmeverluste bei 162kA Normalbetrieb	126
6.3	Transiente thermische Reaktionen eines Elektrolyseofens	127

Nomenklatur

Abkürzungen

AbLaV	AbLastVerordnung
ACD	Anode Cathode Distance
AE	Anodeneffekt
AT	Angereicherte Tonerde
Booster	25kA Zusatzgleichrichter zur Erhöhung der Hallenstromstärke
CE	Current Efficiency / Stromausbeute
CVD	Cathode Voltage Drop
EC	Energy Consumption / Energieverbrauch
FT	Frische Tonerde
GT	Gasturbine
GuD	Gas- und Dampfturbinen
IBA	IBA AG, Spezialist für Mess- und Automatisierungstechnik
MK	Magnetfeldkompensation
MRF	Messen-Rückgut-Flüssigmetall-Team
MWES	Messwerterfassungssystem
OSP	Operating Setpoint, Spannungsvorgabe für den Ofen
PDA	Process Data Analyser
PSP	Process Set Point, Spannungsvorgabe für den Ofen
PV	Photovoltaik
SH	Superheat, Differenz zwischen Fluss- und Erstarrungstemperatur
SHE	Shell Heat Exchanger
TAE	TRIMET Aluminium Essen

Greek

α	[W m ⁻² K ⁻¹]	Wärmeübergangskoeffizient
η_{AA}	[V]	Reaktionsüberspannung an der Anode
η_{AC}	[V]	Konzentrationsüberspannung an der Anode
η_{CC}	[V]	Konzentrationsüberspannung an der Kathode
κ	[Ω m ² m ⁻¹]	Elektrische Leitfähigkeit
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[kg m ⁻³]	Dichte
σ	[W m ⁻² K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmann-Konstante

Roman

A	[m ²]	Fläche
c_p	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Spezifische Wärmekapazität
CSD_a	[A cm ⁻²]	Kritische Stromdichte der Anode
D	[m]	ACD Länge
d_b	[m]	Stärke der Gasblasenschicht
E_{rev}	[V]	Elektrodenpotenzial (reversible (Gleichgewichts-)Spannung)
f	[s ⁻¹]	Frequenz
F	[C mol ⁻¹]	Faraday-Konstante
ΔH	[J kg ⁻¹]	Spezifische Energie
I	[A]	Stromstärke
i_r	[A cm ⁻²]	Reaktion begrenzte Stromdichte
k	[W m ⁻² K ⁻¹]	Wärmedurchgangskoeffizient
l	[m]	Länge
m	[kg]	Masse
M	[kg]	Atommasse
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
R	[Ω m]	Widerstand
R	[J mol ⁻¹ K ⁻¹]	Universelle Gaskonstante
SD_a	[A cm ⁻²]	Stromdichte der Anode

SD_c	$[Acm^{-2}]$	Stromdichte der Kathode
t	[s]	Zeit
T	[K]	Temperatur
U	[V]	Spannung
\dot{V}	$[m^3s^{-1}]$	Volumenstrom
x_{sAlF_3}	[%]	Überschuss an Aluminiumfluorid im Elektrolyten

Dimensionslose Zahlen

α_x	Aktivität des betreffenden Redoxpartners
CR	Cryolite Ratio
$d(t)$	Störgröße
ΔG^o	Gibbs-Energie
$e(t)$	Regelabweichung
$E(s)$	Regelabweichung
$G_0(s)$	Offener Regelkreis
$G(s)$	Geschlossener Regelkreis
$G_R(s)$	Regler
$G_S(s)$	Strecke
ε	Emissionsgrad
K_D	differenzielle Verstärkung
K_I	integrale Verstärkung
K_P	proportionale Verstärkung
ROS	Relative Aluminiumoxid Sättigung
φ	Mittlere Gasblasen Bedeckung
η	Stromausbeute
τ	Prozentuale Änderung des Wärmeverlustes
t_E	Ausregelzeit
T_N	Nachstellzeit
$u(t)$	Stellgröße
$U_R(s)$	Stellgröße
$w(t)$	Führungsgröße

$y(t)$	Regelgröße
$y_m(t)$	Rückführung
$z(t)$	Messfehler
z_e	Äquivalentzahl (Anzahl der Übertragenen Elektronen)

1 Einleitung

Primäres Aluminium wird mithilfe von Strom in einem Elektrolyseverfahren gewonnen. Dabei geht der größte Teil der hierfür eingesetzten Energie nicht verloren, sondern wird im Aluminium gespeichert. Seit Erfindung dieser Technologie im Jahre 1886 ist jedoch eine absolut gleichbleibende Energiezufuhr der wichtigste Garant für einen stabilen und energieeffizienten Produktionsprozess. Im Rahmen eines Pilotvorhabens möchte die TRIMET in Zusammenarbeit mit der Bergischen Universität Wuppertal diese Randbedingung erstmals überwinden und den Prozess für eine flexible Energiezufuhr öffnen. Dafür werden an der BUW unter der Leitung der Lehrstühle für Automatisierungstechnik, Werkstofftechnik und Strömungsmechanik die notwendigen Grundlagen experimentell erforscht und durch Simulationsarbeit unterstützt. Die Erkenntnisse werden bei der TRIMET in Essen unmittelbar an einer Pilotanlage in die Praxis umgesetzt. Zur erfolgreichen Umsetzung ist die vorliegende Dissertation Grundlage für die notwendigen Änderungen der Prozesssteuerung des Elektrolyseofens. Es wird theoretisch wissenschaftlich sowie praktisch experimentell erforscht, durch welche Maßnahmen und wie weit sich der Prozess von einer gleichbleibenden Energiezufuhr entfernen kann. Die dadurch erzielte Flexibilisierung des Prozesses ermöglicht die Nutzung der Aluminiumelektrolyse als virtuelle Batterie mit einer Speicherkapazität von 2400MWh. Mit Hilfe des somit zur Verfügung gestellten Stromspeichers wird die Integration volatiler, erneuerbarer Energiequellen wie Wind und PV in das deutsche Stromnetz bei gleichzeitiger Erhaltung der Versorgungssicherheit unterstützt.

1.1 Hintergrund

1.1.1 Energiewende in Deutschland

Die Umsetzung der Energiewende wird starke Versorgungs- und damit auch Preisschwankungen für die Energieversorgung in Deutschland zur Folge haben. Für energieintensive Unternehmen wie die TRIMET Aluminium SE ergibt sich hieraus die zunehmende Herausforderung, ihre Produktionsprozesse und damit ihren Strombedarf zu flexibilisieren, um einerseits bei hohem Preisniveau die erfahrungsgemäß hohe Preisvolatilität zu nutzen, um den durchschnittlichen Energiepreis zu senken und so die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. In Deutschland entfallen bereits 40-45% der Herstellungskosten auf den Strompreis. Andererseits wird auf diese Weise ermöglicht, durch gezieltes Demand Side Management einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung der Energieversorgung und damit erfolgreichen Umsetzung der Energiewende leisten zu können.

Die Elektrolysezellen einer Aluminiumhütte wandeln elektrische in chemische Energie um, indem sie ein Ausgangsprodukt (Aluminiumoxid) mit niedrigem Energieinhalt umwandeln in ein Produkt mit hohem Energieinhalt (Aluminium). Sie machen damit nichts anderes als jeder Akkumulator beim Ladevorgang. Dieser Prozess ist im Prinzip umkehrbar, damit wäre eine Aluminiumelektrolyse vergleichbar mit einem riesigen Akkumulator, vergleichbar zu einer Lithium-Ionen-Batterie. Aufgrund der speziellen Prozesstechnologie funktioniert die Umkehrung in der Praxis jedoch nur sehr eingeschränkt, da das Reversionsprodukt (Aluminiumoxid) in nur geringem Umfang in der Zelle speicherbar ist und die Anlage schließlich dazu dient, Aluminium herzustellen, welches regelmäßig entnommen wird, d.h. die Zelle arbeitet in einer Richtung, immer im Ladezustand.

Wird der Ladestrom und damit die Erzeugung des Energiespeicherprodukts Aluminium zeitlich variiert, entspricht die dadurch erzielte symmetrisch um die Nominalleistung steuerbare Energieaufnahme exakt der Funktion einer Batterie.

Die Vision am konkreten Zahlenbeispiel:

Die Essener Elektrolyse fährt mit einer (derzeit konstanten) Nennleistung von 270MW. Ziel ist es, diese Leistung im Bereich von +/-70MW zu flexibilisieren und den gesamten Hub für 48 Stunden nutzen zu können. Hieraus resultieren eine Speicherleistung von 70MW und eine Speicherkapazität von 3.360MWh. Diese Kapazität liegt in der Größenordnung eines mittelgroßen Pumpspeichers. Mit den drei Elektrolysen der TRIMET in Deutschland (Essen, Voerde und Hamburg) kann eine gesamte Speicherleistung von ca. +/-165MW bei einer Kapazität von ca. 7.920MWh realisiert werden. Dies erhöht die Gesamtspeicherkapazität in Deutschland um 20%.

Aktuell sind die Elektrolyseöfen einer Aluminiumhütte, den aus einer derartigen Leistungsänderung resultierenden prozessbedingten Anforderungen jedoch nur in geringem Maß gewachsen. Heutige Aluminiumelektrolysen müssen mit nahezu konstanter Leistung gefahren werden. Größere Schwankungen der Energiezufuhr schaden der Prozesseffizienz und führen zu großen Störungen bis hin zu einer irreparablen Schädigung der Produktionsanlagen. Die Elektrolysezellen müssen also modifiziert werden, um trotz variabler Energiezufuhr ohne Gefährdung der Produktionsanlage und mit weiterhin maximaler Energieeffizienz betrieben werden zu können.

TRIMET hat, unter meiner Führung, die hierfür notwendigen Modifikationen, bestehend aus Hard- und Softwarekomponenten sowie einer neuartigen Prozessführungsstrategie entwickelt und als Pilotanwendung in eine Testreihe von 12 Elektrolysezellen der Essener Produktionsanlage (mit insgesamt 360 Elektrolyseöfen) installiert und ist dabei, sie zu testen und zu einer 'Serienreife' weiterzuentwickeln.

Perspektive ist es, bei nachgewiesener Wirtschaftlichkeit dieser Modifikation die drei Aluminiumelektrolysen der TRIMET in Essen, Voerde und Hamburg auf flexible Produktion umzubauen und damit eine „virtuelle Batterie“ von 8GWh im Netz zur Verfügung stellen zu können.

1.1.2 Problematik der Strommodulation

Die Elektrolyseöfen sind für eine bestimmte Stromstärke und Energiezufuhr konstruiert. Bei Änderung der Stromstärke und Energiezufuhr ändert sich auch die sehr sensible Energiebilanz des Ofens. Wird dabei das Prozessfenster, für das der Ofen entworfen wurde, verlassen, führt dies zu Effizienzverlusten, massiven Prozessstörungen oder sogar zum irreparablen Ausfall der Öfen.

Die pro Zeiteinheit produzierte Menge Aluminium ist bei konstantem Wirkungsgrad proportional zur Stromstärke, mit der die Öfen betrieben werden. Durch die gegebene Geometrie und Materialien in dem Elektrolyseofen ist ein elektrischer Widerstand des Ofens gegeben. Somit ist auch die zugeführte elektrische Leistung und damit auch die im Ofen entstehende Wärme nur durch die Stromstärke beeinflussbar. Um die Leistungsaufnahme zu variieren, muss der Ofen mit verschiedenen Stromstärken betrieben werden können. Ebenso muss der Ofen auf unterschiedlich hohe Wärmeentwicklung einstellbar sein.

Die Flexibilisierung der Aluminiumproduktion führt daher ganz wesentlich über die bisher nicht mögliche gezielte Steuerung des Wärmeverlusts der einzelnen Elektrolysezellen. Hierzu wurden regelbare Wärmetauscher (Shell Heat Exchanger SHE) entwickelt, deren Aufgabe es ist, die Energiebilanz im Ofen bei unterschiedlichen, aus einer Veränderung der zugeführten elektrischen Energie resultierenden Belastungssituationen aufrecht zu erhalten. Demnach muss bei erhöhter Energiezufuhr Wärme abgeführt und bei verringerter Energiezufuhr der Ofen isoliert werden. Zur aktiven Kühlung wird mithilfe von Ventilatoren Umgebungsluft an der Ofenwand vorbeigeführt. Dabei dient der Wärmetauscher zur Führung des Kühlmediums. Bei verringerter Wärmezufuhr in den Ofen wird die Luft im Wärmetauscher gestaut und erzeugt innerhalb des Wärmetauschers eine isolierende Schicht.

Aufgrund der hohen Stromstärke unterliegt das Metall im Elektrolyseofen einer durch das Magnetfeld erzeugten Wölbung. Bei einer Leistungsänderung verändert sich die Stärke des Magnetfeldes und somit die Wölbung des Metalls im

Ofen. Dies hat einen massiven Einfluss auf die Effizienz der Aluminiumproduktion und kann im Extremfall zu einem Ausfall der Produktionsanlage führen. Der Effekt kann verringert werden, wenn das Stromschienensystem eines Ofens so ausgelegt wird, dass es das im Ofen entstehende Magnetfeld kompensiert. Um signifikant unterschiedliche Leistungsaufnahmen gewährleisten zu können, muss das Stromschienensystem entsprechend optimiert werden.

1.1.3 Die Virtuelle Batterie

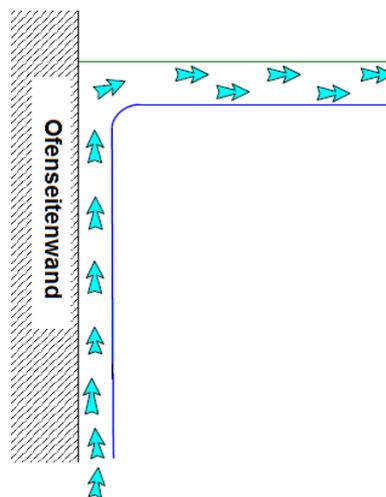


Abbildung 1.1: Wärmetauscher in der Seitenansicht

Wärmetauscher wurden bisher an Elektrolysezellen nur zur Produktivitätssteigerung genutzt. Dabei wurde mithilfe von Wärmetauschern durch Stromstärkerhöhungen zusätzlich eingetragene Energie aus dem Ofen abgeführt. Bereits 1999 wurde mithilfe von Druckluftanlagen zur Kühlung des Ofens bzw. zur Maximierung des Wärmeaustritts die Produktionssteigerung ermöglicht. Patente wurden angemeldet [BFH99], [BFH01] und bereits mehrfach erfolgreich implementiert [FJBV04]. Jedoch wird auch bei diesen Anwendungen mit einem konstanten Arbeitspunkt gefahren. Die Flexibilisierung des Arbeitspunktes durch kontinuierliche Anpassung der Stromstärke an den Markt konnte ohne Flexibilisierung des

Wärmeaustritts jedoch nicht realisiert werden. Erst mit Einführung von Wärmetauschern, die direkt an der Ofenwand installiert wurden, konnte das Problem gelöst werden. Dabei wird Umgebungsluft vertikal entlang der Zellwand vorbei und vom Ofen weggeführt. Abbildung 1.1 zeigt ein Bild des „SHE“ [LND⁺11].

Vorteil des Wärmetauschers ist die Möglichkeit der variablen Luftzu- und Luftabfuhr sowie der Nutzung des Wärmetauschergehäuses als Isolator. Bei Verringerung der Wärmeverluste, unter die der vorher durch Konvektion erzeugten Wärmeverluste ohne Wärmetauscher, dient der Wärmetauscher ohnehin bereits als isolierendes Medium. Diese Eigenschaft ist auf der anderen Seite die größte Schwäche der Wärmetauschervariante. Bei Ausfall des Luftstroms steigen die Außenwandtemperaturen in Minuten in einen für den Ofen kritischen Temperaturbereich.

Geplant ist in einem zweiten Schritt, die bei der Kühlung abgeführte Wärmemenge einer weiteren Nutzung zuzuführen. Allerdings müssen für weitere konkrete Überlegungen das letztlich zur Anwendung kommende Wärmeübertragungsmedium (Luft / Wasser / Thermoöl etc.) und das sich ergebende Temperaturniveau dieses Wärmeträgers bekannt sein. Klarheit wird hierüber allerdings erst nach Abschluss des Pilotprojektes bestehen. Für das Pilotprojekt ist als Kühl- und Isolationsmedium Luft vorgesehen. Eine Wärmenutzung erfolgt im Pilotprojekt nicht.

Ein weiteres Problem stellt der Produktionsablauf dar. Während der Energieeintrag in die Elektrolysezelle flexibilisiert wird, soll jedoch der Produktaustritt möglichst stabil bleiben, um den nachfolgenden Gießerei-Produktionsablauf nicht zu stören. Vorteil der Zelle ist der ca. 10t Aluminiuminhalt, der die Kathode vor Beschädigung durch den Elektrolyten schützt. Bei Mehr- oder Minder-Produktion soll dieser Inhalt variieren, um so einen gleichbleibenden Aluminiumfluss zu nachfolgenden Produktionsabteilungen zu gewährleisten. Sowohl die Lebensdauer der Kathoden als auch der Wärmeaustritt (aufgrund der Volumenänderung) werden hierdurch beeinflusst.

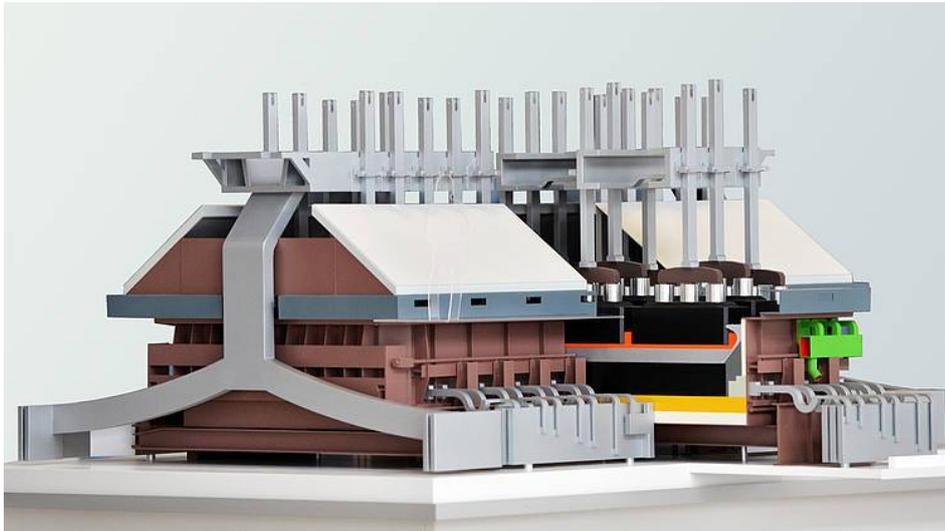


Abbildung 1.2: Nachbau der EPT 14 Aluminiumelektrolysezelle inkl. Wärmetauscher

1.1.4 Projektpartner

Im Rahmen dieses Pilotvorhabens wird die TRIMET von der Bergischen Universität Wuppertal sowie vom Light Metals Research Center der Universität Auckland unterstützt, um die Randbedingung einer gleichbleibenden Energiezufuhr erstmals zu überwinden und diese zu flexibilisieren. Dafür werden an der BUW unter der Leitung der Lehrstühle für Automatisierungstechnik, Werkstofftechnik und Strömungsmechanik die notwendigen Grundlagen experimentell erforscht und durch Simulationsarbeit unterstützt. Die Erkenntnisse werden bei der TRIMET in Essen unmittelbar an der Pilotanlage in die Praxis umgesetzt. Mit Hilfe des somit zur Verfügung gestellten Stromspeichers wird die Integration volatiler erneuerbarer Energiequellen wie Wind und PV in das deutsche Stromnetz bei gleichzeitiger Erhaltung der Versorgungssicherheit unterstützt. Damit leistet TRIMET einen wertvollen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende.

EU-Förderung

Am 23.09.2013 erteilte die Bezirksregierung Arnsberg den Zuwendungsbescheid der Förderung im Rahmen des Programms „Rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen, progress.nrw“ und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), Ziel 2-Programm 2007-2013, Phase IV, Programmbereich „Innovation“, für das Projekt „Virtuelle Batterie“. Seither arbeitet die TRIMET eng zusammen mit der Bergischen Universität, an dem schon im Jahr 2011 gestarteten Projekt. [Sch13]

LSM

Der Lehrstuhl für Strömungsmechanik vertritt an der Bergischen Universität Wuppertal die Grundlagen der Thermodynamik sowie der Strömungsmechanik im Maschinenbau. Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten ist die numerische Beschreibung gekoppelter Probleme, d.h. der Kopplung thermischer und strömungsmechanischer Fragestellungen, wie sie in dem beschriebenen Projekt erforderlich sind. Dafür wurde ein thermoelektrisches Modell eines Viertel des Elektrolyseofens entworfen, das Veränderungen von Widerständen und thermischen Eigenschaften an und im Ofen widerspiegelt [NJ16] und dieses experimentell validiert [Jae14].

LfA

Der Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/Informatik der BUW beschäftigt sich mit dem Entwurf digitaler Systeme zur Steuerung und Regelung von technischen Prozessen. Für das Projekt Virtuelle Batterie wird der LfA ein Regelungskonzept für die Frequenzrichter entwickeln, welche die Volumenstrommenge der am Wärmetauscher vorbei geführten Kühlluft regelt.

LWT

Der Lehrstuhl für Werkstofftechnik wird vorrangig Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der materialwissenschaftlichen Qualitätssicherung durchführen. Eine Kernkompetenz des LWT stellt die Prüfung von Werkstoffen zur Auslegung und Optimierung von Bauteilen und Prozessen dar. Im LWT soll eine Modellzelle realisiert werden, mithilfe der eine Lebensdauerabschätzung des Kathodenmaterials, über Untersuchungen zum Eindringen von Elektrolyt in die Kathode [LO93], [KSO82], vorgenommen werden soll.

LMRC

Das LMRC, Light Metals Research Center, der Universität Auckland, ist ein Team aus Spezialisten der Leichtmetallherstellung und Verarbeitung. Sie begleiten Aluminiumhütten rund um die Welt bei technischen und operationellen Fragen und sind Patenhalter der Wärmetauscher Technologie [TCFW05].

TRIMET

Die TRIMET Aluminium SE wurde 1985 gegründet von Heinz-Peter Schlüter, dessen Familie bis heute 100% der Unternehmensanteile hält. Das Unternehmen beschäftigt 2.900 Mitarbeiter in 6 deutschen und 2 französischen Werken und stellt jährlich 700.000t kundenspezifische Aluminiumwerkstoffe und Komponenten her. In Deutschland hat TRIMET inzwischen drei der vier noch betriebenen Aluminiumhütten aus prekären Stilllegungs-Szenarien übernommen. Diese Hütten produzieren knapp 400.000t Primäraluminium pro Jahr mit einem Strombedarf von 6.300.000MWh. Mit einem Anteil von 1,3% des insgesamt in Deutschland benötigten Stroms ist TRIMET damit der größte private Stromabnehmer in Deutschland. TRIMET möchte mit der Flexibilisierung seiner stromintensiven Aluminiumproduktion einen Beitrag leisten zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende in Deutschland. Der Beitrag beinhaltet dabei die Umsetzung der Baumaßnahmen, die Koordination der Konsortialpartner, die Um-

setzung einer neuen Ofensteuerung zur Regulierung des Wärmehaushalts des Ofens.

1.2 Motivation

Elektrolyse-Zellen werden üblicherweise durch die kontinuierliche Überwachung der Hallen-Stromstärke, der Zellenspannung und regelmäßigen Stichproben von Badtemperatur und Erstarrungstemperatur (oder chemischer Analyse des Bads) gesteuert. Weitere weniger häufig durchgeführte Kenngrößen sind der Spannungsabfall und Stromverteilung der Anode und Kathode, Metallproben und weitere Temperaturmessungen an der Ofenwanne. Durchgesetzt hat sich die kontinuierliche Überwachung der Ofenspannung zur Steuerung der Fütterungsrate (Al_2O_3 Konzentration) und zur Erkennung von Unruhe (Spannungsschwankungen). Mit den durch die „Virtuelle Batterie“ auftretenden Stromstärkeänderungen entsteht eine weitere Größe mit starkem Einfluss auf die Energiebilanz, welche durch die Regelung des Wärmeverlustes, unter anderem über den Wärmetauscher kompensiert werden muss. Weitere beeinflussende Größen sind der Wärmeverlust über den Abgasstrom von der Oberseite des Ofens, die Wärmeverluste über alle weiteren Oberflächen, die Ofenmaterialien und deren Verhalten bei unterschiedlichen Aggregatzuständen, der Aluminium-Produktionsprozess und dessen Effizienz, die operativen Eingriffe (u.a. Metallentnahme), die chemische Zusammensetzung des Elektrolyten sowie die Leistungseinbringung (über Spannung und Stromstärke) in den Ofen. Aufgrund des sehr unterschiedlichen Verhaltens der Stellgrößen, vor allem bei den Ofenmaterialien, ist eine Entwicklung eines Regelungskonzeptes äußerst wichtig. Des Weiteren ist das Konzept so auszulegen, dass es das bestehende Konzept zur Regelung der Ofenstabilität integriert. Als wichtigste zu regelnde Größe bleibt hierbei neben der Ofenstabilität die Stärke der Seitenkruste. Ein Verlust der Seitenkruste wird die Ofenwand angreifen und bei mehreren Angriffen oder länger andauerndem Angriff diese irreparabel zerstören. Ziel der Arbeit ist es, ein Konzept zu entwickeln, dass eine Flexibilisierung des Energieeingangs mithilfe von den genannten Stellgrößen zulässt.

Besonderer Wert soll dabei auf die Stellgrößen der Luft- und Abgasströme sowie der Ofenmaterialien gelegt werden, um einen geeigneten und regelbaren Wärmeverlust über die Seiten zu gewährleisten. Die hier angestrebte Lösung ist eine Weiterentwicklung der 9-Box durch Erweiterung mit einer dritten Dimension. Diese Dimension kann aus einer Verbindung von Energieänderung und zeitlicher Abhängigkeit entwickelt werden.

1.2.1 Ziel

Hauptthema und Ziel der Dissertation ist es zu erforschen, wie der Ofen auf die Modifizierungen reagiert, und Lösungsvorschläge zu erarbeiten, mit denen die Prozesssteuerung (Regelung) den Produktionsablauf bei variabler Stromstärke sichern kann.

Aus den angesprochenen Themen ergeben sich folgende Fragestellungen, die in vorliegender Dissertation betrachtet, diskutiert und analysiert werden:

- **Erfassung von Messwerten und deren Eigenschaften:** Welche Werte spiegeln eine sinnvolle Aufnahme des Ofenstatus wieder und welche geeigneten Methoden wurden entwickelt, um Messwerte aufzunehmen. Des Weiteren wurde betrachtet, welche Störgrößen (Trägheit der Messung, Alter des Messwerts bzw. Frequenz der Messwertaufnahme, Messwertverschiebung, u.s.w.) Einfluss auf die Messwerte haben (Kapitel 5).
- **Reaktion des EPT14 Ofens auf Modulation:** Welche Einwirkungen hat die Modulation auf die Massen- und Energiebilanz sowie auf den Prozess und den Produktionsablauf. Müssen ggfs. Abläufe wie das Anodenwechseln verändert oder angepasst werden? Wie wurde der Metallwölbung entgegengewirkt (Kapitel 5.5).
- **Grundlagen und Entwicklung der Randkruste:** In einem weiteren Abschnitt wurde die zeitliche Veränderung der Seitenkruste besonders untersucht. Hierbei dient die Seitenkruste als Puffer vor massiven Leistungsänderungen, bei denen sie vorab verstärkt oder verringert wird. Als Hilfsgröße

kann hier der Superheat (Differenz zwischen Badtemperatur und Erstarrungstemperatur des Mediums) zur Auswertung dienen.

- **Einfluss der Wärmetauscher:** Eine erzwungene Kühlung über die Ofenwand wird neue Verhaltensweisen des Ofens zeigen. Diese sind durch die limitierten Messmöglichkeiten nicht immer erkennbar. Mithilfe einer ausführlichen Messkampagne (mit einem eigens entwickelten Randkrustenmessgerät) werden diese untersucht und deutlich gemacht. Mit einem thermoelektrischen Modell der BUW können Änderungen von Isothermen sichtbar gemacht werden und aus diesen Rückschlüsse über Produktionseigenschaften der Zelle geschlossen werden. Des Weiteren gab es bislang keine Untersuchungen über den Wirkungsbereich des Wärmetauschers. Wie viel Wärme kann dem Ofen entzogen werden? Welche Isolationsleistung kann mit dem Wärmetauscher erzeugt werden. Wie schnell reagiert der Ofen auf Änderungen durch den Wärmetauscher. Diese Fragen wurden durch intensive Versuchsdurchführungen beantwortet.
- **Änderungen an der Prozesssteuerung:** Durch welche Änderungen kann die aktuelle Prozesssteuerung den neuen Gegebenheiten angepasst werden? Kann ggfs. durch Einführung einer dritten Achse, wie Zeit oder Menge des Leistungseintrags, in die 9Box-Steuerung die Flexibilisierung des Leistungseintrags unterstützt werden? Ein neues Regelungskonzept bringt eine Neubewertung der Öfen mit sich. Ein Zustand, der bisher als inakzeptabel angesehen wurde, ist möglicherweise im neuen Konzept eine Vorbereitung auf einen nachfolgenden Leistungsänderungsschritt. Die Enthalpieänderung des Ofens kann hierbei als ein mögliches Bewertungskriterium verwendet werden (Kapitel 6).
- **Konkrete Ausarbeitung Wärmezähler / Energycounter:** Um eine Kontrollgröße für den stetig wechselnden Energiehaushalt des Ofens zu haben, ist die Entwicklung eines Energycounters in Echtzeit empfehlenswert. Ein Elektrolyseofen wandelt ca. 700kWh elektrische Energie in chemische und Wärmeenergie. Über einen längeren Zeitraum gesehen sollte dieser

Energiebetrag durchschnittlich eingehalten werden. Um das zu gewährleisten wurde ein Energycounter entwickelt. Dieser zählt nicht nur die durchschnittlich eingebrachte Leistung (Spannung·Stromstärke), sondern auch die Wärmemenge im Ofen (eingebrachte minus Produktions-Leistung). So kann der Wärmehaushalt des Ofens stetig überwacht werden.

- **Limits:** Wo sind die Limits der Modulation eines EPT14 Ofens ohne und mit Änderungen des jetzigen Designs des Ofens und der Prozesssteuerung (Abbildung 7.6)
- **Virtueller und realer Test:** Schlussendlich muss geprüft werden, ob das entworfene System umsetzbar ist, und wie die Ofenparameter wie Temperatur und Randkruste darauf reagieren.

2 Stand der Technik

2.1 Aluminiumelektrolyse

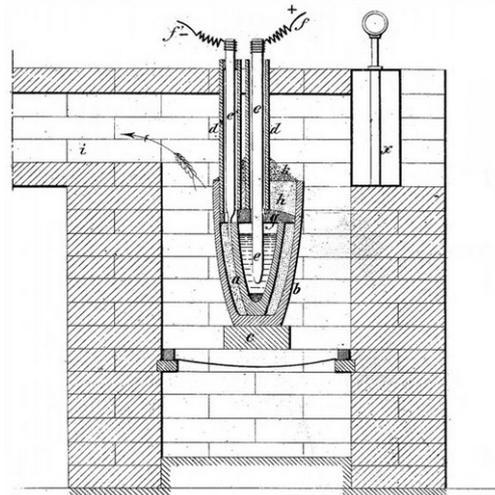


Abbildung 2.1: Patentzeichnung von Heroult aus dem Jahr 1886 [JTL88]

Wann die Geschichte der Aluminiumelektrolyse eigentlich beginnt, weiß bis heute niemand so genau. Historiker haben das Jahr 1886 als Beginn festgelegt, in dem Hall (in den USA) und Héroult (in Frankreich) kurz nacheinander zu einem gleichen Verfahren gekommen sind (Abbildung 2.1). Seither konnte man in wirtschaftlich lohnenden Mengen Aluminium herstellen, und an der grundlegenden Methode hat sich bis heute kaum etwas geändert. 1854 kamen Robert Bunsen (in Deutschland) und Sainte Claire Deville (in Frankreich) auf eine ähnliche Methode zur Herstellung von Aluminium, ihnen fehlte jedoch die Möglichkeit zur

Herstellung von genügend Strom, die erst Werner von Siemens mit dem Dynamo brachte. Bereits 1782 setzte der Chemiker Lavoisier den Wettlauf zur wirtschaftlichen Produktion von Aluminium in Gang. Seine Vermutung war, dass Tonerde wahrscheinlich das Oxid eines Metalls ist, dass mit Sauerstoff eine so starke Bindung eingeht, dass es durch kein bekanntes Reduktionsmittel aufgespalten werden kann. Der Verlauf der Erfindungen, 1807 Davy, 1825 Oersted, 1827 Wöhler, bis hin zu den genannten, bestätigte Lavoisiers These und ließen den Preis bis im Jahre 1900 von 2400RM/kg auf 25RM/kg fallen [JTL88].

2.1.1 Grundlagen

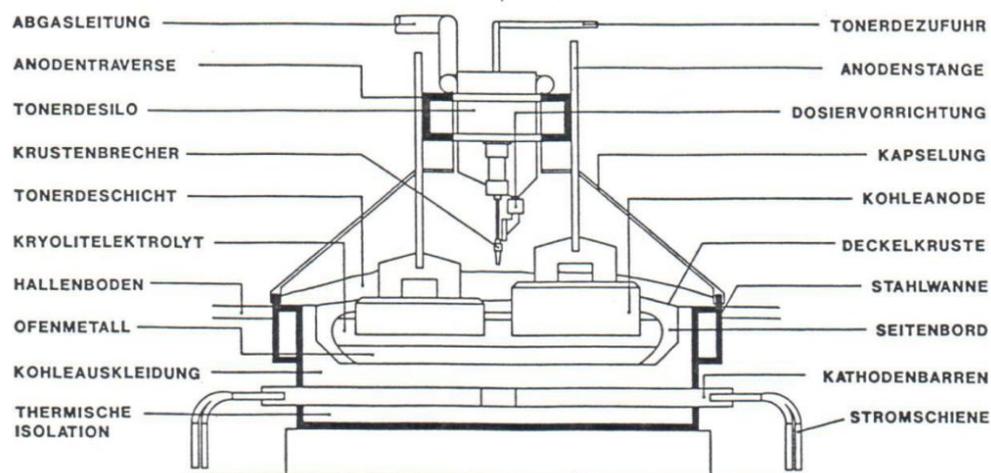
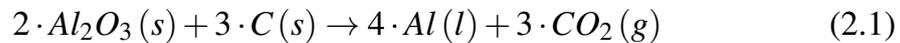


Abbildung 2.2: Querschnitt einer Aluminiumelektrolysezelle

Aluminium wird durch Reduktion aus seinem Oxid Al_2O_3 (Tonerde) gewonnen. Dabei wird sie in geschmolzenem Kryolith Na_3AlF_6 mit einem Überschuss an AlF_3 bei ca. $960^\circ C$ gelöst und das Aluminium durch die Schmelzflusselektrolyse an der Kathode abgeschieden. Die Anode des Ofens wird von mehreren Kohlenstoffblöcken und die Kathode von dem bereits abgeschiedenen flüssigen Aluminium gebildet. Der hoch lösungsfähige Elektrolyt und das flüssige Aluminium

befinden sich in einer Stahlwanne, die mit einer Auskleidung aus Kohlenstoff und keramischem Isolationsmaterial versehen ist (Abbildung 2.2).



Bei der chemischen Reaktion nach Gleichung 2.1 wird der elektrische Ladungszustand des Aluminiumions geändert. Es geht dabei von seinem positiv dreiwertigen Ionenzustand (Al^{3+}) in den elektrisch neutralen Zustand über. Dazu werden nach dem Faraday'schen Gesetz pro Aluminiumion drei Elektronen (e^-) oder anders ausgedrückt, drei Mole Elektronen pro Mol Aluminium benötigt.



Wird elektrischer Strom I durch eine Elektrolysezelle während der Zeit t geleitet, so wird nach genannten Gleichungen für die Entladung von vier Aluminiumionen die elektrische Ladung von 12 Elektronen benötigt. Die theoretische Produktion berechnet sich daraus wie folgt:

$$m_{Al.th.} = \frac{4 \cdot M_{Al} \cdot I \cdot t}{12 \cdot F} \quad (2.3)$$

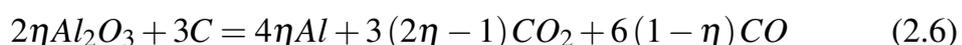
In der Praxis wird weniger Aluminium produziert als das der berechneten Menge aus dem Faraday'schen Gesetz. Das Verhältnis von theoretischer und der nach Gleichung 2.3 produzierten Menge wird als Stromausbeute bezeichnet.

$$\eta = \frac{m_{Al.Pr.}}{m_{Al.th.}} \quad (2.4)$$

Nach Pearson und Waddington [TJ47] ist die Verlustmenge rückzuführen auf die Reoxidation des Kohlendioxids nach:



Somit kann mit Einbezug der Stromausbeute folgende Gleichung angewandt werden:



oder nach Anwendung in Gleichung 2.3:

$$m_{Al.Pr.} = \frac{4 \cdot M_{Al} \cdot I \cdot t \cdot \eta}{12 \cdot F} \quad (2.7)$$

Weitere Einflussfaktoren mit deutlich kleinerer Auswirkung auf die Stromausbeute sind Oxidationen und Reduktionen von anderen löslichen Elementen, die mehrwertig und ionisierbar sind, Stromleitung über flüssiges Aluminium bei Kurzschlüssen über die Anode sowie Verlust von Aluminium in die Ofenauskleidung.

Der Elektrolyt

Der Elektrolyt ist Hauptbestandteil des Hall-Héroult-Prozesses. In ihm findet das Auflösen, Erwärmen und Zersetzen des Aluminiumoxids statt. Die Eigenschaften des Elektrolyten sind dabei maßgeblich für den Produktionsprozess verantwortlich, darunter insbesondere folgende [ESH86]:

- **Liquidustemperatur:** Wärmetransport und Randkrustenausbildung
- **elektrische Leitfähigkeit:** Ohmsche Elektrolytspannung und damit direkt für die Wärmeerzeugung und auch für den spez. Energieverbrauch
- **Löslichkeit von Al_2O_3 :** Bildung und Auflösung von Tonerde auf der Kathodenoberfläche
- **Löslichkeit von Al:** Stromausbeute (siehe oben)
- **Viskosität:** Abhängig von der Liquidustemperatur, oft auch in Zusammenhang mit dem Superheat beschrieben und in direktem Zusammenhang mit der Auflösung des Aluminiumoxids
- **Grenzflächenspannung:** Anodeneffekte
- **Dichte:** elektromagnetische Effekte

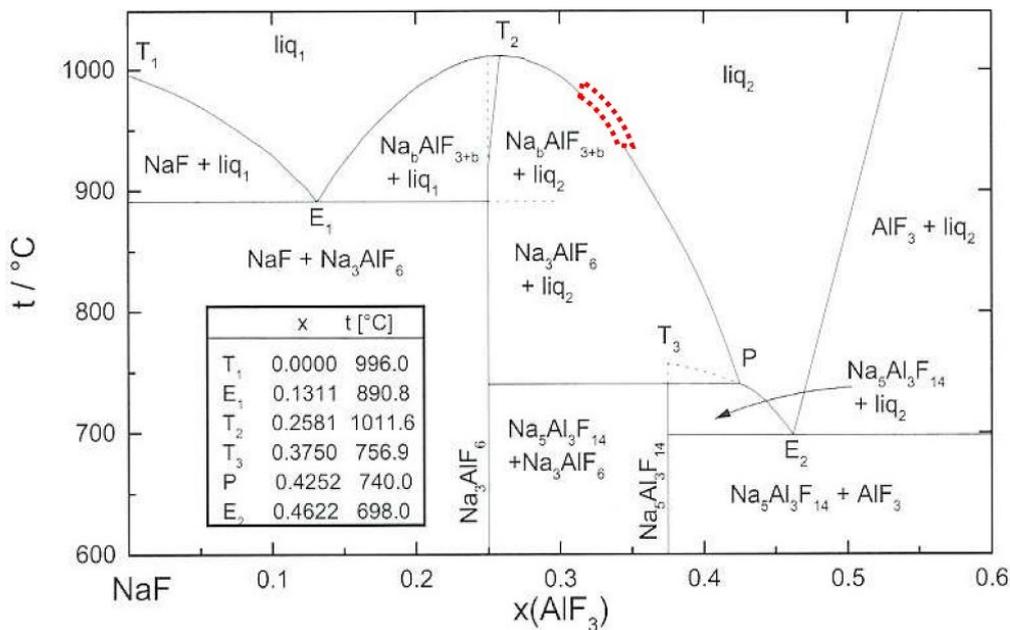


Abbildung 2.3: Phasendiagramm $NaF - AlF_3$ [RS90]

In der Praxis wird die Zusammensetzung des Elektrolyten als ein Gemisch aus Kryolith (Aluminiumtrinitriumhexafluorid) mit einem Überschuss an AlF_3 angegeben. Der gelöste Anteil an Aluminiumoxid beträgt 2-8% mit einem idealen Wert von ca. 3% (ähnlich Abb. 2.5). Zusätzliche Inhaltsstoffe, abhängig von den Materialien, verwendet beim Ofenbau und den Stoffen, die mit dem Aluminiumoxid in den Ofen gelangen, mit einem Gesamtbestandteil von weniger als 8%, sind NaF , CaF_2 , MgF_2 , LiF und wenige andere. Der Elektrolyseprozess wird weltweit bei einer Temperatur von ca. 955-965°C betrieben [Uti99]. Dabei ist die Zusammensetzung des Elektrolyts so gewählt (Abbildung 2.3), dass die Schmelz- (Liquidus-)temperatur ca. 5-10°C unter der Prozesstemperatur liegt. Diese Differenz wird Superheat genannt und ist maßgeblich für die Lösungsfähigkeit des Aluminiumoxids.

Energieanforderungen

Eine elektrochemische Zelle benötigt zur Erzeugung von chemischen Reaktionen ein angelegtes elektrisches Potential. Nach der Gleichung von [GK93] wird

die Ofenspannung in 3 Gruppen eingeteilt, welche eine ungefähre Größe wie in Abbildung 2.4 gezeigt, besitzen.

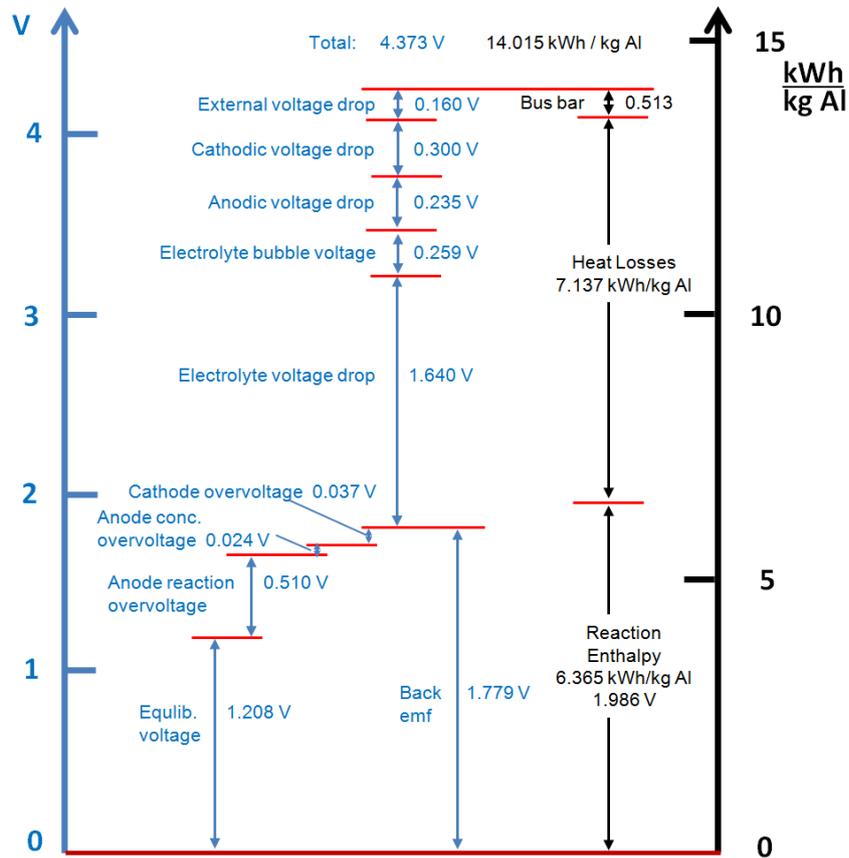


Abbildung 2.4: Spannungsverteilung eines Elektrolyseofens [Hau98]

$$U_{cell} = E_{rev} + [\eta_{CC} + \eta_{AA} + \eta_{AC}] + [I \cdot (R_{Anode} + R_{Gas} + R_{Elektrolyt} + R_{Kathode} + R_{Extern})] \quad (2.8)$$

Der erste Teil ergibt sich aus dem Elektrodenpotenzial (Gleichgewichtsspannung, Zersetzungsspannung) der Gleichung 2.1 und wird mithilfe der Nernst-Gleichung bestimmt. Gleichung 2.9 ist die Grundgleichung, bei der E^o das Standardpotenzi- al bildet, während in 2.10 [GK93] bereits die Anzahl der übertragenen Elektronen

(Equivalentzahl) eingetragen ist. Die Aktivität von Aluminium und Kohlenstoff liegt bei eins und die von Kohlendioxid nahe eins, somit bleibt die einzige Variable die Aktivität des Aluminiumoxids. [GK93] und auch [Hau98] berechneten eine Zersetzungsspannung von ca. 1,2V.

$$E = E^o + \frac{RT}{z_e F} \ln \frac{\alpha_{Al}^4 \cdot \alpha_{CO_2}^3}{\alpha_{Al_2O_3}^2 \cdot \alpha_C^3} \quad (2.9)$$

$$E = -\frac{\Delta G^o}{6F} + \frac{RT}{6F} \ln \left(\frac{\alpha_{O_{x(ges.)}}}{\alpha_{O_x}} \right)^{2,77} \quad (2.10)$$

Der zweite Teil besteht aus den Reaktions- und Überspannungen und ist stark von der Temperatur und der Stromdichte an Anode und Kathode abhängig. Die Polarisation an der Anode hat eine Reaktions- und eine Konzentrationsüberspannung. Die Reaktionsspannung hat mit ca. 0,5V einen großen Einfluss, während die Konzentrationsüberspannung erst bei niedrigem Aluminiumoxidgehalt ansteigt.

Der dritte und für die Untersuchungen zur Flexibilisierung des Energieeintrags maßgebliche Teil wird durch die ohmschen Widerstände der einzelnen Ofenmaterialien multipliziert mit der Hallenstromstärke bestimmt. Dieser Teil ist auch maßgeblich für die Wärmeerzeugung im Ofen. Die externen Spannungsverluste können für die Untersuchungen vernachlässigt werden, da sie keine Wärme im Ofen erzeugen. Jedoch wird die Ofenspannung immer inklusive externe Spannungsverluste angegeben, so dass sie zur Subtraktion ermittelt werden muss. Aufgrund der nahezu identischen Schienenführung der Öfen sind die externen Spannungsverluste, bis auf die der Endöfen der Ofengruppen, für alle Öfen gleich. Der Spannungsabfall über die Anoden und Kathoden ist vor allem durch den Kontaktwiderstand vom Übergang von Gusseisen auf den Kohlenstoff sowie durch den Materialwiderstand des Kohlenstoffs selbst bestimmt. Anodenzapfen, Anodenjoch sowie Kathodenbarren sind aus Stahl und haben einen geringen Widerstand. Bei der Kathode spielt die Oberfläche noch eine besondere Rolle. Sind hier Ablagerungen durch Elektrolyt vermischt mit Aluminiumoxid vorhanden, hebt das den Widerstand stark an. Der Widerstand, erzeugt durch Gasblasen un-

ter der Anode, hängt stark von deren Form und von der Metallwölbung ab und wird im weiteren besonders betrachtet. Der mit wenigen Zentimetern recht kleine Teil des Elektrolyten trägt den mit Abstand größten Teil der Spannung, erzeugt durch das Ohmsche Gesetz. Er ist nicht nur proportional zum Anoden-Kathoden-Abstand (ACD), sondern ebenfalls stark abhängig von Temperatur und chemischer Zusammensetzung des Elektrolyten. Der Einfluss von Aluminiumoxid und dem ACD auf die Ofenspannung ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Dabei ist der Anstieg mit fallendem Aluminiumoxidgehalt auf die Konzentrationsüberspannung an der Anode und der Anstieg mit steigendem Aluminiumoxidgehalt auf die ohmsche Widerstandserhöhung des Elektrolyts zurück zu führen.

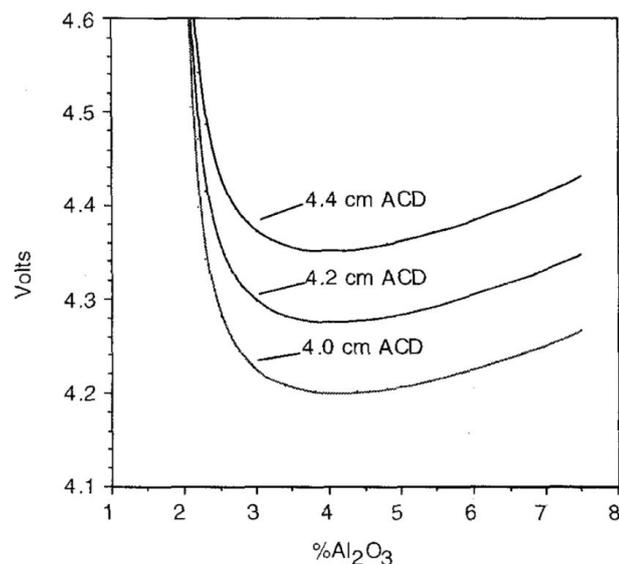


Abbildung 2.5: Ofenspannung bei versch. ACD's [Hau98]

Für die Energiebilanz und den Energycounter wurden alle Spannungsabfälle des EPT14 Ofens aufgenommen. Eine detaillierte Beschreibung der Messungen und Ergebnisse ist im nachfolgenden Kapitel 3 aufgeführt. Zur Übersicht der Ergebnisse dient Tabelle 2.1.

Position		EPT14 Ofen	mit MK und SHE
Extern	V	0,36	0,31
Anodisch	V	0,30	0,30
Elektrolyt + Gas	V	1,62	1,53
Elektrochemisch	V	1,76	1,76
Kathodisch	V	0,30	0,30
Summe	V	4,34	4,20
Wärmeverlust	kW	317	302

Tabelle 2.1: Spannungsverteilung bei 162kA

Zur Haltung der Wärmebilanz muss die über die Widerstände erzeugte Energie den Ofen wieder verlassen. Eine Aufteilung findet wie folgt statt:

- Produktion
 - Die benötigte Energie zur Aufheizung des Aluminiumoxids das, proportional zur Stromstärke und Stromausbeute, dem Ofen zugegeben wird.
 - Die benötigte Energie zur Phasenumwandlung des festen Aluminiumoxids in flüssiges Aluminium.
 - Die benötigte Energie zur Phasenumwandlung verschiedener Verunreinigungen, die mit dem Aluminiumoxid in den Ofen gelangen.
- Wärmeverluste
 - Die Wärmeverluste über die Oberseite des Ofens, welche beeinflusst sind durch die Temperatur, die thermische Leitfähigkeit und Geometrie der Anoden, die Stärke und Zusammensetzung der Eindeckung sowie maßgeblich durch den Volumenstrom der Abgasreinigungsanlage. (Über eine variable Volumenstrommenge könnten diese Verluste geregelt werden.)
 - Die Wärmeverluste über die Seitenwand des Ofens, beeinflusst durch die Ofenisolation und den Superheat, der die Stärke der Randkruste

bestimmt. (Mit Wärmetauscher könnte dieser Bereich geregelt werden.)

- Die Wärmeverluste über den Ofenboden, beeinflusst über die Temperatur sowie die elektrischen Widerstände der Kathodenmaterialien.
 - Die Wärmeverluste während oder nachdem Arbeiten am Ofen durchgeführt wurden wie: Anodenwechsel, Schöpfen, Eindecken, Messungen oder das Aufheizen der gesetzten Anoden oder des Eindeckmaterials.
- Enthalpieänderung
 - Die Änderung der im Ofen gespeicherten Energie, die er aufgrund seiner Temperatur und der Phasenzustände der Materialien besitzt.

Die für die Produktion benötigten Energieverluste sind proportional zur Stromstärke und Stromausbeute und somit ideal an eine Modulation anpassbar. Enthalpieänderungen kann ein Elektrolyseofen bis zu einem gewissen Grad aufnehmen und begünstigen die Modulation ebenfalls. Lediglich die Wärmeverluste sind sehr träge und bislang nicht, oder nur minimal passiv, regelbar (Kapitel 5).

2.1.2 Rohstoffe

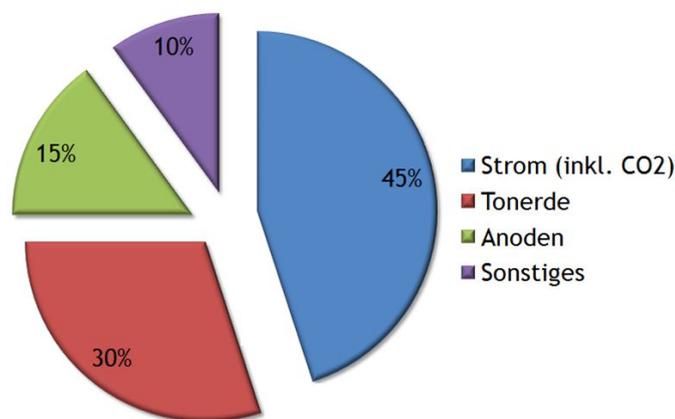


Abbildung 2.6: Kostenstruktur Europa [TRI15]

Mit über 90% (Abbildung 2.6) Kostenanteil sind die Rohstoffe die Kostentreiber in der Aluminiumindustrie. Dabei nimmt Strom den mit Abstand größten Betrag ein. Das ist weltweit nicht einheitlich, wie der Vergleich in Abbildung 2.8 deutlich zeigt. Die Kosten für den Bau eines Aluminiumwerks, mit ca. 5.000-9.000US\$ pro Tonne Jahresproduktion ([BCM⁺08], [VHBB01]), lassen sich dann leicht gegen den Strompreis des Standorts sowie dem deutlich besseren Energieverbrauch einer neuen Ofentechnologie rechnen. Anoden und Tonerde nehmen bei der Entscheidung kaum Einfluss, da ihr Preis ein weltweit gleichwertig gehandelter ist. Diese Gegebenheiten lassen vermuten, dass neue Produktionsstandorte hauptsächlich in Ländern mit niedrigen Energiekosten entstehen. Diese Annahme ist jedoch falsch, da z.B. die Transportkosten aus und nach Russland, den günstigen Wasserstrom übertreffen. Des Weiteren wird in China mittlerweile 60% des weltweiten Primäraluminiums produziert (Abbildung 2.7), und das nur, weil das politische Interesse die hohen Stromkosten überwiegt.

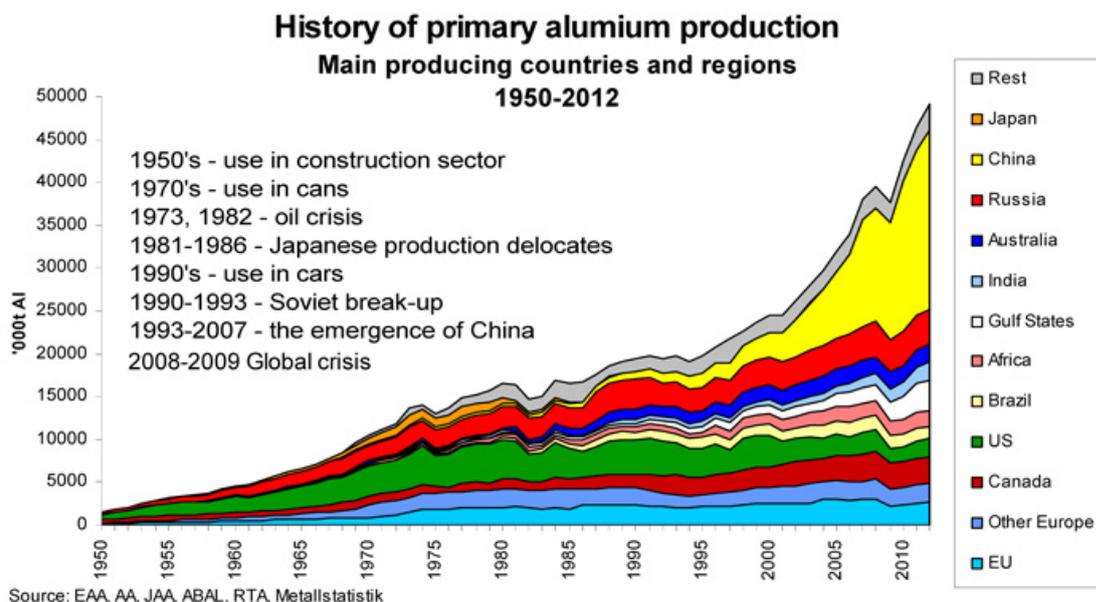


Abbildung 2.7: Weltweite Primäraluminiumproduktion [alu15]

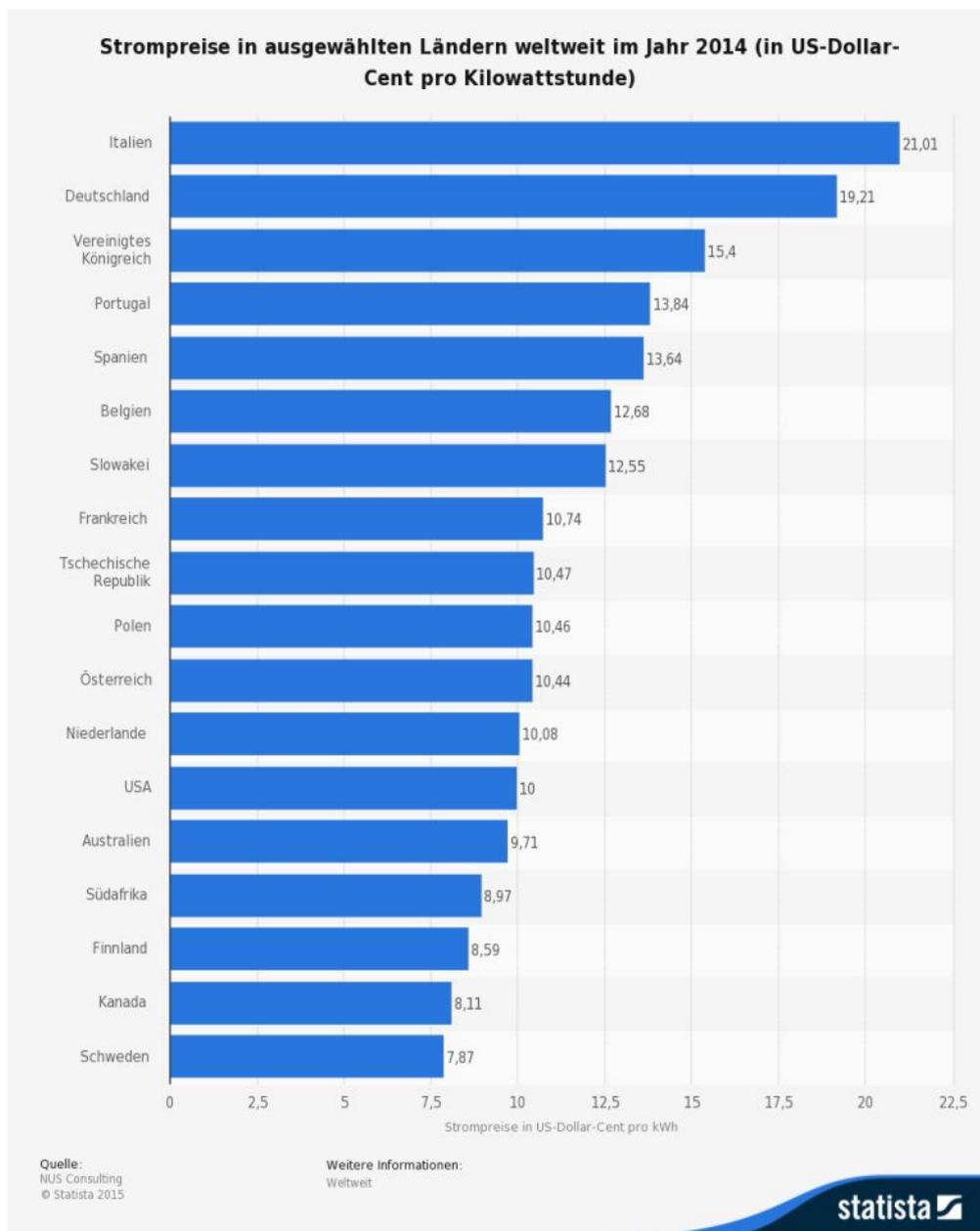
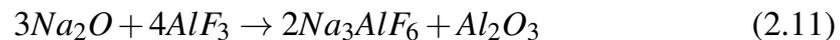


Abbildung 2.8: Strompreisvergleich 2014 [Con15]

Aluminiumoxid

Mit über 8% ist Aluminium das dritt häufigst vorkommende Element in der Erdkruste. Aufgrund seines sehr niedrigen elektrochemischen Potentials kommt es jedoch fast ausschließlich in oxidierter Form vor. Abgebaut wird Aluminiumoxid

hauptsächlich im Äquatorgürtel ($\pm 20^\circ$) bei Guinea, Jamaika, Brasilien, Australien und Afrika, als Bauxit mit einem Anteil von 40-60%. Bauxit wird dann im Bayer-Verfahren durch konzentrierte Natronlauge bei Temperaturen von 140-260°C aufgeschlossen. Nach Abtrennung der unlöslichen Anteile (Titanium, Gallium, Eisen, Zink u.w.) wird die Lauge abgekühlt und das Aluminiumhydroxid aus der übersättigten Lösung durch Impfen ausgefällt. Das entstandene feste Aluminiumhydroxid wird in Drehöfen bei einer Temperatur von 1100 bis 1300 °C gebrannt, wobei Aluminiumoxid entsteht [GK93]. Aufgrund des Verfahrens sind in der eingesetzten Tonerde immer Rückstände von 0,3-0,5% Na_2O , welche die Liquidustemperatur des Elektrolyts (nach Abbildung 2.3) verändern und eine Zugabe von AlF_3 erfordern. Inhaltsstoffe der Tonerde, die das Produkt Aluminium verunreinigen, sind SiO_2 , Fe_2O_3 u.w.. Die Verdünnung des AlF_3 -Überschusses im Elektrolyt ist nach folgenden Formeln beschrieben.



Kohlenstoff Anoden

In den meisten Aluminiumelektrolysen werden vorgebrannte Anoden eingesetzt. In Russland existieren zum Teil noch vereinzelte Elektrolyseöfen, bei denen der Brennprozess der Anode mit im Elektrolyseofen, etwa 1m über dem flüssigen Elektrolyt, statt findet. Neben ihrer Fähigkeit als Stromleiter, dient die Kohlenstoffanode hauptsächlich als Reaktionselement zur Bildung von CO_2 mit dem Sauerstoff des Aluminiumoxids. Anoden werden aus kalziniertem Petrolkoks hergestellt, welcher zusammen mit Reststücken mit dem Bindemittel Steinkohlenteerpech vermischt wird. Dabei sind Korngrößen und Verteilung äußerst wichtig für die späteren Eigenschaften wie z.B. einen niedrigen Luftabbrand, eine hohe Dichte und eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Die vermischte Masse wird erhitzt und in die benötigte Form durch Rütteln verdichtet, bevor sie bei ca. 1250°C

gebrannt wird. Der Brennvorgang in einem Ringofen dauert mehrere Tage (Abbildung 2.9). Dabei wird der Grünling (gerüttelte Anode) unter Sauerstoffabschluss mit der heißen Abgasluft des Brennvorgangs erhitzt. Ist der Brennvorgang in der vorigen Kammer abgeschlossen, werden die Brenner eine Kammer weiter, auf den vorgeheizten Grünling, gestellt. Der gesamte Brennvorgang dauert 16-21 Tage, in denen Temperatur, Aufheiz- und Abkühlungskurve des Grünlings genau geregelt werden, um thermische Risse im Grünling zu vermeiden [GK93].

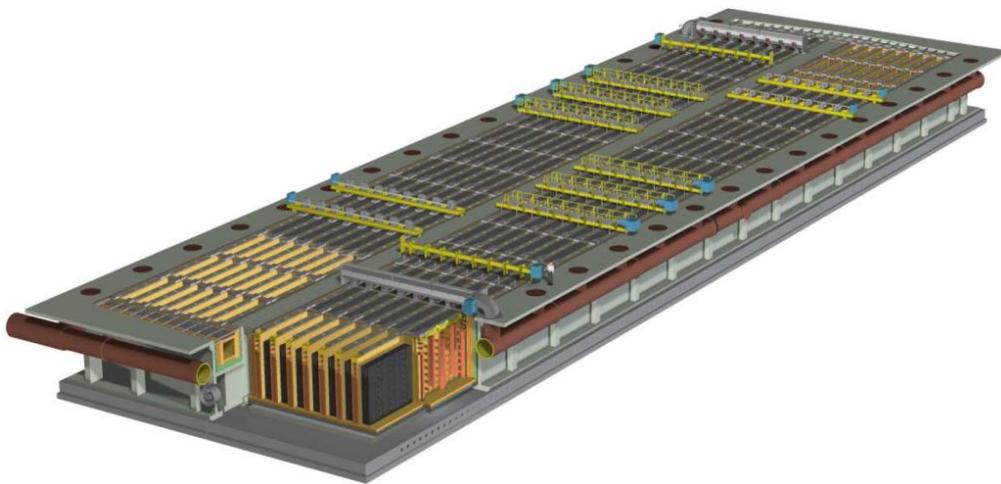


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines Anodenringofens [Lü12]

Kathode und Isolation

Die Anforderungen an die chemische Reinheit der Kathoden sind weitaus geringer als die der Anoden. Dafür ist ihre elektrische Leitfähigkeit und mechanische Festigkeit von höchster Bedeutung. Die Lebensdauer einer Kathode beträgt 1500-2500 Tage (TRIMET ca. 1950 Tage) und ist maßgeblich durch die elektrochemische und mechanische Abnutzung bestimmt. Des Weiteren ist eine möglichst geringe Porosität von Vorteil, so dass nur geringe Mengen an Elektrolyt in die Kathode eindringen können, die bei Erstarrung Teile der Kohle abtrennen [For69].

Die Isolation des Ofens muss neben einer niedrigen thermischen Leitfähigkeit eine gute Beständigkeit gegen Elektrolyt und Aluminium aufweisen. Gerade bei Ofenstart kann flüssiges Material bis zur Isolationsschicht vordringen. In der Aluminiumindustrie werden zur Isolation hauptsächlich Schamottesteine verwendet, während die Ofenwand mit Siliziumcarbid Steinen geschützt wird (siehe Anhang Abbildung .1). Diese haben eine deutlich schlechtere Isolationsfähigkeit aber eine bessere Beständigkeit gegen Kryolith. So entsteht über die Seiten genug Wärmeabfluss, dass sich eine stabile Randkruste im Ofen bildet, die den Ofen schützt.

2.2 Prozesskontrolle

2.2.1 Regelungstechnische Grundlagen

Die Regelungstechnik beschäftigt sich im Allgemeinen mit der Charakterisierung, Untersuchung und der gezielten Beeinflussung dynamischer Systeme. Bevor an dieser Stelle mit einem konkreten Regelungskonzept begonnen wird, soll zunächst näher auf die Grundlagen eingegangen werden. Die Unterschiede zwischen Steuerung und Regelung lassen sich am einfachsten anhand der IEC-Norm 60050-351 früher DIN 19226 erörtern [DI14].

„Die Regelung bzw. das Regeln ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“ [DI14]

Im Unterschied zur Regelung fehlt bei einer Steuerung die Rückwirkung der Ausgangsgrößen auf die Eingangsgrößen. Somit ist der Wirkungsablauf offen, während er bei der Regelung geschlossen ist.

Dynamische Systeme

Nach Lunze [Lun14] ist ein dynamisches System eine Funktionseinheit, deren wichtigste Kenngrößen sich zeitlich ändern, weswegen diese als Funktion der Zeit dargestellt werden müssen. Die Veränderungen, welche in einem dynamischen System stattfinden, werden als dynamischer Prozess bezeichnet. Wird diese Sichtweise nun auf die Realität übertragen, ist jedes technische oder biologische System ein dynamisches System, da deren innere Vorgänge nur mit zeitveränderlichen Größen sinnvoll beschrieben werden können. Ein großes Ziel der Regelungstechnik ist es daher immer, eine vollständige abgeschlossene mathematische Beschreibung des vorliegenden Systems aufzustellen. Allerdings ist dies aufgrund der hohen Komplexität von vielen Systemen, dem dieser Arbeit zugrunde liegenden System ebenfalls, nicht möglich, wodurch oft stark vereinfachte Modelle verwendet und dementsprechend nur einfache Regelkonzepte auf die Problemstellung angewendet werden können. Das System wird oft auch als Strecke bezeichnet.

Stabilität

Eine der fundamentalen, wenn nicht sogar die elementare Forderung an ein dynamisches System ist die Stabilität eben jenes Systems. Falls das System nicht, schon aus sich selbst heraus über diese Eigenschaft verfügt, muss dies mit einem Regler sichergestellt werden. Später können noch zusätzliche Forderungen, wie z.B. optimale Betriebspunkte oder Produktionsmengenoptimierungen, durch den Einsatz und die Anpassung des Reglers realisiert werden. Diese Zusätze sind ohne Stabilität nicht zu erreichen. Für die Stabilität existieren mehrere leicht unterschiedliche Definitionen von Stabilität, für das zugrunde liegende Projekt eignet sich am Besten die sogenannte Ein-Ausgangs-Stabilität. Hauptaugenmerk bei der Ein-Ausgangs-Stabilität liegt dabei auf den von außen messbaren Systemgrößen. Bei beschränkten Eingängen muss das betrachtete System ebenfalls für alle Zeiten beschränkte Ausgänge aufweisen. Übertragen auf den Elektrolyseofen bedeutet dies zum Beispiel, dass die Ofentemperatur sich nur in einem schmalen Band

bewegen darf. Dies ist leider nicht der Fall, somit ist der Einsatz eines Reglers unumgänglich.

Regler

Aufgabe des Reglers ist es ein dynamisches System automatisiert so zu beeinflussen, dass die Ausgänge des Systems $y(t)$ die von außen festgelegten Sollwerte $w(t)$ möglichst abbildet und somit die Differenz $e(t)$ im optimalen Fall gegen Null tendiert. Der Regler kann daher selbst als System angesehen werden, welches die geforderten Sollwerte als Eingänge erhält und daraus dessen Ausgangssignale erzeugt, welche wiederum als Eingangssignale des eigentlichen Systems fungieren. Der Regler selbst steht laut oben genannter Definition in einem geschlossenen Wirkungskreislauf mit der Strecke; dies wird auch als Regelkreis bezeichnet. Durch die Schließung des Wirkungskreislaufs ist der Regler in der Lage, Störungen im System entgegenzuwirken und auszuregeln.

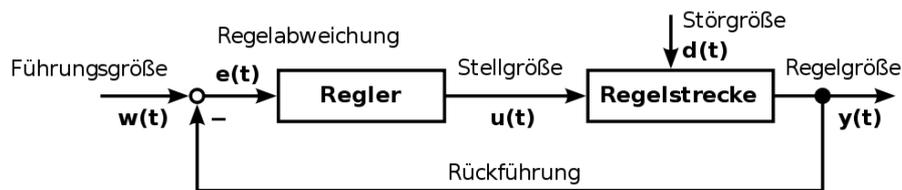


Abbildung 2.10: Ansicht eines Standardregelkreises

Der enorme Vorteil des Reglers gegenüber einer reinen Steuerung ist, dass dem Regler nicht nur Informationen über die Führungsgröße, sondern auch über die aktuelle Regelgröße zugeführt werden. Dadurch, dass der Regler auf die Regelabweichung $e(t) = y(t) - w(t)$, statt nur auf die Führungsgröße reagiert, können mit Hilfe eines Reglers auch Störgrößen $d(t)$, welche auf die Regelstrecke wirken

und damit die Regelgröße beeinflussen, ausgeglichen werden. Der Standardregelkreis lässt sich wie folgt durch eine Übertragungsfunktion beschreiben:

$$\text{offener Regelkreis } G_0(s) = G_S(s) \cdot G_R(s) \quad (2.13)$$

$$\text{geschlossener Regelkreis } G(s) = \frac{G_0(s)}{G_0(s) + 1} \quad (2.14)$$

Zur Erfüllung der hier gestellten Regelungsaufgabe, welche in Kapitel 1 erläutert wurde, gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Ansätzen. Die am häufigsten verwendeten Regler sind P- und I-Regler oder eine Kombination der zuvor genannten. [Lun14].

Proportionalregler (P-Regler)

Der P-Regler erzeugt eine Stellgröße $u(t)$, welche proportional der Regelabweichung $e(t)$ ist. Der P-Regler sorgt somit für eine proportionale Verstärkung K_P der Regelabweichung $e(t)$ und besitzt damit folgende Übertragungsfunktion:

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = K_P \quad (2.15)$$

Der P-Regler hat den großen Vorteil, dass er ohne Verzögerung arbeitet [Lun14]. Allerdings kommt es immer zu einer bleibenden Regelabweichung, die mit steigendem K_P abnimmt. Darüber hinaus wird ab einer Ordnung größer zwei der Regelstrecke, ab bestimmten Verstärkungsfaktoren das System instabil, wodurch es die Wahl des Verstärkungsfaktors einschränkt.

Integralregler (I-Regler)

Ein I-Regler integriert die Regelabweichung $e(t)$ auf und verstärkt das Ergebnis durch einen Faktor K_I . Dabei kommt es zu einer Verzögerung, die sich in der Nachstellzeit $T_N = 1/K_I$ widerspiegelt. Der Vorteil ist, dass ein I-Regler keine

bleibende Regelabweichung hinterlässt. Die Übertragungsfunktion lässt sich wie folgt aufstellen:

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (2.16)$$

Die Stellgröße des I-Reglers steigt, je länger eine Regelabweichung ansteht. Der I-geregelte Kreis ist aber im Vergleich zu anderen Regelungen langsam und auf Grund seiner Trägheit wirkt sich dies negativ auf das dynamische Verhalten des gesamten Systems aus. Für kleine Werte von K_I , nähert sich die Regelgröße nur stark verzögert dem Sollwert an, wohingegen bei hohen Werten von K_I der Regelkreis eine schwach gedämpfte Schwingung beschreibt. Aus der Übertragungsfunktion ist nun ersichtlich, dass der Regelkreis für K_I -Werte des Reglers im stabilen Bereich die Führungs- und Störgrößen ausregelt. Der Regelkreis weist also ein Führungs- und Störverhalten auf.

Differenzierender Regler (D-Regler)

Ein D-Regler besitzt, wie der Name sagt, ein differenzierendes Übertragungsverhalten. Mit Hilfe eines Differentials kann in der Mathematik die Steigung einer Funktion bestimmt werden. Die Amplitude am Ausgang ist von der Änderungsgeschwindigkeit am Eingang abhängig und kann mit folgender Übertragungsfunktion beschrieben werden:

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = K_D \cdot s \quad (2.17)$$

Es entsteht also am Ausgang eine Größe, welche der Änderungsgeschwindigkeit am Eingang entspricht. Reine D-Regler sind in der Praxis nicht brauchbar, da sie auf eine konstante Regelabweichung aus gegebenen Gründen nicht reagieren können. Sie werden daher immer nur in Verbindung mit P oder PI-Reglern verwendet. Der Vorteil des D-Reglers liegt im positiven Phasenbeitrag, welcher die Stabilität verbessert und die Regelgüte der anderen Parameter verbessert. Allerdings ist darauf zu achten, nicht zu hohe Werte zu wählen, da dies zu einer

übermäßigen Verstärkung führt und dies ein verstärktes Rauschen und Störungen nach sich zieht, was wiederum zu Instabilität führen kann.

Proportional integrierender Regler (PI-Regler)

Stellt man nun aus der Kombination beider Regler eine Parallelstruktur zusammen, lassen sich die Vorteile der einzelnen Regler ausnutzen. Die Übertragungsfunktion des kombinierten Reglers ergibt sich zu:

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (2.18)$$

Die Nachstellzeit T_N berechnet sich wie folgt:

$$T_N = \frac{K_P}{K_I} \quad (2.19)$$

Aufgrund des sofort wirkenden P-Gliedes regelt der PI-Regler schneller als der einfache I-Regler. Außerdem wird durch den I-Anteil die bleibende Regelabweichung des einzelnen P-Gliedes kompensiert. Der nun vorliegende Regler ist demnach ein schneller Regler, der keine bleibende Regelabweichung erzeugt.

Proportional differenzierender Regler (PD-Regler)

Der PD-Regler ergibt sich aus der Kombination eines P- und eines D-Reglers in einer Parallelstruktur und ist in dieser Kombination gerätetechnisch nicht realisierbar, da der Grad des Zählers der Übertragungsfunktion größer als der Grad des Nenners ist. Aus diesem Grund wird zumeist von einem idealen PD-Regler mit der folgenden Übertragungsfunktion gesprochen:

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = K_P + K_D \cdot s; \text{ Zählergrad} > \text{ Nennergrad} \quad (2.20)$$

Der D-Anteil differenziert die Änderung einer Regelabweichung und berechnet so deren Änderungsgeschwindigkeit. Diese Geschwindigkeit wird mit dem Faktor K_D multipliziert und zum P-Anteil addiert. Der PD-Regler reagiert damit

schon auf Ankündigungen von Veränderungen, dieses bewirkt sozusagen ein Vorhalten beim Regeln. Der PD-Regler weist gegenüber dem P-Regler ein eindeutig besseres Einschwingverhalten des Regelungssystems auf. Jedoch wird eine sprunghaft auftretende Störgröße nicht ausgeregelt.

Proportional integrierender differenzierender Regler (PID-Regler)

Heutzutage werden in der Industrie zu einem Großteil Standardregler eingesetzt, die entweder Übertragungsfunktionen bestehend aus P- und I-Gliedern beinhalten oder eine Parallelkombination aus P-, I- und D-Gliedern besitzen. Der PID-Regler ist dabei der gebräuchlichste und stellt die allgemeinste Form eines Standardregelkreises dar [Lun14]. Die Übertragungsfunktion kann wie folgt beschrieben werden:

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = K_P + K_D \cdot s + \frac{K_I}{s} \quad (2.21)$$

Die vom PID-Regler gebildete Stellgröße ergibt sich wie oben zu sehen aus der additiven Überlagerung der drei einzelnen Komponenten. Der P- Anteil funktioniert nach dem Prinzip „Je größer die Regelabweichung ist, umso größer muss die Stellgröße sein“ [Lun14]. Dies bedeutet, dass die Regelabweichung zwar schnell abgebaut werden kann, jedoch eine vollständige Elimination unmöglich ist. Der I-Anteil, der eine bleibende Regelabweichung bei sprungförmigen Führungs- und Stellsignalen verhindert, arbeitet nach der Regel „Solange eine Regelabweichung auftritt, muss die Stellgröße verändert werden.“ [Lun14]. Bei dem Fall $e = 0$ wird die Stellgröße nicht verändert, sodass der aktuelle Wert dieser Größe derjenige ist, mit dem die Störung kompensiert bzw. der vorgegebene Sollwert erreicht wird. Der D-Anteil arbeitet nach dem Prinzip „Je stärker sich die Regelabweichung verändert, umso stärker muss die Regelung eingreifen.“ [Lun14]. Das heißt über den D-Anteil reagiert der Regler bereits mit einer großen Stellgröße, wenn die Regelabweichung stark zunimmt, selbst wenn sie noch keine großen Werte angenommen hat.

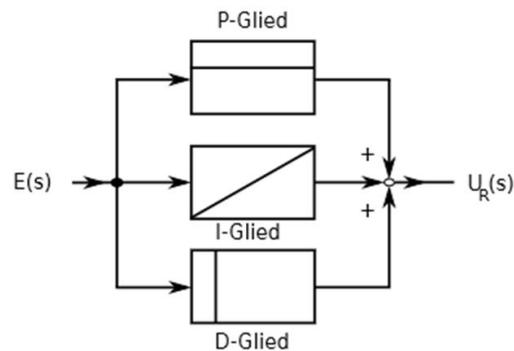


Abbildung 2.11: Blockdiagramm einer Übertragungsfunktion eines PID-Reglers [Ber01]

Vergleich der Reglertypen

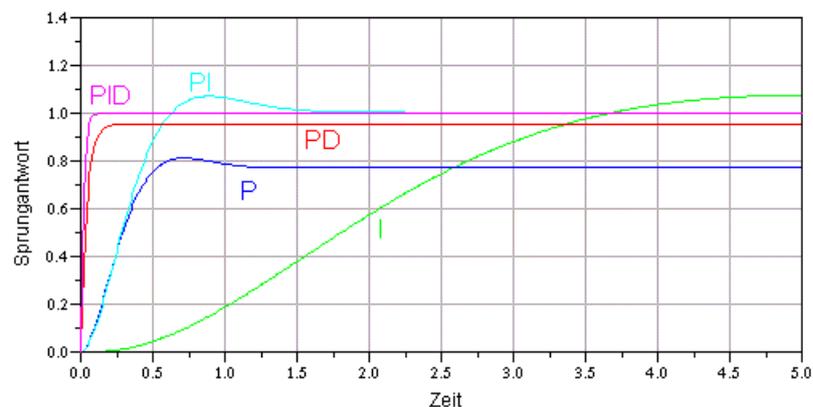


Abbildung 2.12: Vergleich der Reglertypen in einem Regelkreis [rw15]

Im Vergleich der Regler wird deutlich, dass Regler ohne I-Anteil (P und PD) eine bleibende Regelabweichung aufweisen. Erst Regler mit integrierenden I-Anteil können auf den Sollwert ausregeln. Nachteilig bei einem einzelnen I-Regler ist jedoch, dass die Regelung zumeist sehr lange dauert. Wie bereits erläutert wurde, ist der I-Regler dafür zuständig eine bleibende Regelabweichungen zu vermeiden. Die Gruppe der am schnellsten reagierenden Regler, sind solche mit einem

differenzierenden Anteil (PD und PID), sie werden daher meist verwendet, wenn eine schnelle Dynamik gefragt ist. Regler mit P-Anteil aber ohne einen D-Anteil (P und PI) sind bei der Ausregelung etwas langsamer. Wenn die bleibende Regelabweichung vernachlässigt werden kann oder die Regelstrecke schon einen I-Anteil besitzt, reicht auch oft schon ein reiner P-Regler aus.

Systemtypen

Es gibt eine Vielzahl von klassifizierten mathematischen Beschreibungen für Systeme, die gebräuchlichsten und für die hier vorliegende Arbeit relevanten werden im Folgenden kurz vorgestellt. Laut [Lun14] sind verzögerungsfreie Proportionalglieder, oder abgekürzt auch P-Glieder, dadurch gekennzeichnet, dass das Ausgangssignal zu jedem Zeitpunkt um einen Wert K verstärkten Eingangssignal entspricht. Die Übertragungsfunktion lautet demnach: $G(s)=K$. Ein PT_n Glied unterscheidet sich von einem P-Glied durch eine zusätzliche Verzögerung nter Ordnung. Die Übertragungsfunktion kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$G(s) = \frac{K}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (2.22)$$

Verzögerungsglieder erster Ordnung beschreiben exponentiell steigende bzw. sinkende Prozesse [Unb08].

$$G_{\{PT1\}}(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (2.23)$$

Die Zeitkonstante T wird dabei als die Zeit definiert, bis zu der der Ausgang nach einem Sprung auf den Eingang den stationären Endwert zu 63,2% ($1-1/e$) erreicht hat. Nach der Zeit $4T$ muss der stationäre Endwert zu 98,2% erreicht sein [Sch11].

$$G_{\{PT2\}}(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2dT \cdot s + 1} \quad (2.24)$$

In der Übertragungsfunktion der PT_2 Glieder ist ein Dämpfungsfaktor d vorhanden. Zu beachten ist, dass bei einer vorliegenden Dämpfung $d < 1$ sich die Übergangsfunktion nun auch periodisch dem stationären Endwert annähern kann. Es

weist also ein sogenanntes Einschwingverhalten auf, daher gibt das Erreichen von oben genannten 63,2% des stationären Endwerts keine genaue Auskunft über die Zeit bis zum Abklingen der Schwingung.

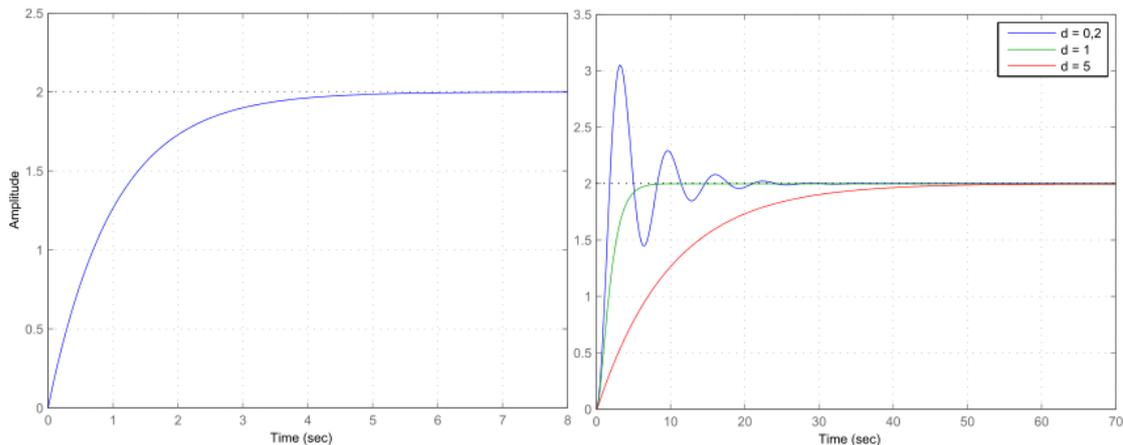


Abbildung 2.13: Übergangsfunktionen PT_1 (l) und PT_2 Glied (r)

Es ist möglich mit Hilfe der Dämpfung d die Zeit t_E zu bestimmen, zu der der Einschwingvorgang bis auf eine Abweichung von $\pm 2\%$ abgeschlossen ist [Str15]. Die Zeit t_E kann folgendermaßen bestimmt werden (für PT_1 mit $d=1$):

$$t_E = \frac{4T}{d} \quad (2.25)$$

Wichtig anzumerken ist, dass sowohl PT_1 als auch PT_2 Glieder immer asymptotisch stabil sind. Am einfachsten lässt sich das anhand der Ortskurve für beide Glieder zeigen.

Asymptotische Stabilität ist dadurch gekennzeichnet, dass der Punkt -1 auf der reellen Achse bei jedem Schnitt der Ortskurve links liegen gelassen wird. Da, wie leicht erkennbar, weder PT_1 noch PT_2 Glieder die negative reelle Achse schneiden, ist somit immer asymptotische Stabilität gegeben. Durch die Stabilität ist sichergestellt, dass die Sprungantwort sich nach genügend langer Zeit (t gegen unendlich) dem stationären Endwert asymptotisch nähert.

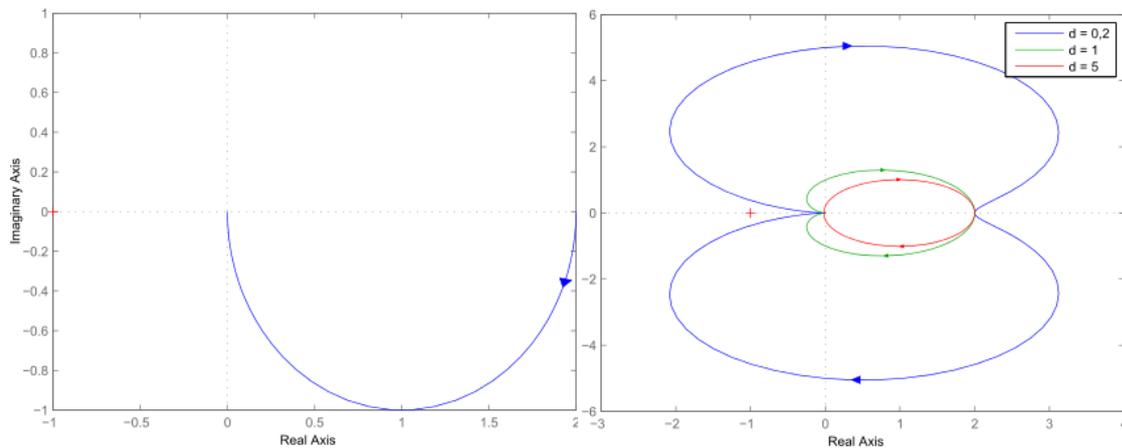


Abbildung 2.14: Ortskurve PT_1 (l) und PT_2 Glied (r)

Vermaschte Regelkreise und Mehrgrößensysteme

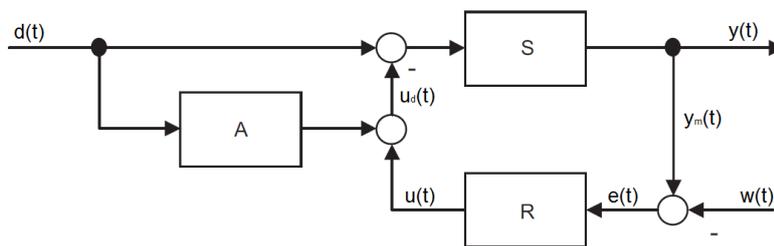


Abbildung 2.15: Störgrößenaufschaltung auf die Stellgröße [Pie15]

Einschleifige Regelkreise lassen sich durch das Aufschalten zusätzlicher Signalpfade/Hilfsgrößen deutlich verbessern. Der Einfluss von Störgrößen ist z.T. so massiv und volatil, dass diese über geeignete Teilregelkreise minimiert und konstant gehalten werden können [Pie15]. Darüber hinaus ist eine weitere Möglichkeit die Störgrößenaufschaltung, bei der eine von den Störgrößen abgeleitete Änderung der Stellgröße die Störung im Idealfall kompensiert. Die Störgrößenaufschaltung ist in nachfolgender Abbildung 2.15 dargestellt und wird im Kapitel 7.2.4 weiter behandelt. Über unterstützende Größen, wie die Hilfsstellgröße oder

die Hilfsregelgröße, ist es möglich den Regelkreis weiter zu optimieren. So kann in einen Unterregelkreis mit günstigeren dynamischen Eigenschaften der Hilfsregler schneller als der Hauptregler arbeiten. Schlussendlich kann dies so verfeinert werden, dass der Hauptregler die Führungsgröße des Hilfsreglers erzeugt. Diese Vereinfachung wird Kaskadenregelung genannt [Pie15].

Systeme lassen sich oft nicht mit einer Regelgröße beschreiben. Mehrgrößensysteme sollen helfen, das Potenzieren von Störgrößen paralleler Regelsysteme zu verringern. Diese treten auf, wenn z.B. die Änderung einer Führungsgröße des einen Regelkreises als Störgröße des zweiten Regelkreises wahrgenommen wird. Der Einfachheit halber werden Mehrgrößensysteme in der Praxis oft vermieden [Pie15]. Mithilfe der Erfassung von großen Datenmengen, bzw. über die Bildung eines genaueren Verständnisses des Regelsystems (ähnl. wie in Industrie 4.0) wird die Beschreibung der Systeme deutlich verbessert und ggfs. die Anwendung von Mehrgrößensystemen stark vereinfacht.

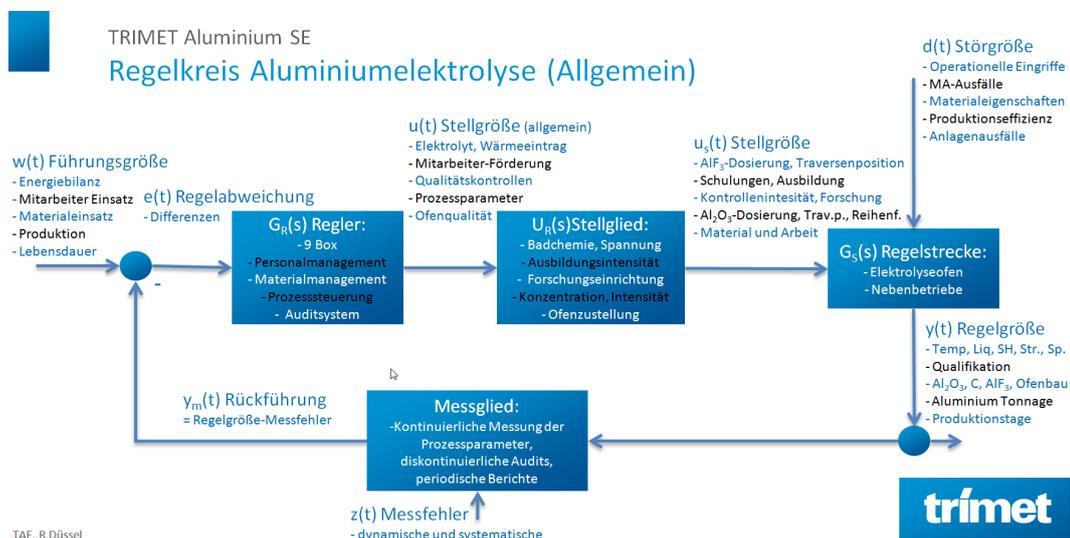


Abbildung 2.16: Regelkreis des Elektrolyseofens

Es gibt noch eine Vielzahl weiterer mathematischer Beschreibungen für Teilsysteme und theoretisch kann mit genügend großer Kenntnis, des zugrunde liegen-

den Systems jedes System durch eine Zusammenschaltung verschiedener Teilsysteme beschrieben werden. Mit jedem weiteren hinzugefügten Teilsystem steigt jedoch der Komplexitätsgrad immens. Die Wissenschaft der Systemidentifikation beschäftigt sich mit Hilfe verschiedener Methoden eben jener Systembeschreibung. Leider ist eine exakte mathematische Beschreibung eines realen Systems oft nur sehr schwer oder gar nicht möglich, weshalb mit Schätzungen gearbeitet wird. Oftmals kann ein auf den ersten Blick extrem komplexes System hinreichend gut mit einfachen Teilsystemen beschrieben werden, solange es sich in einem kleinen abgegrenzten Arbeitsbereich befindet. Wird dieser Sachverhalt nun auf die Aluminiumgewinnung übertragen, so wird ersichtlich, dass auch hier der betrachtete Arbeitsbereich aufgrund seiner Komplexität sehr kompakt gehalten ist. Der Herstellungsprozess selbst ist einfach zu beschreiben. Die Verbindungen der Teilprozesse und Parameter untereinander zur Erreichung eines optimalen Betriebspunktes zu beschreiben ist jedoch äußerst kompliziert und umfangreich. In Kapitel 7 wird näher auf die Wahl und Beschreibung des Systems und Reglers eingegangen. Eine Übersicht der Parameter ist in Abbildung 2.16 gegeben.

2.2.2 Regelungsgrundsatz

Ziel jeder wirtschaftlichen Produktion ist es, mit möglichst wenig Aufwand viel zu erreichen. Dieser Grundsatz gilt auch für die Regelung der Aluminiumproduktion. Die Regelung soll so eingestellt werden, dass Rohstoffeinsatz, Energieverbrauch, Wertminderung und Arbeitspraxis möglichst im Optimum gehalten werden. Dabei spielt die Regelung der Wärmebilanz des Ofens eine übergeordnete Rolle, da sie Einfluss auf alle genannten Größen nimmt.

Obwohl an allen Elektrolyseöfen einer Ofenhalle die gleiche Stromstärke anliegt und sie ähnlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind, ist es unumgänglich jeden Ofen einzeln zu regeln. Die verschiedenen prozesstechnischen und operationellen Eingriffe (beschrieben in den folgenden Kapiteln) stören den Prozess des einzelnen Ofens immens und erzeugen Abweichungen der Regelgrößen. Hinzu kommt, dass die Öfen auf die meisten Störgrößen nicht direkt reagieren

sondern ein dynamisches Verhalten besitzen. Jedoch haben alle Eingriffe einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Wärmebilanz des Ofens, die es zu regeln gilt. In den nachfolgenden Kapiteln wird beschrieben welche grundlegenden Regelungen in allen Elektrolysezellen weltweit eingesetzt werden. Dabei sind die Hauptkriterien [GK93]:

- Das Prozessfenster so wählen, dass die Ofenparameter nah am Optimum liegen.
- Den Effekt manueller Eingriffe in die Regelung integrieren (Anodenwechsel, Schöpfen)
- Kontrolle der Stellgrößen, die sofortigen Einfluss haben (ACD, Al_2O_3 , AlF_3)
- Präventive und störungsbedingte Reaktion auf Anomalien (Anodeneffekt (AE), Unruhe, Schlamm Bildung)

Ein perfekt geregelter Aluminiumelektrolyseprozess läuft bei einer konstanten Temperatur, einem konstanten Anoden-Kathoden-Abstand (ACD) und einer konstanten chemischen Zusammensetzung ab [TFH⁺01]. Eine Berechnung des ACD's über die kontinuierlich aufgenommene Ofenspannung ist theoretisch möglich, jedoch können Temperatur und chemische Zusammensetzung des Elektrolyten nicht kontinuierlich überwacht werden. Der Elektrolyt würde die Sensoren in kürzester Zeit zerstören. Somit bleibt dem Kontrollsystem lediglich die Stromstärke und Spannung als direktes Kontrollsignal. Dabei wird zur Regelung der Ofenwiderstand, berechnet aus Spannung und Stromstärke, genutzt, da dieser ein Signal frei von kleinen Stromstärkeschwankungen liefert. Ein oder zwei Öfen werden dabei von einer Process Control Unit (PCU) geregelt, welche die Signale aufnimmt. Zur Regelung nutzt die PCU nicht nur das Signal, sondern ebenfalls die erste und zweite Ableitung des Wertes nach der Zeit. So können die Abhängigkeiten von thermischen und chemischen Einflüssen auf den Widerstand differenziert werden [THH07].

Widerstandsregelung

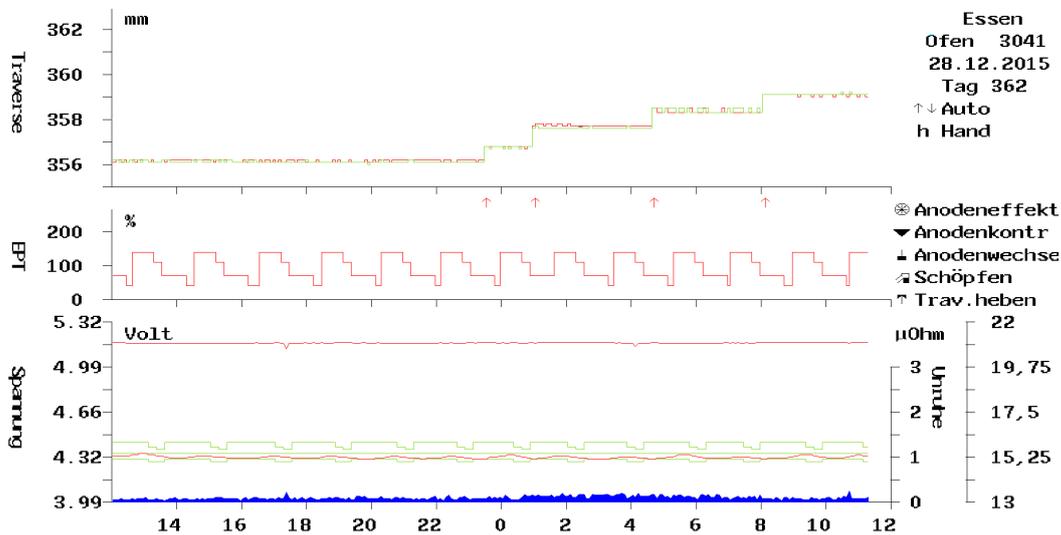


Abbildung 2.17: Ansicht des Reflection Prozesskontrollsystems

Aufgrund seiner geometrischen und materiellen Gegebenheiten ist jeder Elektrolyseofen für einen gewissen Wärmeverlust ausgelegt und somit bedarf es auch eines notwendigen Energieeinsatzes. Dieser muss so gewählt werden, dass die Temperatur im optimalen Prozessfenster liegt. Dabei sollte die Elektrolyttemperatur so tief wie möglich gehalten werden, um energieeffizient zu produzieren, gerade so weit über der Liquidustemperatur liegen, dass Tonerde optimal gelöst werden kann und so nah an der Liquidustemperatur, dass eine ausreichende Randkruste entsteht, die den Ofen schützt. Aus diesem Grund wird eine für den Ofen angepasste Prozess Setpoint Spannung (PSP) vorgegeben, die nach dem Ohmschen Gesetz den zu regelnden Widerstand wiedergibt. Zur Vermeidung von zu vielen Traversenbewegungen wird um den Widerstand ein Prozessfenster (grüne Linien in der Spannungsebene) gelegt, in dem die Widerstandsregelung den Widerstand des Ofens (untere rote Linie innerhalb der Spannungsebene) halten soll. Die genannten Graphen der Abbildung 2.17 beziehen sich auf die äußerste rechte Achse und liegen bei ca. $15,5\mu\Omega$. Läuft der Widerstand aus dem Pro-

zessfenster (ca. 0 Uhr und folgende Zeiten), so wird die Traverse (grüne und rote Linie der Traversenebene) angehoben, um den ACD zu vergrößern (hier um ca. 1mm). Bei dieser Regelung werden Mittelwerte des Widerstands über einen Zeitraum von 2-8 Minuten (5min in Essen) gebildet und nach diesen geregelt. Für hochfrequente Widerstandsveränderungen ist die Unruhekontrolle (Kapitel 3.3.2) zuständig. Bei Überschreitung von Grenzwerten für bestimmte Zeiten gibt es weitere Regelmechanismen. Wird z.B. eine Spannung von 8V für 3 Sekunden überschritten, so unterliegt der Ofen einem Anodeneffekt. Das heißt, der Aluminiumoxidgehalt im Elektrolyt ist abgefallen und die Kompensationsüberspannung der Anode rapide angestiegen. Es bilden sich mehr und mehr Gasblasen unter der Anode und verhindern ein Benetzen der Anode mit Elektrolyt. Der Widerstand steigt weiter und das entweichende Gas ist nun fast ausschließlich CO mit einem steigenden Anteil an CF_4 [GK93]. Die Ofenkontrolle reagiert mit einer massiven Aluminiumoxidfütterung zur Anhebung der Konzentration sowie mit dem pumpartigen Absenken der Traverse zur Beseitigung der Gasblasen um die Anode. Weitere Widerstandsregelungen wie die Aluminiumoxidregelung und Anpassungen an manuelle Eingriffe werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Aluminiumoxidregelung

Aufgrund der direkten Abhängigkeit des Aluminiumoxidgehalts im Elektrolyten und der elektrischen Spannung über den Elektrolyten (Abbildung 2.5), wird die Aluminiumoxidzugabe anhand der Ofenspannung geregelt. Die Regelung ist jedoch nicht trivial, da die Spannung bei Verlassen des optimalen Bereichs der Konzentration mit Zunahme und Abnahme der Aluminiumoxidkonzentration zunimmt. Aus diesem Grund wird die Aluminiumoxidzugabe in mind. 2 Phasen betrieben. Aus einer zeitlich fest bestimmten Überfütterungsphase (z.B. 140% der benötigten Menge pro Zeiteinheit) wird in eine Unterfütterungsphase (z.B. 70%) übergeleitet, so lange, bis die Spannung des Ofens wieder ansteigt. Die Zeit der Überfütterungsphase wurde vorher so bestimmt, dass die Konzentration mit Ende der Phase in jedem Fall über der der Spannungsminimum-Konzentration liegt.

Dieses Verfahren kann mit weiteren Zwischenphasen so optimiert werden, dass sich der Prozess möglichst im Optimum befindet.

Manuelle Eingriffe

Alle weiteren Prozessparameter werden in der Aluminiumelektrolyse manuell geregelt. Ziel ist es, die beiden vorher genannten Regelungen so wenig wie möglich durch die manuellen Eingriffe zu beeinflussen. Die Eingriffe sind:

- **Anodenwechsel:** Der Anodenwechsel ist der größte thermische Eingriff in die Energiebilanz eines Elektrolyseofens [Wel01]. Zuerst werden eine oder zwei heiße Anodenreste inklusive Zapfen, Joch und Anodenstange aus dem Ofen entfernt. Danach wird heißes, in den Ofen gefallenes, Eindeckmaterial und Randkruste aus dem Ofen gebaggert. Zuletzt wird eine oder zwei neue Anoden, mit Umgebungstemperatur in den Ofen gesetzt und diese 2-8 Stunden später mit Eindeckmaterial abgedeckt. Der Elektrolyt rings um die neuen Anoden erstarrt und es kommt zu einem Ungleichgewicht der Stromverteilung im Ofen und einem Anstieg des AlF_3 -Gehalts aufgrund des reduzierten flüssigen Elektrolytvolumens. Ohne die zusätzliche Energie, die dem Ofen durch einen erhöhten ACD gegeben wird, würde die Temperatur im Ofen abfallen. Die Reihenfolge des Anodenwechsels ist dabei maßgeblich für eine gute Temperaturverteilung und Stromausbeute [Iff07]. Bei der TRIMET in Essen werden nach dem Anodenwechselplan (Anhang Abbildung .18) alle zwei Tage ein bis zwei Anoden gewechselt. Das Eindeckmaterial spielt dabei eine wichtige Rolle in der Wärmebilanz. Durch Stärke, Zusammensetzung und Korngrößenverteilung kann der Wärmeverlust beeinflusst werden.
- **Saugen:** Das produzierte Aluminium setzt sich auf der Kathode des Ofens ab und wird alle 1 bis 2 Tage abgesaugt. Dabei ist das Intervall versetzt zu dem des Anodenwechsels, so dass sich die Störeffekte der Änderungen nicht aufschaukeln. Obwohl die Menge des entnommenen Aluminiums nur ein Bruchteil der Ofenmasse ist, hat die Veränderung massiven Einfluss auf

die Wärmeverluste. Das flüssige Aluminium ist ein guter Wärmeleiter und trägt die Energie sehr gut über die Seitenwände ab. Bei kleinerem Volumen verringert sich die Übertragungsfläche und der Ofen heizt sich zunehmend auf.

- **Temperaturmessung:** Die Temperaturmessung mit dem Fiberlab-System (siehe Anhang Abbildung .3) hat deutlich weniger Einfluss auf die Produktion. Durch das geöffnete Loch in der Kruste wird ein Fiberdraht in das Elektrolyt gehalten und nach Messung der Temperatur wird eine Probe des Elektrolyts entnommen. Über den Fiberdraht in der Probe wird die Temperatur kontinuierlich weiter gemessen und über einer Zeitachse dargestellt (siehe Anhang Abbildung .4). Durch das Freiwerden von Energie beim Phasenübergang von flüssig nach fest ändert sich die Steigung der Abkühlkurve kurzzeitig. So können innerhalb weniger Sekunden Temperatur, Liquidustempertur und Superheat bestimmt werden. Verfolgt man die Abkühlkurve über 3 Minuten, so können über zwei weitere Steigungsänderungen AlF_3 und Al_2O_3 Gehalt bestimmt werden. Das geöffnete Loch in der Kruste wächst abhängig vom Superheat innerhalb 10-60 Minuten wieder zu.
- **Traverseheben:** Kurz bevor der Anodenbaum seine minimale Position erreicht hat und eine Verringerung des ACD's nicht mehr möglich ist, wird dieser mithilfe einer Traverse wieder angehoben (siehe Anhang Abbildung .2). Die Traverse wird auf dem Ofen abgesetzt und hält alle Anoden fest, während der Anodenbaum etwas unter die höchste Position fährt. Durch Abrutschen einer Anode oder einer nicht richtigen Verbindung von Anodenstange und Anodenbaum nach dem Traverseheben, kann es zu einer ungleichmäßigen Stromverteilung oder sogar zu einem Kurzschluss kommen. Spannungsschwankungen werden durch die Unruhekontrolle (Kapitel 3.3.2) erkannt und der Defekt manuell beseitigt.

Um den manuellen Eingriffen entgegen zu wirken, gibt es verschiedene Maßnahmen, diese zu kompensieren. Die meisten Maßnahmen werden manuell durch

einen Mitarbeiter eingeleitet. So wird beispielsweise mit Start des Anodenwechsels und des Eindeckens die Aluminiumoxidzugabe für einen Zeitraum gedrosselt oder ganz ausgestellt, da bereits Aluminiumoxid der Eindeckung während des Wechsels in den Ofen fällt. In Abbildung 2.18 ist zu erkennen, dass kurz vor 20 Uhr die Aluminiumoxid dosierung (rote Linie der EPT-Ebene) auf 0% gestellt wird. Des Weiteren wird der Sollwert zusammen mit der oberen und unteren Grenze der Widerstandsregelung angehoben (grüne Linien der Spannungsebene) um mehr Energie in den Ofen zu geben, damit die neu gesetzten Anoden aufgeheizt werden können. Für das Traverseheben und Saugen muss die Widerstandsregelung ausgesetzt werden. So wird beispielsweise beim Saugen der Anodenbaum so verfahren, dass der ACD konstant oder anders ausgedrückt der Widerstand im Prozessfenster bleibt (siehe sechs Uhr Traversen-Ebene).

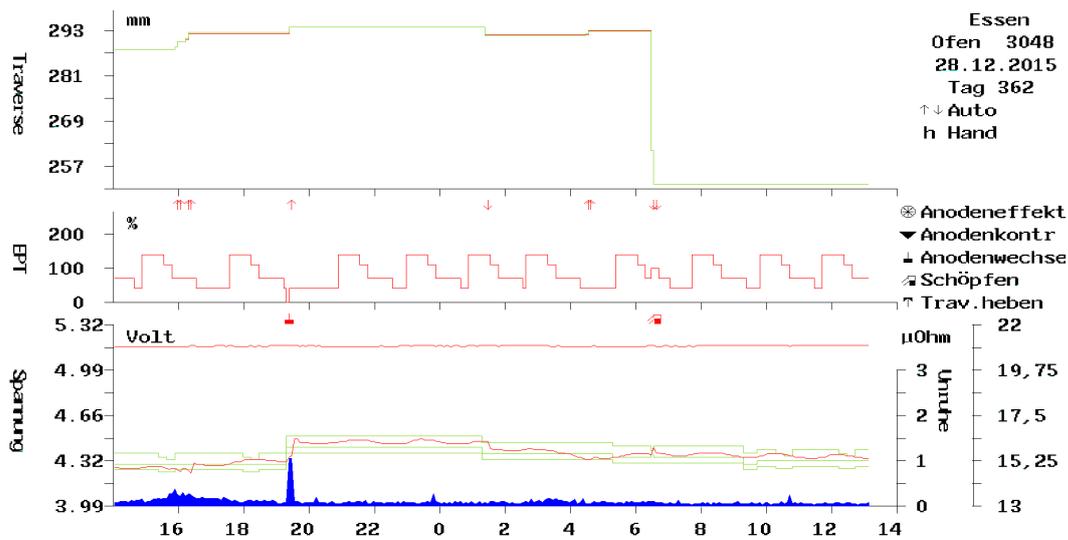


Abbildung 2.18: Ansicht des Reflection Prozesskontrollsystems inkl. AW

2.2.3 Regelungskonzepte

Die für Messsensorik kritischen Umgebungsbedingungen machen es schwierig den Prozess durchgehend zu überwachen. Lediglich Hallenstromstärke und -spannung sowie Ofenspannungen werden kontinuierlich gemessen. Es existieren

jedoch viele weitere chemische und thermische Größen, die für die Regelung des Ofens äußerst wichtig sind und mit deren Kenntnis die Energie- und Massenbilanz effizienter geregelt werden können.

9 Box Algorithmus

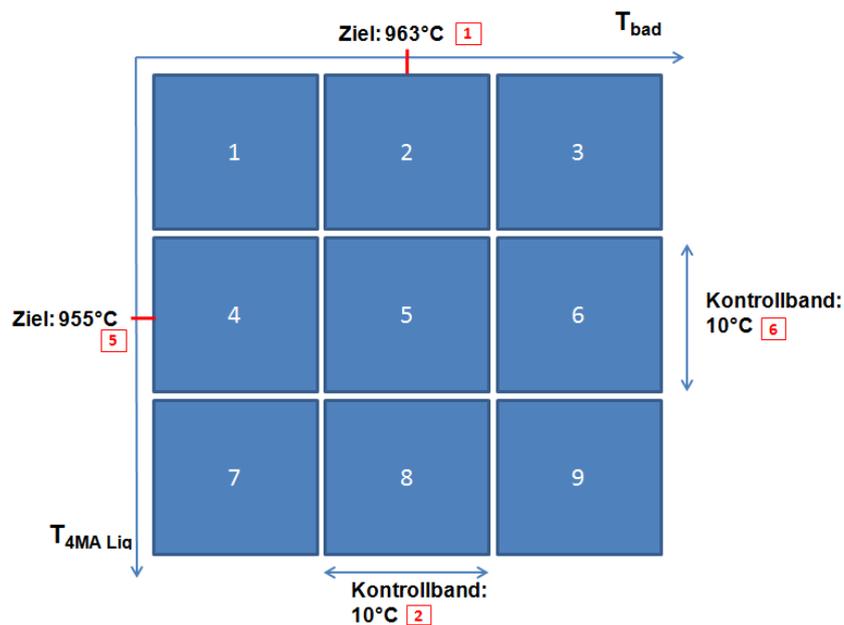


Abbildung 2.19: 9Box-Regelungskonzept

Die TRIMET hat 2003 zusammen mit HERAEUS Elektro-Nite ein neues Regelungskonzept eingeführt. Mithilfe eines neuen Messgeräts wurden Temperatur und Liquidustemperatur des Elektrolyts innerhalb 6 Minuten bestimmt. So konnte innerhalb kürzester Zeit auf den aktuellen thermischen und chemischen Zustand des Elektrolyseofens, mittels eines 9-Box-Konzeptes, reagiert werden. Die grundlegende Strategie des Konzeptes ist es, den Ofen in einem Koordinatensystem in 9 Regelzonen einzuteilen. Dabei wird die Ziel-Temperatur (aktuell 963°C) auf der einen Achse und die Ziel-Liquidustemperatur (aktuell 955°C) auf der anderen Achse eingetragen (Abbildung 2.19). Um beide Temperaturen

wird ein Regelbereich (aktuell $\pm 5^\circ\text{C}$) eingetragen, dessen 4 Schnittpunkte das Rechteck der Zielbox 5 bilden. In allen anderen Boxen (1-4 und 6-9) gibt es unterschiedliche Aktionen, die den thermischen und chemischen Zustand des Ofens wieder in Box 5 bringen sollen [Dü15a]. Eine grundlegende Regelgröße ist dabei der Superheat, die Differenz von Temperatur und Liquidustemperatur.

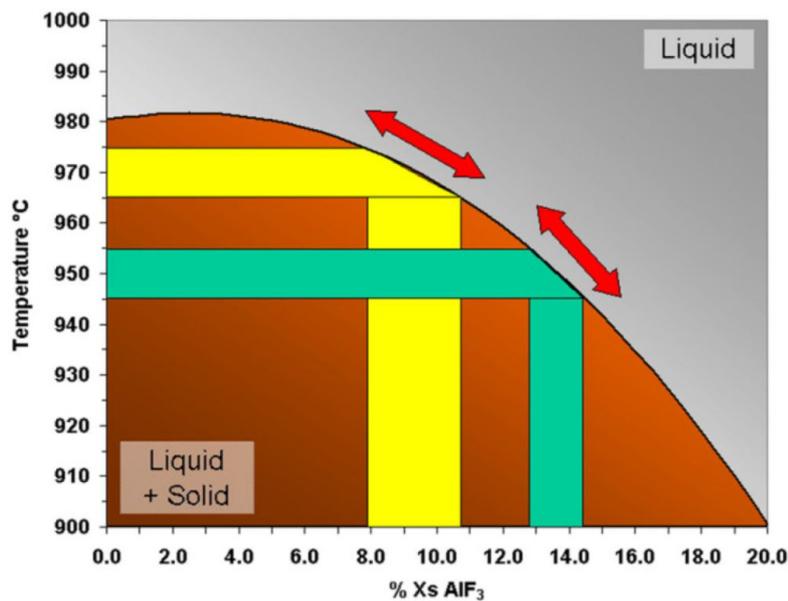


Abbildung 2.20: Phasendiagramm $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3$ (mit 2,5% Al_2O_3 und 4,5% CaF_2)

Das Ziel des 9-Box-Regelalgorithmus ist die Variation von Temperatur, Liquidustemperatur und Superheat über alle Öfen zu minimieren und den Ofen bei einer exakten Betriebstemperatur mit möglichst niedrigem Superheat zu betreiben [Iff07]. Durch die Senkung der Liquidustemperatur konnte die Stromausbeute verbessert werden, da mithilfe einer höheren AlF_3 -Konzentration die Aluminiumlöslichkeit im Elektrolyt verschlechtert wurde. Des Weiteren konnten durch eine niedrigere Badtemperatur und einen niedrigeren Superheat die Wärmeverluste und vor allem der Energieverbrauch gesenkt werden [GK93], [Kva98] und [TFH⁺01]. Im Phasendiagramm in Abbildung 2.20 ist zu erkennen, dass der neue Betriebsbereich (grün) anfälliger gegenüber chemischen Veränderungen ist, da

die Temperaturkurve steiler ist. Des Weiteren hat der Elektrolyt mit höherem AlF_3 -Gehalt eine schlechtere Lösungsfähigkeit für Aluminiumoxid. Aus diesem Grund wurde eine Bodenspannungsmessung eingeführt, mit welcher eine Tonerdeschlamm-bildung auf der Kathode erkannt wird. Übermäßiger Schlamm kann unter anderem zu einer ungleichen kathodischen Stromverteilung führen und somit den Ofen (besonders die Spannung und Temperatur) schwanken lassen [RIW⁺03].

Die Aktionen der Steuerung sind in 2 Kategorien einzuordnen. Die Spannung des Ofens wird entsprechend der Abweichung von der Temperatur des Ofens angepasst (Siehe Anhang Abbildung .22 und .23, [Dü15a]). Dabei dient der Superheat als zusätzliche Regelgröße zur Verhinderung der Beschädigung der Ofenwand. Nach Veröffentlichung, [Dre97], [VW98], der Verwendung der Spannung als Stellgröße mithilfe des Superheats, ist diese Vorgehensweise weltweiter Standard. Der zweite Schritt ist die Änderung der AlF_3 -Zugabe anhand des 4 Tage gleitenden Durchschnitts der Liquidustemperatur (Siehe Anhang Abbildung .24 bis .28, [Dü15a]). Ziel dieser Regelung ist es die Liquidustemperaturänderung, durch Verunreinigungen (Na_2O) in der Tonerde, zu kompensieren (siehe Gleichung 2.11 und 2.12). Dabei ist der gleitende Durchschnitt hilfreich, um kurzfristige Änderungen auszugleichen. Diese können auftreten durch thermische oder manuelle Änderungen, wie das Anodenwechseln, die eine chemische Änderung aufgrund von Aufschmelzen oder Erstarren der Randkruste, welche einen niedrigeren AlF_3 -Gehalt besitzt [LT91], verursachen.

3 Der Elektrolyseofen

Zur Nutzung eines Elektrolyseofens als virtuelle Batterie ist es essentiell seine thermischen, Massen- und Energieströme zu kennen. In diesem Kapitel werden diese drei Bereiche beschrieben und ihre Messgrößen anhand eines Ofens der TRIMET Aluminium SE in Essen untersucht.

3.1 Massenbilanz

Allgemein gilt für die Massen- und Wärmebilanz Gleichung 3.1. Diese lässt sich über einen sehr langen Zeitraum als $\Delta m = 0$ vereinfachen, da der Ofen im Gleichgewicht gehalten werden soll. Dennoch verändern sich Masse und Massenverteilung der einzelnen Elemente ständig.

$$\Delta m = m_{rein} - m_{raus} \tag{3.1}$$

Element oder Verbund	Bereich Masse %	Typisch Masse %
Na_3AlF_6	75-85	79,4
$exAlF_3$	6-14	10,5
CaF_2	5,2-6,1	5,7
Al_2O_3	1,5-6	3,1
MgF_2	0,2-0,5	0,4
KF	0,2-0,5	0,4
C	0-0,6	0,2
weitere	0,2-1	0,3

Tabelle 3.1: Elektrolytzusammensetzung der TAE

Einige Massenveränderungen sind bekannt; wie die Masse der Anoden die kontinuierlich abnimmt und in einem zwei Tages Rhythmus aufgestockt wird oder die Masse der Ofenausmauerung, die bis zu ihrer Sättigung mit Natrium zunimmt. Lediglich die Elektrolytmasse ist während des gesamten Prozesses schwierig zu bestimmen. Dies soll in folgendem Kapitel näher erläutert werden. In Tabelle 3.1 ist die mittlere Elektrolytzusammensetzung der Öfen in Essen dargestellt.

3.1.1 Elektrolytbilanz

Bislang existieren nur begrenzt Studien über die Massenbilanz des flüssigen Elektrolyten eines Aluminiumelektrolyseofens. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Differenz der Elektrolyt-Temperatur und Liquidustemperatur (der Superheat) die Hauptursache der Variation der Menge des flüssigen Elektrolyts ist [Iff07]. Nach Gleichung 4.12 ist die Stärke der Seitenwand abhängig von der Menge der Wärmeübertragung durch Konvektion vom Elektrolyten. Dabei wirkt die Seitenwand wie ein thermischer Puffer, der Änderungen der transportierten Wärmemenge durch Schmelzen oder Erstarren ermöglicht. Laut B. Welch betragen diese Änderungen in etwa 35 kWh/cm Phasenänderung [Wel98]. Auch Elektrolyt-Inhaltsbestimmungen, mittels Strontium Zugabe, haben gezeigt, dass das flüssige Elektrolytvolumen um 20% variiert [Iff07], diese Variation aber mittels des Superheat erklärt werden kann. Durch Auswertung der Messergebnisse und Aufnahmen von neuen Elektrolytständen und Inhalten in Zusammenhang mit dem Superheat konnte eine Beziehung von Masse, Superheat und Elektrolythöhe hergestellt werden. Die nachfolgende Gleichung gilt jedoch nur im modulationsfreien Betrieb. Wie sich die Modulation auf den Elektrolyten auswirkt, wird näher in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

$$m_{fl.Elek.} = \left(0,3 \frac{t}{cm} \cdot h_{Elek.} - 1,5t \right) \cdot SH_{korr.}$$

$$SH_{korr.} = \begin{cases} 0,8 + \frac{SH}{40} & \text{für } SH \geq 8 \\ 1,2 - \frac{1,6}{SH} & \text{für } SH < 8 \end{cases}$$

(3.2)

3.1.2 AlF_3 Bilanz

Die Massenbilanz der AlF_3 -Menge im Elektrolyten wird maßgeblich durch folgende Veränderungen bestimmt.

- (a) Aufschmelzen, Erstarren oder Lösen von Randkruste, Eindeckung oder Bodenschlamm
- (b) Verunreinigungen der Tonerde, beschrieben in Gleichung 2.11 und 2.12
- (c) Verluste von Natrium in die Kathode
- (d) Verlust von Fluorwasserstoff über die Abgase
- (e) Rückführung von Fluor mittels angereicherter Tonerde
- (f) Manuelle Eingriffe wie das Anodenwechseln oder Schöpfen

Ein Berechnung (siehe Anhang .6 und Tabelle 3.2) für den EPT14 Ofen zeigt wie die AlF_3 -Masse sich dabei verändert:

Ursache	AlF_3 Änderung in $\frac{kg}{Tag}$
(a)	über langen Zeitraum keine Änderung
(b)	-15,0
(c)	+6,7
(d)	-38,2
(e)	+38,2 (30,6 im Mittel, da 72 FT-Öfen)
(f)	vernachlässigt da minimal
Summe	-8,3 AT und -46,5 FT

Tabelle 3.2: AlF_3 Massenbilanz

Die berechneten Werte spiegeln sehr gut den Wert eines Ofens wider, der über längere Zeit im Optimum läuft, also ohne eine starke Veränderung der Chemie, durch Änderung der Seitenkruste (siehe Abbildung 3.1 und 3.2).

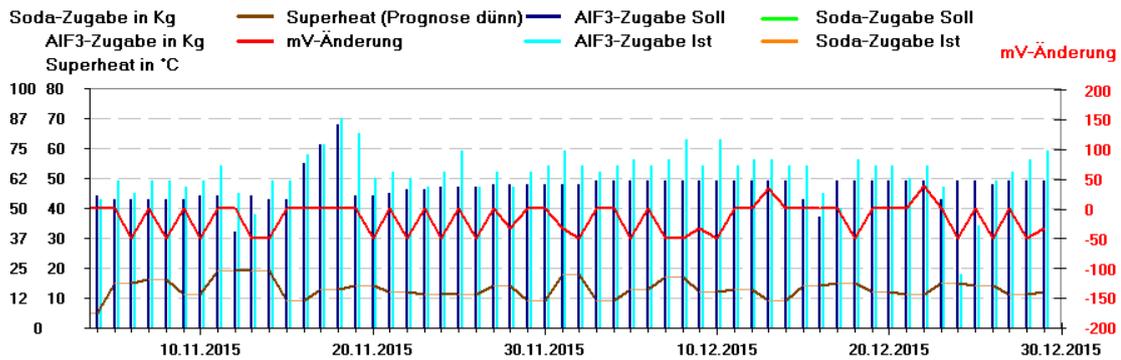


Abbildung 3.1: AlF_3 -Zugabe Grafik des FT Ofens 1039

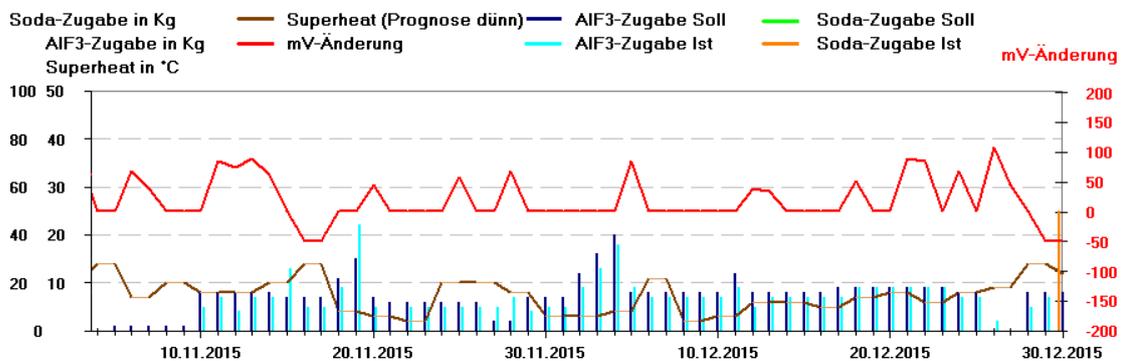


Abbildung 3.2: AlF_3 -Zugabe Grafik des AT Ofens 1109 mit MK

Eine Veränderung nach Punkt a) hat massiven Einfluss auf die AlF_3 -Bilanz und wird zu einem Kontrollverlust des Ofens führen. Das zeigt ebenfalls eindeutig der unterschiedliche Massenanteil von AlF_3 in den einzelnen Komponenten [Wei98]. Dieses Verhalten während der Modulation wird in Kapitel 5 untersucht.

Material	ex AlF_3 %	CaF_2 %	Al_2O_3 %	Na_3AlF_6 %	T_{Liq} °C
Seitenkruste	0,5-6	3-5	1-3	87-95	980-990
Bodenschlamm	1-5	1,6-3,5	35-60	40-60	950-964
Eindeckung	6-12	2-4	30-50	30-48	730-950

Tabelle 3.3: Massenanteil von AlF_3 in festem Elektrolyt

3.2 Wärmebilanz

Die Wärmebilanz spielt für die Modulation eine große Rolle. Auch hier soll bei der Bilanz über einen langen Zeitraum $\Delta\dot{Q} = 0$ in nachfolgender Gleichung gelten. Dabei ist der Zeitraum bestimmt durch die Möglichkeit ein verändertes \dot{Q}_{rein} mit Hilfe von \dot{Q}_{raus} und $\dot{Q}_{Enthalpieänderung}$ auszugleichen.

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_{rein} - \dot{Q}_{raus} - \dot{Q}_{Produktion} + \dot{Q}_{Enthalpieänderung} \quad (3.3)$$

M. Taylor [Tay12] hat diesen Vorgang, unter der Voraussetzung, dass Randkruste für eine Phasenumwandlung vorhanden ist, grafisch wie folgt dargestellt:

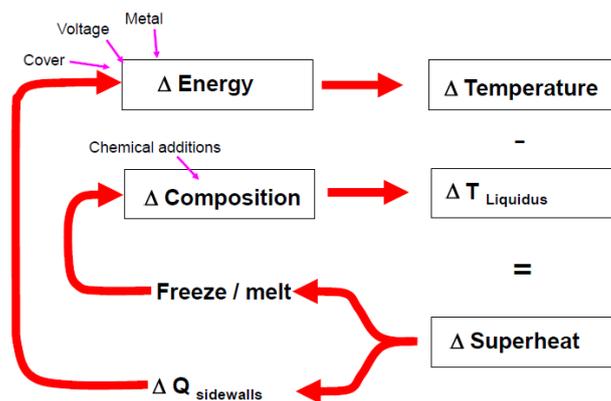


Abbildung 3.3: Wärmebilanz-Ausgleich nach M. Taylor

Die gesamte Leistung, die in den Ofen eingespeist wird, ist leicht zu bestimmen. Sie lässt sich beschreiben als:

$$\dot{Q}_{rein} = (U_{Ofen} - R_{Externe} \cdot I) \cdot I \quad (3.4)$$

Zur Ermittlung der Wärmeströme müssen nun die in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Leistungen für Produktion und Enthalpieänderung subtrahiert werden. Unter der Annahme $\Delta\dot{Q} = 0$ und einem stabilen Prozess mit $\dot{Q}_{Enthalpieänderung} = 0$ gilt:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{raus}} &= \dot{Q}_{\text{rein}} - \dot{Q}_{\text{Produktion}} \\ &= (U_{\text{Ofen}} - R_{\text{Externe}} \cdot I) \cdot I - [E_{\text{rev}} + \eta_{\text{CC}} + \eta_{\text{AA}} + \eta_{\text{AC}}] \cdot I - \dot{Q}_{\text{Al}_2\text{O}_3}\end{aligned}\quad (3.5)$$

Mithilfe von Gleichung 2.8 und dem von Welch [Wel01] bestimmten Faktor für das Erwärmen und Auflösen von Aluminiumoxid von $\dot{Q}_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,27V \cdot I$ lässt sich \dot{Q}_{raus} vereinfachen zu folgender Gleichung. Eine Beispielrechnung des Wertes erfolgt in Kapitel 4.

$$\dot{Q}_{\text{raus}} = I \cdot [I \cdot (R_{\text{Anode}} + R_{\text{Gas}} + R_{\text{Elektrolyt}} + R_{\text{Kathode}}) - 0,27V] \quad (3.6)$$

Wärmeverluste

In Abbildung 3.4 sind die Wärmeverluste nach Bruggeman [Bru98] abgebildet. Die richtige Verteilung der Wärmeverluste ist besonders wichtig für einen effizienten Prozess. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, lassen sich die Wärmeverluste in 3 Hauptkategorien einteilen. Verluste über den Boden, die Seite und über die Oberseite des Ofens. Die Wärmeverluste über den Boden ändern sich kaum mit Temperaturänderungen im Ofen. Der Boden ist für einen minimalen Wärmeverlust ausgelegt, gerade so, dass die Isotherme der Liquidustemperatur

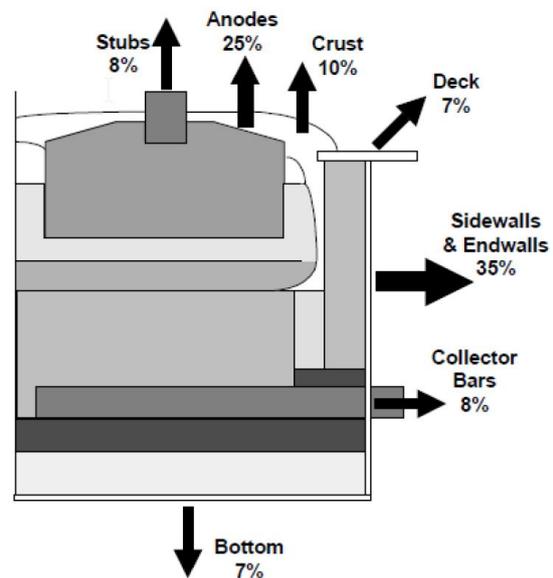


Abbildung 3.4: Wärmeverluste [Bru98]

durch die Kathode läuft. Wichtig ist, dass das Kathodenende an der Seitenwand sowie der Kathodenboden unterhalb der Liquidustemperatur, die Oberfläche der Kathode aber oberhalb der Liquidustemperatur, liegt. So wird ein Eindringen von

3 Der Elektrolyseofen

Elektrolyt in die Ofenisolation vermieden und die Oberfläche hat dennoch genug Wärmeenergie Bodenschlamm zu lösen. V. Nandana [NJ16] hat dies in einem thermoelektrischen Ofenmodell des EPT14 Ofens in Abbildung 3.5 dargestellt.

Wärmeverluste über die Oberseite des Ofens sind nicht ganz so träge wie Wärmeverluste über den Boden. Entweichende Gasblasen tragen die Wärme schnell aus dem Ofen, jedoch wird die Wärme über das Luftpolster zwischen Eindeckung und Elektrolyt nicht so schnell übertragen. Wärmeverluständerungen über die Oberseite benötigen Zeit bis sie sich eingestellt haben. Sowohl für den Boden als auch für die Oberseite kann die Wärmemenge über die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden [Fou22].

$$Q_{\text{raus, Wärmeleitung}} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{\text{Elektrolyt}} - T_{\text{Umgebung}}}{l} \quad (3.7)$$

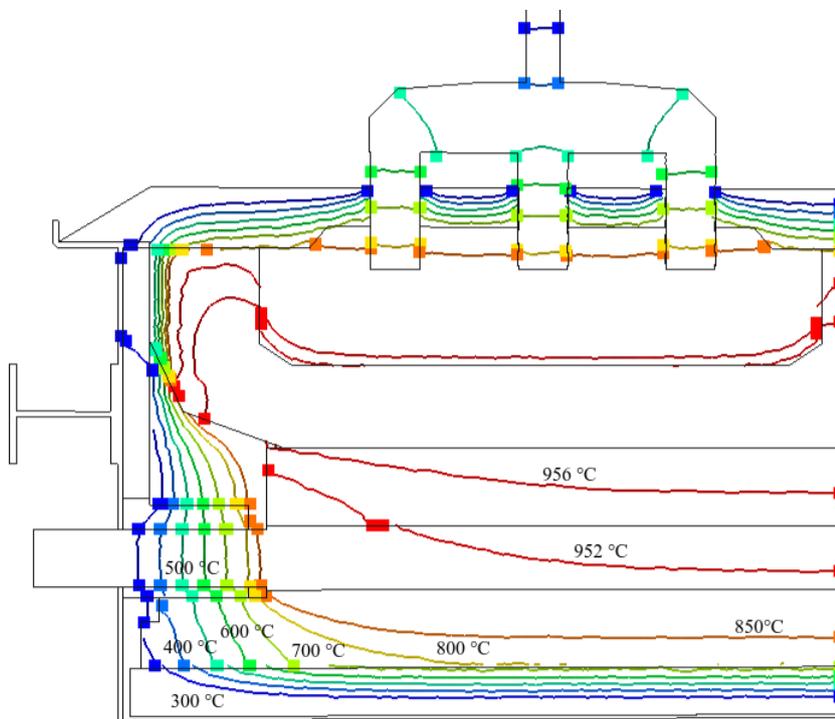


Abbildung 3.5: Isotherme der Liquidustemperatur im EPT14 Ofen

Die Ofenseiten sind kaum isoliert, da der Ofen gerade so viel Wärme abgeben soll, dass die Randkruste an der Ofenwand erstarrt. Die Isothermen liegen hier nah beieinander und die Ofenwand kann dabei Temperaturen bis 400°C aufweisen. Auch hier kann die Wärmemenge über die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden, jedoch ändern sich diese mit Änderung der Randkruste. Die Wärmeverluste über die Seitenwand sind dabei direkt und kurzfristig abhängig von der Fähigkeit des Elektrolyten Energie abzugeben. Anders ausgedrückt; mit zunehmender Enthalpie oberhalb der Phasenwandlung wird der Wärmeverlust zunehmen, jedoch so lange gedämpft, wie Randkruste schmelzen kann. M. Taylor [Tay12] hat den Wärmeverlust über die Seitenwand beschrieben als:

$$\begin{aligned}
 Q_{V,seite} &= \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{Elektrolyt} - T_{Umgebung}}{l} \\
 &= k \cdot A \cdot (T_{Elektrolyt} - T_{Liquidus})
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

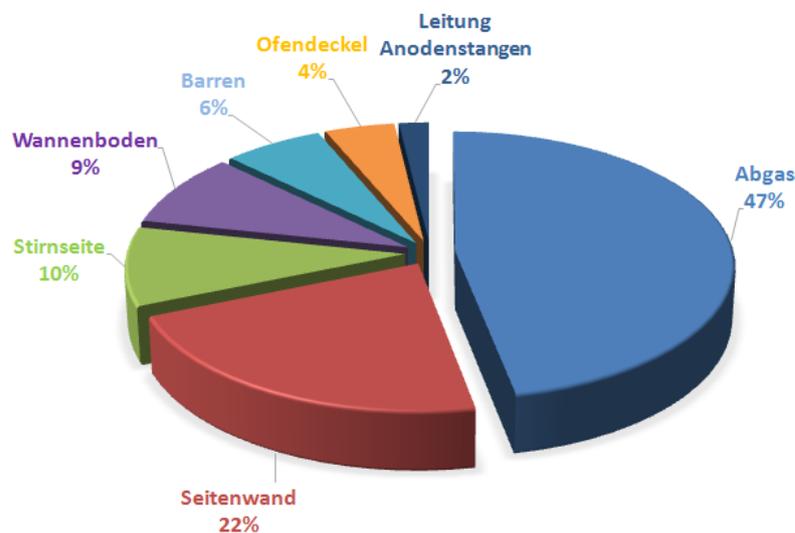


Abbildung 3.6: Wärmeverluste des EPT14 Ofens

Für die Wärmeverluste des EPT14 Ofens wurde eine thermische Analyse durchgeführt. Dazu wurden die Wärmeverluste mittels Wärmeflusskalorimeter direkt

oder über Berechnungen wie z.B. mithilfe von Temperaturdifferenzen und Volumenstrom des Abgases aufgenommen [Koy14]. Die Verteilung der ermittelten Wärmeverluste ist in Abbildung 3.6 dargestellt [Koy14].

Möglichkeiten der Beeinflussung

Obwohl die Wärmeverluste durch Material und Wärmeeintritt vorgegeben sind, gibt es Möglichkeiten den Wärmeabfluss des Ofens kurzfristig zu beeinflussen. Wie bereits beschrieben ist eine Möglichkeit der Einsatz von Wärmetauschern an der Ofenwand. Zur Unterstützung ist es möglich die Wärmeverluste über die Oberseite mithilfe des Abgasstromes zu regeln und ein weiterer indirekter Weg ist den Wärmeeintrag über den ACD zu manipulieren. Alle drei genannten Möglichkeiten werden in den folgenden Kapiteln 3.3.3 und 4 näher beschrieben und beispielhaft berechnet und anschließend in Kapitel 5 experimentell verifiziert.

3.3 Energiemanagement

3.3.1 Spannungsaufteilung / Widerstände

Die Spannungen an einem Ofen lassen sich in einzelne Bereiche aufteilen. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 in Abbildung 2.4 und Tabelle 2.1 dargestellt sind diese Bereiche:

- Externe Spannungsverluste
- Anodenspannung
- Widerstand des Elektrolyten
- Produktionsspannung
- Kathodenspannung

Externe Spannungsverluste

Die externen Spannungsverluste haben keinen direkten Einfluss auf die Wärmebilanz des Ofens. Sie sind jedoch ein Teil der gemessenen Ofenspannung zur Regelung der Wärmebilanz. Aus diesem Grund ist die Ermittlung ihres Widerstands für die Erstellung einer Regelungsgleichung unabdingbar. Die externen Spannungsverluste bilden den Widerstand der Stromschienen zwischen zwei Öfen ab. Vor und nach den Installationen zur Magnetfeldkompensation Kapitel 5.5 wurden die Spannungsabfälle zwischen zwei Öfen gemessen. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt. Die Verringerung des Wertes ist auf die Vergrößerung der Querschnitte der Stromschienen zurück zu führen und im Kapitel 5.5 weiter erläutert.

- Ohne Magnetfeldkompensation ca. 360mV bei 162kA somit $2,22 \mu\Omega$
- Mit Magnetfeldkompensation ca. 310mV bei 162kA somit $1,91 \mu\Omega$

Anodenspannung

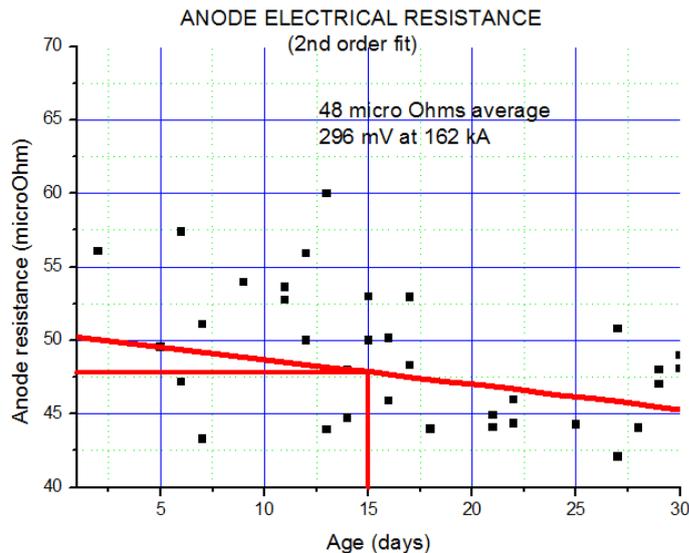
Der Spannungsabfall über die Anode mit Zapfen, Joch und Anodenstange nimmt mit steigendem Alter ab. Dieses Verhältnis kann als linear angenommen werden, da der Widerstand über den Kohlenstoff der Anode abhängig zu seiner Länge in Stromrichtung ist. Für einen Versuch wurde der Spannungsabfall von Anoden mit einem Alter von 1 bis 30 Tage (gesamter Lebenszeitraum) bei 162kA gemessen.



Abbildung 3.7: Ansicht einer Anode

Die berechneten Widerstände sind in nachfolgender Grafik abgebildet. Aufgrund der Linearität und des kontinuierlichen 2 tägigen Anodenwechsels (Anhang .18) kann für die Berechnungen zur Wärmebilanz der mittlere Wert von $48 \mu\Omega$ bei 15 Tagen angenommen werden. Ein Vergleich mit der AP-30 Ofentechnologie

von [DBAK14] zeigt, dass die gemessene Spannung 10% niedriger liegt. Dies ist auf die in den letzten Jahren verbesserten Übergangswiderstände vom Zapfen zur Kohle zurück zu führen [Dü08].



ode resistance : $48 \mu\Omega$

ode table resistance = $1.83 \mu\Omega$ (296 mV at 162 kA)

-30 technology is typically 330 mV !

Abbildung 3.8: Widerstandsmessung

Widerstand des Elektrolyten

Auf den Widerstand des Elektrolyten haben hauptsächlich vier Faktoren Einfluss. Die Menge an Gasblasen im Elektrolyt mit d_b und φ , der Abstand zwischen Anoden- und Kathodenoberfläche D sowie die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten κ und dessen Fläche A . Der Widerstand wird wie folgt berechnet [Tay12]:

$$R_{\text{Elektrolyt+Gas}} = \frac{1}{\kappa \cdot A} \left[(D - d_b) + \frac{d_b}{1 - \varphi} \right] \quad (3.9)$$

Multipliziert mit der Stromstärke, die am Anodenboden anliegt, wird der Spannungsabfall über den Elektrolyten inklusive der Gasblasenschicht berechnet.

Produktionsspannung

Die Produktionsspannung wird indirekt über das Ausschließen der übrigen Spannungen bestimmt. Laut [Hau98],[Tay12], [Wei01] und [TZWS96] berechnen sich die Polarisationspannungen sowie die Elektrochemische Spannung wie folgt:

$$E_{rev} = 1,897V - 5,6 \cdot 10^{-4} \frac{V}{^{\circ}C} \cdot (273,15^{\circ}C + T_{Elek.}) + \frac{8,314 \frac{V \cdot Cb}{^{\circ}C} \cdot (273,15^{\circ}C + T_{Elek.})}{12mol \cdot 96485 \frac{Cb}{mol}} \cdot \ln \left(\frac{1}{ROS} \right)^{2,77} \quad (3.10)$$

$$\eta_{CC} = \left(2,73 \frac{V}{^{\circ}C} - (0,5 \cdot CR) \right) \cdot (273,15^{\circ}C + T_{Elek.}) \cdot \frac{1}{75000} \cdot \ln \frac{SD_c}{0,283} \quad (3.11)$$

$$\eta_{AA} = 11,42 \cdot 10^{-6} \frac{V}{^{\circ}C} \cdot \ln (273,15^{\circ}C + T_{Anodenbrennung}) \cdot (273,15^{\circ}C + T_{Elek.}) \cdot \ln \left(\frac{SD_a}{i_r} \right) \quad (3.12)$$

$$\text{mit } i_r = \exp [0,56 \cdot \ln (Al_2O_3 + LiF / 4) + 0,276 \cdot (CR - 1,5) - 5,849] \quad (3.13)$$

$$\eta_{AC} = (273,15^{\circ}C + T_{Elek.}) \cdot \frac{1}{23210^{\circ}C} \cdot \ln \left(\frac{CSD_a}{CSD_a - SD_a} \right) \quad (3.14)$$

Das für die Berechnungen erstellte Excel-Tool mit den Eingaben für den EPT14 Ofen befindet sich im Anhang .21.

Kathodenspannung (CVD)

Für die Ermittlung der Kathodenspannung wurden 7755 Messergebnisse der CVD-Messung der letzten Jahre in eine Tabelle übertragen. Die CVD Messung wird vom flüssigen Metall bis zu einem Fixpunkt, auf den Stromschienen zwischen den Öfen, aufgenommen. Ein Wert von ca. 407mV kann als repräsentative Größe für die CVD Messung eines Ofens, ab einem Alter von einem Jahr, angenommen werden. Abzüglich des Spannungsabfalls, von ca. 105mV, vom Messpunkt bis zum Kathodeneisen, bleibt eine Kathodenspannung innerhalb des Ofens von ca. 300mV. Diese ist vergleichbar mit Werten aus weiteren Messkampagnen (Tabelle 3.4, [DBAK14]).

Ofentyp		TRIMET	S	L1	B
Stromstärke	kA	162	147,1	161	165
Kathodenspannung	mV	300	229	274	317
Kathodenwiderstand	$\mu\Omega$	1,85	1,56	1,70	1,92

Tabelle 3.4: CVD von End to End Öfen

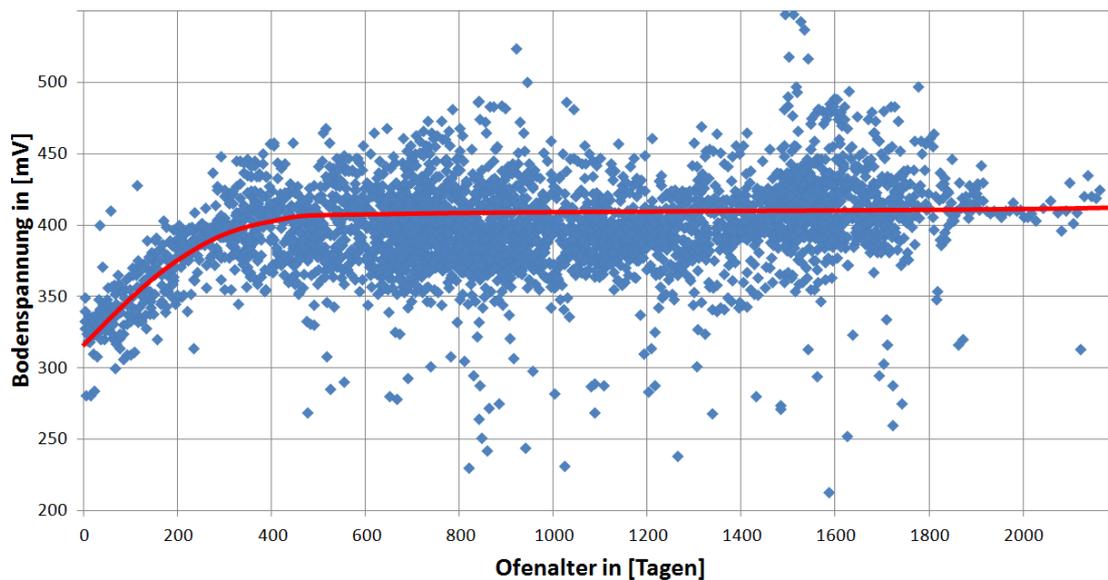


Abbildung 3.9: Messung der Bodenspannung von Juni 14 bis Dez 15 in Halle 1

3.3.2 Unruheerkennung

Die Unruhe spiegelt den Widerstandsverlauf wieder. Sie wird in $\mu\Omega$ angegeben, jedoch erfolgt die Regelung und Messung in mV. Dazu wird die Spannung am Ofen alle 60ms gemessen und aus den letzten 1000 Werten die Differenz des höchsten und niedrigsten Wertes gebildet. Zur Ansicht wird sie dann mittels der anliegenden Stromstärke in einen Widerstand nach dem Ohmschen Gesetz umgerechnet.

$$Unruhe_{mV} = \max\{U_{t=60ms \cdot n}\} - \min\{U_{t=60ms \cdot n}\}, n \in \mathfrak{R}\{-1; -1000\} \quad (3.15)$$

Übersteigt der Unruhe Wert (in mV) einen Grenzwert, wird gemessen an der Höhe des Unruhwertes eine Zusatzspannung durch Hochfahren der Anoden eingeleitet. Eine hohe Unruhe kann zB. bei Kontakt einer Anode mit der Aluminiumoberfläche entstehen.

3.3.3 Verringerung des ACD

Der ACD (Anode-Cathode-Distance zu deutsch Anoden-Kathoden-Abstand) ist der Abstand der Bodenfläche der Anode zur Oberfläche des flüssigen Aluminiumsees im Ofen. Aufgrund der Höhe des Elektrolytwiderstands ist dieser Bereich maßgeblich für die Wärmeerzeugung im Ofen (Vergleich Kapitel 3.3.1). Zur Einhaltung der Energiebilanz und der Stärke der Randkruste ist die Reduzierung des ACD's ein geeigneter Kompensator für das Anheben der Stromstärke. Mit abnehmendem ACD nimmt jedoch auch die Unruhe zu, da das Verhältnis von isolierenden Gasblasen, CO_2 und CO , zu flüssigem Elektrolyt ansteigt. In einem Versuch wurde an drei Öfen untersucht um wie viel mm der ACD verringert werden kann, bzw. die Spannung abgesenkt, bevor die Unruhe massiv ansteigt. Bei den Messungen lag der Grenzwert bei etwa 3,9V, siehe Beispiele Abbildung 3.10 und 3.11.

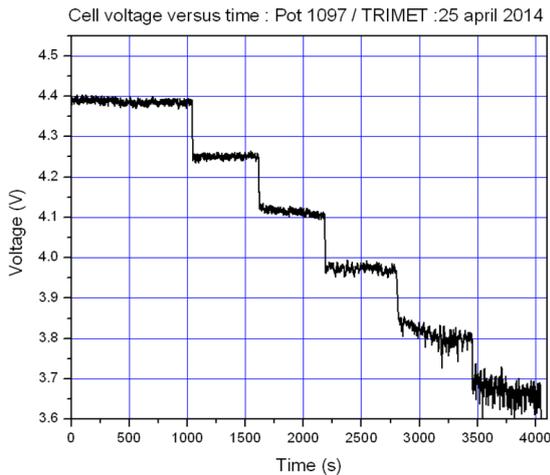


Abbildung 3.10: Ofen1097

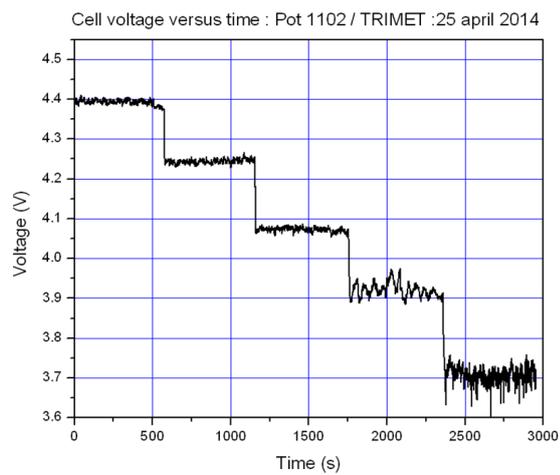


Abbildung 3.11: Ofen1102

3.3.4 Prozessfenster des Elektrolyseofens

Das Prozessfenster des Elektrolyseofens ist durch vier Grenzen gegeben. Dabei spiegeln drei der Grenzen die technischen Gegebenheiten wieder, während die vierte Grenze wirtschaftlich geprägt ist. In nachfolgender Grafik ist die wirtschaftliche Grenze nicht eingezeichnet. Sie würde an der linken Seite verlaufen und ist nicht statisch, da ihre Abhängigkeit durch die Rohstoffpreise sowie die spezifischen Kosten der Herstellung gegeben ist. Der Verlauf zeigt jedoch deutlich eine zeitliche „Flucht“ von dieser Grenze. In rot ist der Wärmeverlust dargestellt. Hier ist der Ofen begrenzt durch die maximale mögliche Wärmemenge, die verloren werden kann. Durch Installation der Wärmetauscher konnte diese Grenze zur Erweiterung des Prozessfensters verschoben werden. Kongruent dazu ist die Grenze des minimal möglichen Wärmeverlusts. Durch Isolation mittels der Wärmetauscher konnte auch hier das Prozessfenster erweitert werden. Die dritte Grenze, in grün dargestellt, ist die Grenze bei der der Ofen unruhig wird. Durch Installation der Magnetfeldkompensation konnte das Prozessfenster auch in diese Richtung erweitert werden. Für eine energieeffiziente Produktion ist es sinnvoll den Prozess möglichst nah am Unruhelimit zu betreiben, sowie den geeigneten Betriebspunkt zwischen maximaler Stromstärke und minimalem Wärmeverlust

zu finden. Vor Beginn der Forschungen zur Virtuellen Batterie lag das Prozessfensters im blau hinterlegten Bereich der Grafik. Wie es zur Vergrößerung des Prozessfensters und zum weiteren Verlauf bis zum Punkt der Boostergruppe gekommen ist, wird in den folgenden Kapiteln 4 und 5 erläutert.

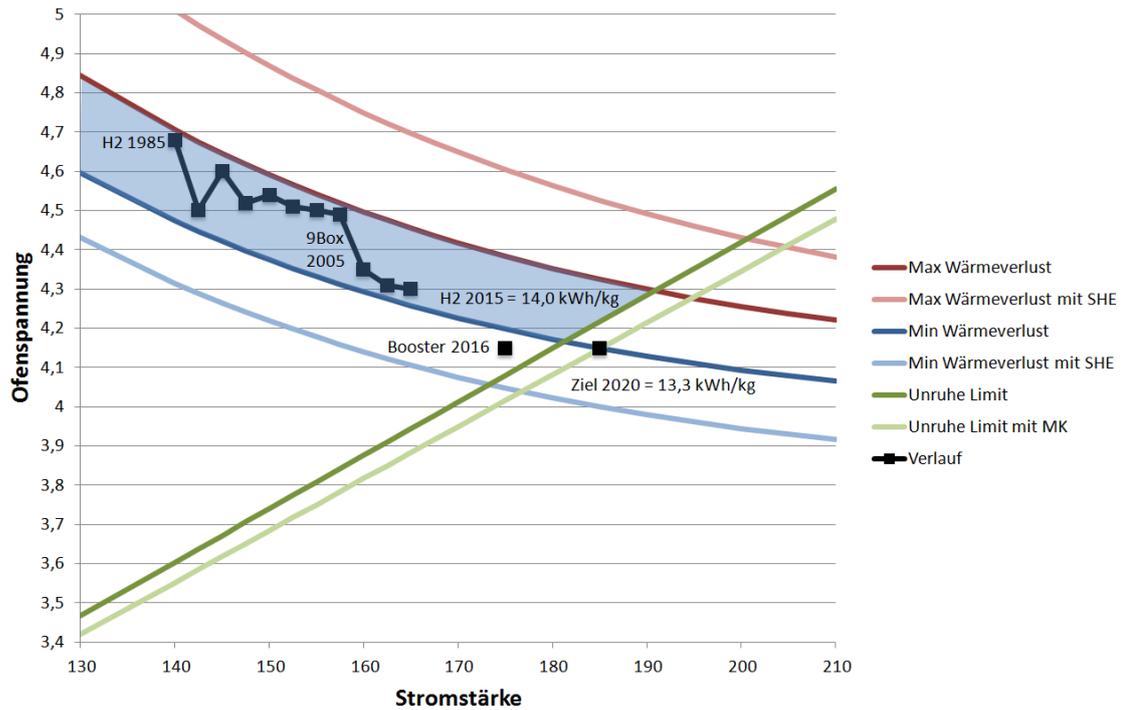


Abbildung 3.12: Prozessfenster des EPT14 Ofens

4 Lastmanagement

Die Bedeutung von Lastmanagement oder allgemeiner Energiemanagement bekommt in Industrieunternehmen eine immer größer werdende Bedeutung. Ziel ist es, in Zeiten von volatilen Energiemärkten eine gute Beschaffungsstrategie durch eine eigene Energieabteilung zu erzielen, um so die Energiekosten so gering wie möglich zu halten. Der Weg zu einer eigenen Energiebeschaffung ist jedoch nicht trivial. Es müssen nicht nur diverse Verträge mit Netzbetreibern und Stromlieferanten abgeschlossen werden, sondern es sollte ein eigenes Risikomanagement im Unternehmen installiert sein, welches die neuen Vertragspartner auf Bonität prüft und die Energiekäufe überwacht. Des Weiteren bedarf es rechtlichem Beistand, gerade bei Eingriffen in die Netzstabilität mit Produkten wie der Verordnung über abschaltbare Lasten (AbLaV).

Durch den starken Zubau von Erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel der Wind- oder Solarenergie, kommt es im deutschen Stromnetz zu starken Schwankungen. Wetter und Lastprognosen sind nicht selten falsch bestimmt und decken sich nicht. Seither wurden von den Übertragungsnetzbetreibern verschiedene Produkte, wie die Primär-, Sekundärregelleistung, Minutenreserve oder AbLaV, ins Leben gerufen um das Netz zu stabilisieren. Die TRIMET, als größter privater Stromnutzer, mit ca. 6TWh jährlich leistet einen großen Beitrag mit diesen Produkten zur Netzstabilität [Lin14].

Das von der Bundesregierung beschlossene Moratorium im Jahre 2011, mit der Stilllegung von sieben Atomkraftwerken in Deutschland, hat die Energiewende massiv beschleunigt. Die durch den starken Zubau von Erneuerbaren Energien fallenden Preise auf den Rohstoff- und Energiemärkten [Hau13] führen je-

doch auch zu fallenden Aluminiumpreisen. Demnach gilt es vor allem für Halbleitungsprodukt hersteller in Deutschland sich neu Auszurichten und als Industrie, mit z.B. den oben genannten Produkten, an der Energiewende teil zu nehmen. So hat die TRIMET bereits 2011 mit Forschungen zur Virtuellen Batterie begonnen.

4.1 Geschichtlicher Hintergrund

Die Idee der Strommodulation mithilfe der Aluminiumelektrolyse ist keine neue, bereits in den 1990ern wurden Versuche in Elektrolysezellen in Brasilien durchgeführt ([PLNVdSS98], [BFQM⁺92]). Auch in der Elektrolyse in Essen war das Lastmanagement schon 1974 ein Thema. Ingenieure der Alusuisse [SH74] und [SHBT75] haben verschiedene Berechnungen zur Leistungsreduzierung aufgestellt. Ihre Ideen beinhalteten jedoch hauptsächlich das Abschalten von Öfen, anstelle einer Modulation mithilfe der Stromstärke. Die Innovation des Lastmanagements heutzutage ist, dass über einen gewissen Zeitraum Produktionsmenge und somit Leistung konstant gehalten werden. Die Modulation also kurzzeitig und vor allem mit schnellerem Wechsel statt findet. Diese Entwicklung wurde forciert durch den Zubau von Erneuerbaren Energien und somit die Veränderung von Art und Zeit der Erzeugung von Strom und somit auch der Abnahme. In nachfolgender Abbildung 4.1 sind Erzeugungs- und Verbrauchsprofil dargestellt, dabei ist in rot das Defizit und in grün der Überschuss dargestellt.

Auch die neuartige Modulationsweise wird negative Auswirkungen auf die Prozesseffizienz nehmen, welche ausgelegt ist für eine stabile Energiebilanz. Der wesentliche Punkt ist heraus zu finden, wann die Effizienz stark einbricht und den Prozess dahin gehend zu optimieren diesen Zeitpunkt weiter heraus zu zögern. Kernpunkt der neuen Produktionsweise ist dabei, die alte Philosophie richtig zu deuten. Der Ofen benötigt eine gleichbleibende Energiebilanz und nicht einen gleichbleibenden Energieeintrag. Schlussendlich ist die wirtschaftliche Betrachtung wieder einmal Entscheidungsträger zwischen Gewinn der Modulationserlöse und Verlust der Prozesseffizienz.

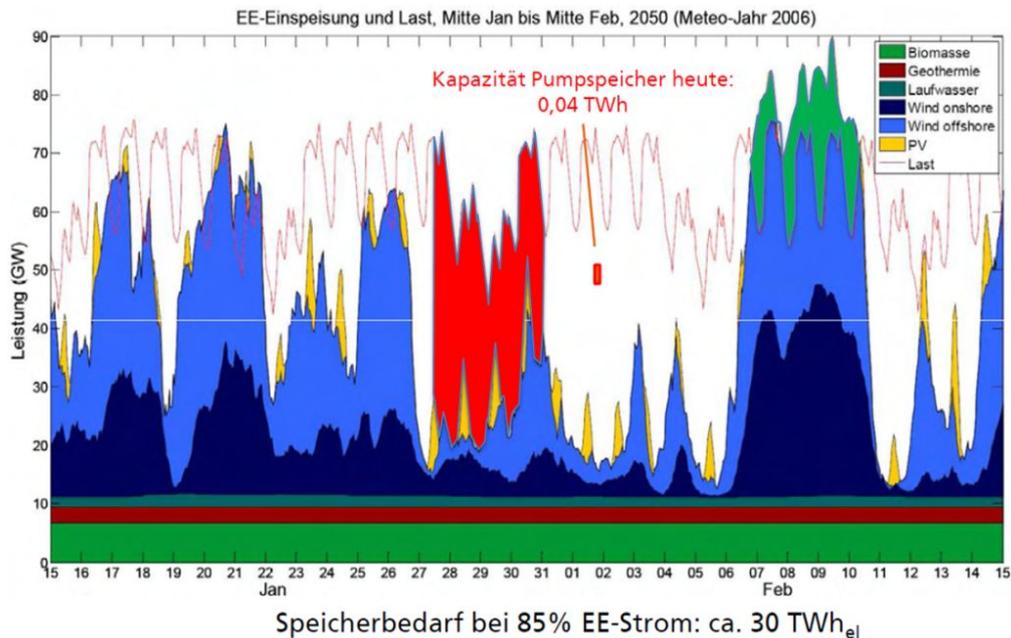


Abbildung 4.1: Erzeugungs- und Verbrauchsprofil 2050 [Hau13]

4.2 Modulationskonzept

Für eine wirtschaftliche Anwendung der Strommodulation wurde von TRIMET ein Tool entwickelt, welches Effizienzverluste sowie Vermarktungsgewinn gegeneinander abwägt. Mittels der Versuche, beschrieben in Kapitel 5, konnten die neuen Betriebszustände für die Berechnung ermittelt werden. Im Optimum wird die Produktion bei 185kA mit einem spez. Energieverbrauch von 13,2DC kWh/kg betrieben, wie auch Berechnungen der Firma KAN-NAK [KAB15] zeigen. Wird das Produktionsfenster verlassen, so hat dies finanziellen Einfluss auf die Parameter, abgebildet in Tabelle 4.1.

$$\begin{aligned} \text{Erlös}_{neg.Modu.} &= \text{Leistung} \cdot \text{Strompreis} \\ &- \text{Effizienzverluste} - \text{Produktionsverlust} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Erlös}_{pos.Modu.} &= -\text{Leistung} \cdot \text{Strompreis} - \\ &\text{Effizienzverluste} + \text{Produktionszusatz} \end{aligned} \quad (4.2)$$

	Modul. -23%	Optimum	Modul. +23%
Stromstärke [kA]	145	185	210
Stromausbeute [%]	92	94	92
Produktionsmenge [t]	384	500	556
Leistung [MW]	213	275	338
spez. Energieverb. DC [MWh/t]	13,33	13,21	14,60
spez. Energieverb. AC [MWh/t]	13,74	13,62	15,05
spez. Anodenverbrauch [kg/t]	510	500	540
spez. Kosten [€/t]	372	286	257
Ebitveränderung [Mio€]	-1,5	0	-1,1

Tabelle 4.1: Prozessänderung während der Modulation (von +/-500 h/Jahr)

Eine Modulation ist dann sinnvoll, wenn eine der obigen Gleichungen ein positives Ergebnis erzeugt. Des Weiteren wurden für Investitionsentscheidungen Modelle entwickelt [DIJP16], mit denen Aussagen über die Entwicklung von Strompreis und Volatilität des Strompreises getroffen werden können. Dabei wurden Ziele und Kommitments des Landes sowie Veröffentlichungen der Agora Energiewende berücksichtigt, um eine zeitliche Veränderung des Kraftwerksparks zu berechnen (Abbildung 4.2 [DIJP16]).

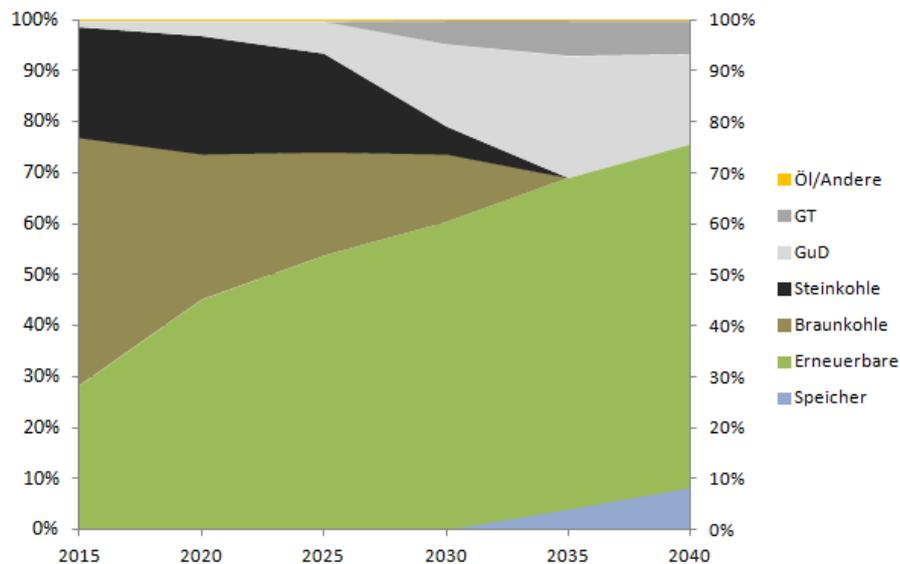


Abbildung 4.2: Modellrechnung des Erneuerbare-Energien-Ausbau

4.2.1 Stromhandel der TRIMET

Als einer der größten Nutzer elektrischer Energie in Deutschland, mit einem Gesamtbedarf von etwa 6TWh pro Jahr (6.000.000.000kWh), stellt sich die Frage nach einer eigenen Energiehandelsabteilung nicht, sie ist schlicht eine Notwendigkeit. Die eigene Abteilung arbeitet als kleines Energieversorgungsunternehmen für die deutschen Standorte der TRIMET Gruppe und stellt deren Versorgung mit elektrischer Energie sicher.

Diese Unabhängigkeit nutzt die TRIMET an allen Märkten des Stromhandels, welcher vom Termin- und Spothandel über den kurzfristigen Intradaymarkt bis hin zum Markt für Regelenenergieprodukte reicht [Kol15]. Auf letzterem bietet die TRIMET Primär- und Sekundärregelleistung, sowie Abschaltbare Lasten an. Mit ihrer eigenen Energiehandelsabteilung, die sich neben dem händlerischen auch um alle operativen Belange des Strommarktes kümmert, kann sie unabhängig und sehr flexibel auf Änderungen des Marktes reagieren. Den Terminmarkt nutzt TRIMET ausschließlich zur strategischen Sicherung des Strompreisniveaus bzw. zur Sicherung der Produzentenmarge durch Kombinationen mit Produkten des finanziellen Aluminiummarktes. Hier schaffen mehr als 30 verschiedene Handelspartner einen jederzeit liquiden Markt. Der Spotmarkt der EPEXSPOT Börse dient lediglich zum Ausgleich zwischen langfristiger und täglicher Prognose. Mit ihren Flexibilitäten kann die TRIMET auf Preissignale am Intradaymarkt reagieren, welcher zum Hauptteil über ein Online-Tool der EPEXSPOT Börse abgewickelt wird und an dem zu jedem Zeitpunkt liquide gehandelt wird. Über die gemeinsame Seite der Regelzonenbetreiber regelleistung.net nimmt TRIMET am Markt für Primärregelleistung und Abschaltbaren Lasten teil. Die Primärregelleistung wird einmal in der Woche in einer Auktion ausgeschrieben. Bei dieser Auktion wird lediglich die Bereitstellung vergütet und die Elektrolyse fährt im Sekundenakt dem Sollsignal des Stromnetzes hinterher, um dieses auf seiner optimalen Frequenz von 50Hertz zu halten. Bei den Abschaltbaren Lasten wird sowohl die Bereitstellung mit einem Leistungspreis vergütet, als auch der Abruf selbst. Ein Abruf bedeutet für die TRIMET immer innerhalb einer Sekunde (Sofortabschal-

tung) oder nach 15 Minuten Vorlaufzeit (Schnellabschaltung) die gesamte Last einer Elektrolysezelle längstens 60 Minuten abzuwerfen. Am Markt für Sekundärregelleistung nimmt TRIMET über einen Regelleistungspool teil. Die Sekundärregelleistung muss innerhalb von 5 Minuten verfügbar sein und kann bis zu 60 Minuten abgerufen werden [Ple08]. Aufgrund der Restriktionen der Elektrolyse, die thermisch nicht mehrere Abrufe an einem Tag verkraftet, kann TRIMET nicht unabhängig agieren. Durch die Weiterentwicklung der Elektrolyse werden sich in Zukunft jedoch neue Möglichkeiten erschließen, auf die die TRIMET mit Ihren Möglichkeiten am Markt zu agieren hervorragend vorbereitet ist.

4.3 Lastmanagement einer Elektrolysezelle

Eine Aluminiumelektrolyse, die mit einer Leistung von 200-350MW betrieben werden könnte, also mit einer Flexibilität von ca. 25-30% um die Basisstromstärke, kann diese Kapazität sinnvoll als Kompensation für die erneuerbare Energieproduktion eingesetzt werden. Aktuell werden Aluminiumelektrolysen jedoch nur mit ca. $\pm 5\%$ Last-Flexibilität eingesetzt. Grund dafür sind die prozesstechnischen Einschränkungen des Ofens bezüglich Energiebilanz und Haltbarkeit. Dabei bleibt zu beachten, dass 85% des Wärmeverlustes vom Superheat und dem Elektrolyt- und Aluminiumvolumen ausgehen und die Wärmebilanz nicht unabhängig dieser Faktoren verändert werden kann [ELJ14]. Aus diesem Grund ist es aktuell nicht möglich den Wärmeverlust des Ofens erheblich zu ändern, ohne dabei durch Änderung von Stromstärke und Spannung auch Einfluss auf das flüssige Elektrolytvolumen und dessen Superheat zu nehmen. In den vergangenen Jahrzehnten wurden aufgrund der wirtschaftlichen Lage (vor allem aufgrund des Aluminiumpreises) immer wieder Versuche der Produktionsreduzierung durchgeführt, welche alle auf die genannten Schwierigkeiten stießen. Besonders der kumulative Effekt des Wärmehaushaltes, bei Langzeitmodulationen bzw. eines Versatzes der Produktionslast, veränderte die Produktionseffizienz bis zur Unwirtschaftlichkeit (Bsp. Produktionsstätten Valesul [PLNVdSS98] und Al-del [SS07]). Spannungsinstabilitäten (Unruhe), das Ansteigen des spez. Energie-

verbrauchs und der schnelle Verbrauch des Kathodenmaterials waren dabei die Hauptgründe für ein Abstellen des Modulationsverfahrens.

Die beiden größten Leistungsreduktionen in Aluminiumelektrolysen wurden in Hillside und Mosal (beide in Afrika) in 2008 durchgeführt. Beide Aluminiumelektrolysen waren durch eine Reduzierung der Leistung, des Energieversorger Eskom Holdings, von ca. 10% gezwungen mit ca. 20-25kA verringerter Stromstärke zu fahren. Diese Reduzierung war jedoch nur möglich, da die Ventilatoren, welche zuvor zur Kühlung der Ofenseiten für eine Produktionssteigerung eingebaut, wieder abgestellt wurden [Gil08]. In den Jahren 2011 [TCFW11] und 2014 [TCFW14] wurden Lösungsmöglichkeiten zur Strommodulation in verschiedenen US Patenten zu Papier gebracht und in Auckland (experimentell [LND⁺11]) und Essen (im Pilotprojekt Virtuelle Batterie [DDPR16]) erforscht. Dabei wurde mithilfe von Wärmetauschern der Wärmeverlust über die Seitenwände kontrolliert sowie mithilfe von Spannungsanpassungen die Wärmeerzeugung geregelt, um so Einfluss auf die Massenbilanz der Randkruste und den damit verbundenen Wärmeübergang zu nehmen [CT15]. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

Mithilfe der nachfolgenden rechnerischen Annäherung soll gezeigt werden, welche Probleme und Fragestellungen, bei genannter Dynamik einer Aluminiumelektrolyse, auftreten. Des Weiteren wird gezeigt, wie eine Elektrolysezelle auf veränderte Wärmeverluste und Wärmeerzeugung reagiert. Dabei wird als erstes berechnet, welche Veränderung des Wärmeverlustes notwendig ist, um die Energiebilanz im Ofen stabil zu halten. Danach folgt eine Analyse, welche kritischen Steuerungsparameter und Wechselwirkungen existieren und verändert werden müssen. Die folgenden Ausführungen und Berechnungen dieses Kapitels nehmen Bezug auf [CT15]. In diesem Artikel wird die Meinung vertreten, dass ein Betreiben einer Aluminiumelektrolyse auch mit Stromstärkeverringerungen möglich ist. Für die nachfolgenden Berechnungen wurden folgende Angaben verwendet:

- Drei Hallen mit je 120 Öfen, einer Stromstärke von 162kA, und einer Stromausbeute von 93,7%
- Eine Ofenspannung von 4,2V mit 0,31V externen Spannungsverlusten
- Einer Elektrolyt Temperatur von 963°C und einer Liquidustemperatur von 955°C
- Einem Überschuss an AlF_3 von 10,5% und einer flüssigen Elektrolytmasse von 4500kg
- Einem Seitenwand Wärmeverlust von 35% (von denen 25% auf die Längsseiten fallen) bei einer inneren gesamt Seitenwandfläche von $3m \cdot 8m \cdot 0,5m$
- Einem Wärmeverlust über die Oberseite des Ofens von 50%
- Einem ohmschen Spannungsabfall bei 162kA von 2,22V
- Einem Produktionsspannungsabfall von 1,76V (Kapitel 3.3.1)
- Einem Wärmübergangskoeffizienten von flüssigem Elektrolyt/Aluminium zur Randkruste von $800W/m^2/K$ [Tay12]
- Einer spezifischen Wärmekapazität des Elektrolyts von $1,7kJ/kg/K$ [Tay12]
- Einem Energiebedarf der Phasenumwandlung von Elektrolyt von $520kJ/kg$ [Tay12]
- Und einem theoretischen Energiebedarf zur Herstellung von Aluminium von $6,5kWh/kg$ [Tay12]

Zur Unterstützung der Energiewende und einer flexiblen Strom-Abnahme sollen die Öfen mit einer Stromstärke von 130-200kA betrieben werden. Der Zeitraum ist dabei ungewiss und soll in den Rechnungen eruiert werden. Vorerst soll der ACD konstant gehalten werden und die thermische Veränderung berechnet werden. Dazu wird der ohmsche Widerstand der Zelle wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} R_{Ofen} &= \frac{2,22V}{162kA} \\ &= 13,7\mu\Omega \end{aligned} \quad (4.3)$$

Die Energie der Wärmeerzeugung ist abhängig vom theoretischen Energiebedarf zur Aluminiumproduktion und ist unabhängig von der Stromstärke, solange sich die Stromausbeute nicht ändert.

$$\begin{aligned} 6,5 \frac{kWh}{kgAl} &= \frac{298 \cdot U_{Reaktion}}{93,7} \\ U_{Reaktion} &= 2,04V \end{aligned} \quad (4.4)$$

Somit liegt der statische Wärmeverlust vor Start der Modulation bei:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_V &= (4,2V - 0,31V - 2,04V) \cdot 162kA \\ &= 300kW \end{aligned} \quad (4.5)$$

Für die weiteren Rechnungen soll angenommen werden, dass sich die Reaktionsspannung bei Stromstärkeänderungen nicht mit ändert, obwohl die Reaktionsüberspannung an der Anode η_{AA} (Aktivierungsspannung) eine logarithmische Abhängigkeit zur Anodenstromdichte besitzt. Eine reduzierte/erhöhte Badtemperatur nach veränderter Stromstärke wird jedoch Einfluss auf die Reaktionen an Anode η_{AC} und Kathode η_{CC} (Konzentrationsüberspannungen) sowie auf die elektrochemische Spannung E_{rev} haben und die Änderung ausgleichen (vergleiche Formeln 3.10, 3.12, 3.14 und 3.11). Die zuletzt genannten Spannungen werden den Einfluss der Reaktionsüberspannung mit fallender Elektrolyttemperatur übersteigen und zu einem positiven Effekt der Wärmebilanz beitragen und umgekehrt. So kann davon ausgegangen werden, dass die elektrochemischen Effekte der Aluminiuelektrolyse eine selbstkorrigierende Wirkung bezüglich ihrer Summe besitzen. Denn mit fallenden Temperaturen im Anoden- und Kathodenbereich werden die Konzentrationsüberspannungen wieder ansteigen und zu höheren Elektrolyttemperaturen führen [CT15]. Die genannten „helfenden“ Reak-

tionen sollen hier nicht betrachtet werden, sondern lediglich der Fall der reinen Stromstärkeänderung ohne eine Änderung der Wärmegenerierung durch elektrochemische Effekte. Die neue Ofenspannung liegt damit bei:

$$\begin{aligned}
 U_{130kA} &= 1,76V + 13,7\mu\Omega \cdot 130kA + 0,31V \cdot \frac{130}{162} \\
 &= 3,79V \\
 U_{200kA} &= 1,76V + 13,7\mu\Omega \cdot 200kA + 0,31V \cdot \frac{200}{162} \\
 &= 4,88V
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Der neue Wärmeverlust liegt damit bei:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{130kA} &= \left(3,79V - 0,31V \cdot \frac{130}{162} - 2,04V \right) \cdot 130kA \\
 &= 195kW \\
 \dot{Q}_{200kA} &= \left(4,88V - 0,31V \cdot \frac{200}{162} - 2,04V \right) \cdot 200kA \\
 &= 491kW
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Zum Startzeitpunkt der Modulation liegt somit folgende Wärmeverluständerung vor:

$$\begin{aligned}
 \Delta\dot{Q}_{130kA} &= 195kW - 300kW \\
 &= -105kW \\
 \Delta\dot{Q}_{200kA} &= 491kW - 300kW \\
 &= +191kW
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Allgemein kann also für die Wärmeverluständerung folgende Gleichung angegeben werden:

$$\Delta\dot{Q} = I \cdot (U - U_{\text{Reaktion}} - I \cdot R_{\text{Ext}}) - I_{\text{neu}} \cdot \left(U_{\text{neu}} - U_{\text{Reaktion}} - \frac{I_{\text{neu}}^2}{I} \cdot R_{\text{Ext}} \right) \tag{4.9}$$

Für die flüssige Elektrolyttemperatur gibt es zwei Hauptgrenzwerte. Die untere Grenze liegt in etwa bei 910°C siehe Abbildung 4.3, während die obere Grenze durch einen zu hohen Superheat und die damit verbundene Seitenwandstärke gegeben ist ([SSS97] und [CPCM10]). Unter 910°C ist der Elektrolyt fast ausschließlich Chiolith, was die Lösungsfähigkeit von Tonerde nahezu zu null setzt und Anodeneffekte hervorruft. Somit ist der Prozess wirtschaftlich untragbar, da weder ein Massenaustausch (Aluminiumproduktion) stattfindet, noch ein thermisches Gleichgewicht herrscht.

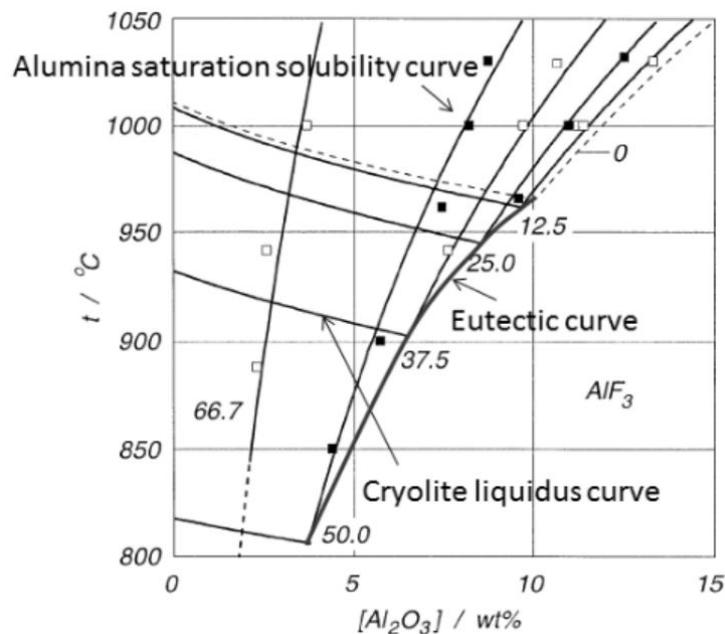


Abbildung 4.3: Quasibinäres Phasendiagramm des Systems $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$

Ist es also möglich den Elektrolyseofen bei 130 bzw. 200kA zu betreiben ohne die Grenzen zu überschreiten? Dazu sollen vier Hauptpunkte in den folgenden Kapiteln betrachtet werden:

- Die Wärmehaushaltsänderung
- Verändern der Wärmeverluste durch Isolation/Kühlung

- Das Erstarren oder Aufschmelzen von Elektrolyt
- Und die dadurch veränderte chemische Zusammensetzung

4.3.1 Beispiel Wärmehaushaltsänderung

Die Wärmeverluständerung der Modulation über den Zeitraum t entspricht der veränderten Enthalpie der Zelle. Diese kann zum Zeitpunkt t wie folgt angegeben werden [ZWST96]:

$$\Delta\dot{Q}_t = m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.10)$$

Es ist vorteilhaft, dass die überwiegende Wärmeerzeugung hauptsächlich im Elektrolyt selbst erfolgt (Vergleiche Tabelle 2.1), so dass sich die Enthalpieänderung hauptsächlich hier bemerkbar macht. Verantwortlich dafür sind die massiven Bewegungen des Elektrolyts aufgrund von Gasblasen und Magnetfeld [KAB14], sowie die sehr gute Wärmeleitfähigkeit von Aluminium und Elektrolyt [WT87]. Die veränderte Wärmeerzeugung an Anode und Kathode trägt durch den direkten Kontakt zu Elektrolyt und Aluminium dazu bei. Somit ist die Enthalpieänderung des flüssigen Elektrolyts der Enthalpieänderung des Ofens gleichzusetzen [CT15].

$$m_{Elek.} \cdot c_{p,Elek.} \cdot \frac{dT_{Elek.}}{dt} = m_{Ofen} \cdot c_{p,Ofen} \cdot \frac{dT_{Ofen}}{dt} \quad (4.11)$$

Diese Annäherung ist nur so lange gültig, bis die angrenzenden Bereiche auf die Wärmeverluständerung reagieren. Allen voran die Anoden und die Randkruste, über welche der größte Teil (85% s. Annahme) der Wärme verloren geht und welche auch am schnellsten auf die Änderung reagieren. Aufgrund seiner sehr guten Isolation (Vergleich Abbildung .1) soll der Wärmeverlust über den Boden und die Kathodenbarren vereinfacht als konstant (15%) angenommen werden. Der Wärmeverlust über die Seiten und die Anoden kann als einfacher Wärmedurchgang einer Wand betrachtet werden:

$$\dot{Q}_{V,seite} = k \cdot A \cdot (T_{Elek.} - T_{Liq.}) \quad (4.12)$$

Dieser ist durch den Wärmeaustritt, über mögliche Seitenwand-Wärmetauscher und eine variable Abgasmenge und den Wärmeeintritt über die Wärmeleitung des Elektrolyts, definiert. Wie lange es dauert, bis ein veränderter Wärmeverlust Einfluss auf den Wärmedurchgang nimmt, kann wie folgt bestimmt werden [Ste93]:

$$t_V = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{l^2 \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot \ln \frac{4}{\pi \cdot \tau} \quad (4.13)$$

Wenn die Wärmemenge über die Seitenwände nun um $\tau = 0,6$ reduziert wird, dann lässt sich die Wärmemenge ausgehend vom Elektrolyt nach [Wel01] wie folgt beschreiben:

$$(1 - \tau) = \frac{\dot{Q}_{V,seite}}{k \cdot A \cdot (T_{Elek.} - T_{Liq.})} \quad (4.14)$$

und somit Gleichung 4.13 vereinfachen:

$$t = \frac{3}{\pi^2} \cdot \frac{l^2 \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \quad (4.15)$$

Für eine 20cm starke Seitenwand wurde eine Reaktionszeit von [ZWST96] von ca. zwei Stunden, mit einer Ungenauigkeit von einer Stunde berechnet. Somit wird eine Berechnung der Wärmebilanz mit den Gleichungen 4.9 und 4.10 bereits nach 2h zu größer werdenden Abweichungen führen. Ein ähnliches Verhalten kann von Veränderungen des Wärmedurchgangs der Anode angenommen werden. Bereits [ATJC05] hat nachgewiesen, dass sich bei veränderter Stärke des Eindeckmaterials die Temperatur der Anode sichtbar ändert. Innerhalb von 30min nach Änderung wechselte die Farbe der Anode von rot glühend ($>600^\circ\text{C}$) auf schwarz ($<500^\circ\text{C}$). Der EPT14 Ofen besitzt eine Seitenwand von ca. 25-30cm [Pur14], somit sollte sich ein neues thermisches Gleichgewicht nach etwa drei

Stunden einstellen. Dies ist in den Versuchen (Abbildung 5.42) zu sehen. Gleichwohl wird die weiterhin stark veränderte Wärmeentwicklung die Temperatur des Ofens weiter verändern (siehe ff. Kapitel).

4.3.2 Beispiel verändern der Wärmeverluste

Mithilfe einer verstärkten Isolation oder zusätzlicher Kühlung über die Seitenwände und einer veränderten Absaugleistung der Ofenoberseite kann die gewünschte Leistungsänderung unterstützt werden. In diesem Beispiel soll der Wärmeverlust über die Seitenwände halbiert bzw. verdoppelt und der Wärmeverlust über die Ofenabsaugung um $\pm 20\%$ verändert werden. Damit verringert sich der Wert der Wärmeverluständerung (Gleichung 4.9) wie folgt:

$$\Delta\dot{Q}_{V,Flex,130} = 0,5 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_V}}\right) \cdot \dot{Q}_{seite} + 0,2 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_V}}\right) \cdot \dot{Q}_{oben} \quad (4.16)$$

$$\Delta\dot{Q}_{V,Flex,200} = - \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_V}}\right) \cdot \dot{Q}_{seite} - 0,2 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_V}}\right) \cdot \dot{Q}_{oben} \quad (4.17)$$

$$\Delta\dot{Q}_{Flex} = \Delta\dot{Q} + \Delta\dot{Q}_{V,Flex} \quad (4.18)$$

Für das aktuelle Beispiel ist das Ergebnis für den veränderten Wärmeverlust unter den bisher angenommenen Vereinfachungen nach 10 Stunden folgendes:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{Q}_{Flex,130} &= -105kW + (0,5 \cdot 0,25 + 0,2 \cdot 0,5) \cdot \left(1 - e^{\frac{-600}{120}}\right) \cdot 300kW \\ &= -38kW \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{Q}_{Flex,200} &= +191kW - (0,25 + 0,2 \cdot 0,5) \cdot \left(1 - e^{\frac{-600}{120}}\right) \cdot 300kW \\ &= +86kW \end{aligned} \quad (4.20)$$

Von den ursprünglich berechneten Werten (Gleichung 4.9) stellt sich nun eine Wärmeverluständerung von ΔQ_{Flex} ein. Diese befindet sich jedoch noch nicht im Gleichgewicht und wird mit sich ändernder Elektrolyttemperatur gestört.

$$\dot{Q}_{V,seite} + \dot{Q}_{V,oben} = (k \cdot A)_{seite/oben} \cdot (T_{Elek.} - T_{Liq.}) \quad (4.21)$$

$$\Delta \dot{Q}_{Temperaturwechsel} = \dot{Q}_{V,seite} + \dot{Q}_{V,oben} - (k \cdot A)_{seite/oben} \cdot (T_{Elek.} - T_{Liq.}) \quad (4.22)$$

Durch die damit verbundene Enthalpieänderung stellt sich zum Zeitpunkt t folgende Wärmeverluständerung ein:

$$\Delta \dot{Q}_t = \Delta \dot{Q} + \Delta \dot{Q}_{V,Flex} + \Delta \dot{Q}_{Temperaturwechsel} \quad (4.23)$$

Die Veränderung des Wärmeverlustes, aufgrund der Temperatur ist für die Wärmebilanz des Ofens vorteilhaft. Obwohl die Veränderung der Temperatur den Prozess aus seinem optimalen Produktionsfenster lenkt, ist diese Änderung ein selbstregulierender Beitrag. Mit fallendem Superheat fällt der Wärmeverlust und mit steigendem Superheat steigt der Wärmeverlust.

4.3.3 Beispiel Phasenänderung Elektrolyt

Die Veränderung des thermischen Gleichgewichts wird zu einem Schmelzen oder Erstarren von Elektrolyt an den Anoden und der Seitenwand führen. Sollte die Gleichung 4.21 im Ungleichgewicht stehen, so wird diese durch die Phasenänderung wieder ausgeglichen:

$$\dot{Q}_{V,seite} + \dot{Q}_{V,oben} = (k \cdot A)_{seite/oben} \cdot (T_{Elek.} - T_{Liq.}) + \Delta H_{Elek.} \cdot \frac{dm_{phasenw.}}{dt} \quad (4.24)$$

Mit dieser Gleichung kann ermittelt werden, wie viel Elektrolyt während der veränderten Stromstärke den Phasenzustand ändert. Dabei sind zwei Vereinfachungen getroffen worden. Die Fläche, an der Elektrolyt erstarren/schmelzen kann, bleibt konstant und zum Zeitpunkt $t=0$ befindet sich der Ofen im Gleichgewicht, also es findet keine Phasenumwandlung statt.

Diese einfache Gleichung zeigt aber, dass mit fallender Temperatur der Wärmeanteil der Erstarrung steigen muss, um ein Gleichgewicht zum Wärmeverlust über die Randkruste ($\dot{Q}_{V,seite}$) und die Anoden ($\dot{Q}_{V,oben}$) zu halten. Der Elektrolyt erstarrt hauptsächlich als Kryolith und hinterlässt somit einen steigenden AlF_3 -Gehalt, welcher zum Absenken der Liquidustemperatur führt, bis ein neues Gleichgewicht gefunden ist [GKM⁺77].

4.3.4 Beispiel Chemische Zusammensetzung

Die, aufgrund der Konzentrationszunahme an AlF_3 , fallende Liquidustemperatur wurde von [RS90] bestimmt als:

$$T_{Liq.+1} = T_{Liq.} + d \frac{T_{Liq.}}{d AlF_3} \cdot \Delta x_{sAlF_3 \text{ in\%}} \quad (4.25)$$

Der Wert für $d \frac{T_{Liq.}}{d AlF_3}$ kann Tabelle 4.2 entnommen werden. [RS90] hat den Wert für eine Zelle mit 2% Al_2O_3 und 4,5% CaF_2 bestimmt. Während der CaF_2 -Gehalt des Ofens sich nur über Monate ändert, hat die kontinuierliche Änderung des Al_2O_3 -Gehaltes direkten Einfluss auf die Liquidustemperatur. Innerhalb der Versuche wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Aluminiumoxidregelung (Kapitel 2.2.2) den Al_2O_3 -Gehalt ausgleicht. Das Verhalten wird mithilfe von Versuchen in Kapitel 5.6 verifiziert.

4.3.5 Fazit

Die Berechnungen zu dem Beispiel zeigen, dass eine alleinige Veränderung der Stromstärke zu massiven Veränderungen der Ofenperformance beiträgt. Die er-

x_{sAlF_3} in%	$d \frac{T_{Liq.}}{d AlF_3}$
6	-2,20
8	-3,24
10	-4,33
12	-5,47
14	-6,64
16	-7,84
18	-9,07
20	-10,32

Tabelle 4.2: Änderungsrate der Liquidustemperatur pro Überschuss an AlF_3

zwungene Änderung der Wärmeverluste wird nicht ausreichen, um den Ofen in einem Gleichgewicht zu halten. Elektrolyt wird erstarren oder aufschmelzen, die chemische Zusammensetzung ändern und folglich Einfluss auf die Produktion nehmen. Die beschriebenen Phänomene und Thesen sollen im folgenden Kapitel untersucht und bestätigt oder widerlegt werden. Des Weiteren soll untersucht werden, ob mit Hilfe der Anpassung des ACD's die Wärmeerzeugung so angepasst werden kann, dass die Wärmebilanz gehalten werden kann. In dem hier beschriebenen Beispiel wäre eine Änderung der Spannung wie folgt notwendig:

$$\Delta U_I = - \frac{\Delta \dot{Q}_{Flex,I}}{I_I} \tag{4.26}$$

$$\Delta U_{130kA} = +292mV$$

$$\Delta U_{200kA} = -430mV$$

Bei einer Stromstärke von 200kA wird mit Reduzierung der Spannung um 430mV der kritische Wert des Ofenwiderstands von $12,9\mu\Omega$ unterschritten (Kapitel 7.2.2). Somit ist ein Halten dieser Stromstärke nicht unbegrenzt möglich.

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Machbarkeit und Pilotprojekt

Im Essener Aluminiumwerk wurden zwölf Öfen mit Wärmetauschern / Shell Heat Exchangern (SHE) im Frühjahr 2014 ausgestattet. Mit Hilfe dieser Wärmetauscher soll die Flexibilisierung des Energieeintrags in Dauer und Betrag erweitert werden, so dass in einem Modulationsabschnitt eine größere oder kleinere Leistungsaufnahme, insbesondere bei stark schwankenden Strompreisen gewährleistet werden kann. Form und Design der Wärmetauscher wurden bereits 2007 entwickelt [Wal07].

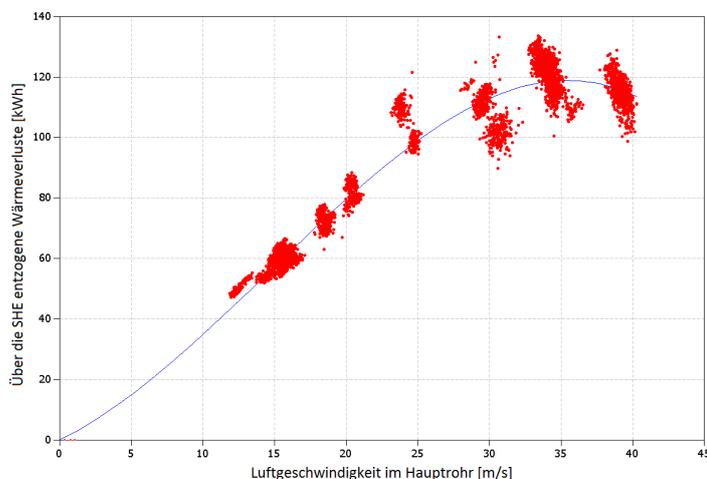


Abbildung 5.1: Wärmeaustrag Ofen 1119



Abbildung 5.2: SHE

Die vorherige Machbarkeitsstudie am Ofen 1119 [Dü12], in den Jahren 2011-2013, hat gezeigt, dass ein Energieabzug mithilfe von Wärmetauschern möglich ist (Abbildung 5.1). Aufgrund der Reihenschaltung der Elektrolyseöfen war es jedoch nicht möglich, die Stromstärke an diesem Ofen ohne Beschädigung der anderen Öfen anzuheben. Am Ofen 1119 wurde daher zur Leistungserhöhung die Spannung angehoben. Mithilfe eines Zusatzgleichrichters, der eine Stromstärke von ca. 25kA aufbringen kann, können die Öfen 1109-1120 in einer größeren Bandbreite an Testsimulationen betrieben werden. Die Seitenwände der Elektrolyseöfen unterliegen im normalen Zustand einer natürlichen Konvektion und Strahlung. Ein vergleichbarer Wärmestrom muss bei Installation sofort bereitgestellt werden. Somit wurden Ventilatoren und Rohrleitungssystem schon vor der Installation der Wärmetauscher in Betrieb genommen. Aufgrund der geringen Änderung der Umgebungstemperatur und der Eigenschaft, dass die Oberflächentemperatur verhältnismäßig hoch gegenüber der Umgebungstemperatur ist, kann die Strahlungswärme vereinfacht für beide Fälle als konstant angenommen werden. Des Weiteren ist die Wärmeleitung über die dünnwandigen Wärmetauscher und Rohrleitungen vernachlässigbar. Durch eine Vielzahl von Messungen wurde der Wärmestrom (4366W/m^2) mithilfe eines Wärmeflusskalorimeters bestimmt [Koy14]. Über die Geschwindigkeit des Volumenstroms der Wärmetauscher konnte dann ein vergleichbarer Wärmeverlust eingestellt werden.

Wärmeverlust der Fläche:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A_{SHE} \quad (5.1)$$

Wärmemenge der Wärmetauscher:

$$\dot{Q} = c_{p,Luft} \cdot \rho_{Luft} \cdot \dot{V} \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Benötigte Geschwindigkeit des Volumenstroms:

$$v = \frac{\dot{q} \cdot A_{SHE}}{c_{p,Luft} \cdot \rho_{Luft} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \Delta T} \quad (5.3)$$

Berechnet wurde ein Wert von ca. 6m/s, der bei Inbetriebnahme eingestellt wurde. Aufgrund der vereinfachten Rechnung (bzgl. Strahlung, Dichte und Wärmekapazität) wurden zur Kontrolle die Temperaturen der Seitenwände des Ofens mit

Werten von vor der Installation verglichen und der Volumenstrom dementsprechend angepasst.



Abbildung 5.3: Ventilatoren



Abbildung 5.4: Rohrleitungssystem



Abbildung 5.5: Wärmetauscher mit Sammelbox

5.1.1 Ausgleichen der Rohrleitungsströme

Der Ausgleich der Volumenströme der Rohrleitungen war eine der Hauptschwierigkeiten. Er erfolgt manuell durch die Anpassung der vier Schieber am Ende

5 Experimentelle Untersuchungen

jedes Hauptkanals. Es wurden Geschwindigkeitsmessungen mittels Strömungssensoren jeweils am Ende und in der Mitte der vier Hauptleitungen vorgenommen. Aufgrund der Verjüngung der Rohrleitungen über deren Länge, sollten die Geschwindigkeiten eine einheitliche Größe haben. Eine grundlegende Beobachtung war, dass es aufgrund der starken Geschwindigkeitsschwankungen, hervorgerufen durch Turbulenzen im System und den sich unterschiedlich thermisch verhaltenden Öfen, nicht möglich ist, alle 8 Messpunkte auf eine Geschwindigkeit zu bringen. Siehe Abbildung 5.6 und 5.7. Basierend auf dieser Diskrepanz wurde beschlossen, die Luft-Geschwindigkeiten unter Verwendung der Rohrleitungsmittelpunktmessungen auszugleichen, da sie stabiler als die Endpunktmessungen erschien.

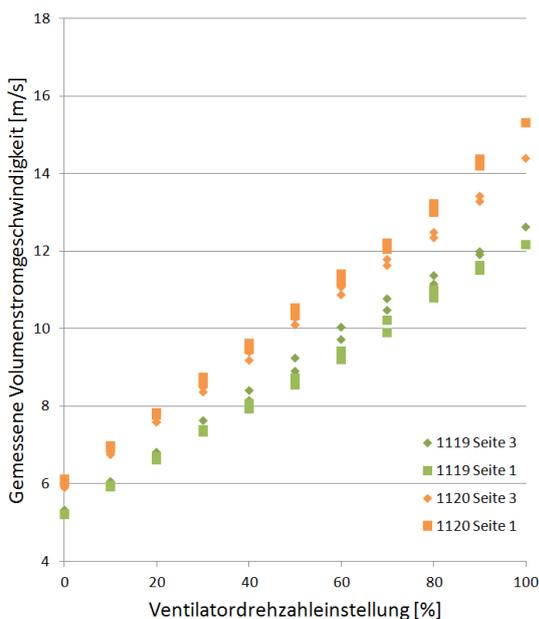


Abbildung 5.6: Endpunkte Juni 2014

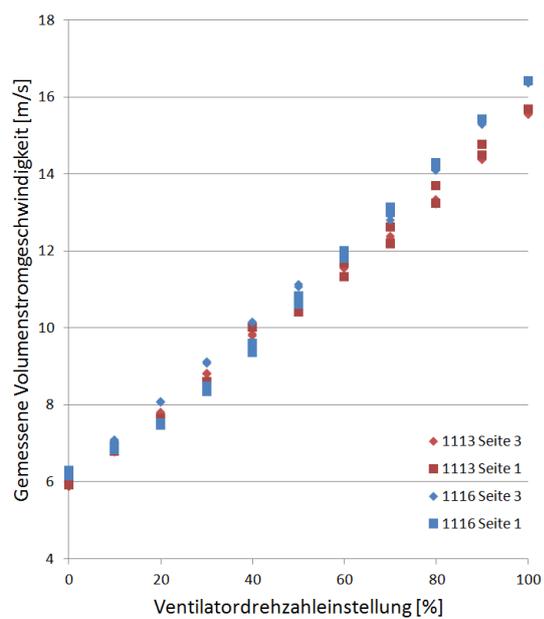


Abbildung 5.7: Mittelpunkte Juni 2014

Es ist möglich die sechs Einzelrohrleitungen, die zu den Sammelboxen am Ofen führen, mittels eines Schiebers zu schließen. Um einen Ofen gezielt mit mehr oder weniger Absaugleistung zu kühlen, wurden im August 2014 alle Schieber auf eine 50% Position gebracht. Des Weiteren hatte dies den Vorteil, dass auf-

grund des höheren Rohrleitungswiderstands die überdimensionierten Ventilatoren in einem höheren Leistungsbereich betrieben werden können. Der Ablauf der nachträglichen erfolgreichen Kalibration ist nachfolgend abgebildet.

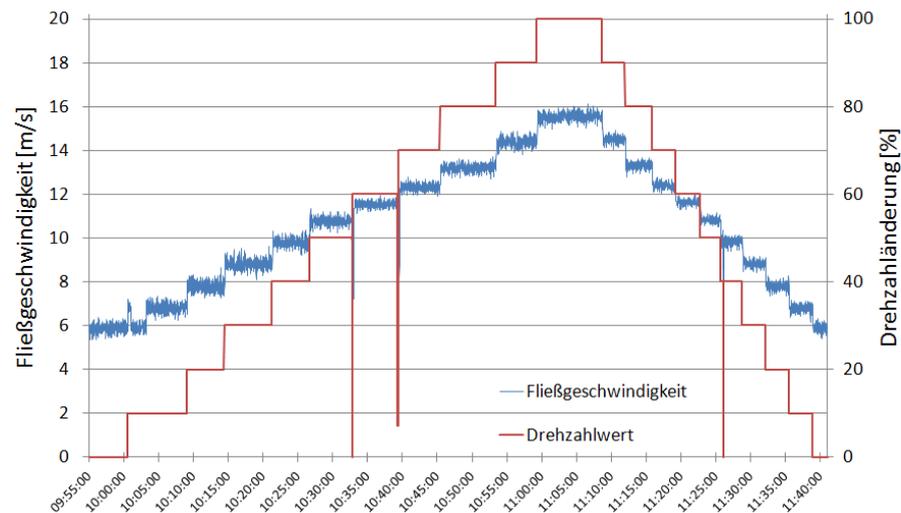


Abbildung 5.8: Mittelpunkte August 2014

Vor der Kalibration waren die Ventilatoren auf ca. 20% eingestellt. Dies entspricht ungefähr 8m/s an den Rohrleitungsmittelpunktmessstellen. Die Kalibrierung wird durch Beschleunigen der Ventilatoren von 0% bis auf 100% und zurück auf 0% durchgeführt. Dabei wird die Linearität in beiden Richtungen sowie die Divergenz der Luftströme in jedem Kanal geprüft. Die Abweichung der einzelnen Rohrleitungsgeschwindigkeiten stieg von etwa 0,6m/s bis über 1,0m/s bei einer stabilen Strömung mit einer Varianz von ca. 5%.

Die Wahl des Ausgleichs mittels der Mittelpunktmessungen hat nur den Anschein einer guten Verteilung. Bei thermischen Änderungen einzelner Öfen sowie Änderung der einzelnen Ofenklappen an den Sammelboxen kann sich die Verteilung massiv ändern. Es ist auch interessant, die Luftströme mit Hilfe der Rohrleitungslufttemperatur statt der Geschwindigkeit zu kalibrieren. Die Temperatur ist, vorausgesetzt gleicher Wärmeverluste an den Öfen, ggfs. eine zuverlässigere und

stabilere Messgröße als die Geschwindigkeit. Dies sollte in Zukunft erneut untersucht werden, insbesondere wenn die Ventilatoren mit hohem Volumenstrom, bei dem die Abweichungen am größten sind, gefahren werden.

Des Weiteren gilt es zu beachten, dass aufgrund der Herstellervorgaben der Ventilator in einem Bereich von 20-50Hz gefahren werden muss. Somit ist die minimal mögliche Strömungsgeschwindigkeit (0%) immer noch 20Hz und ca. 6m/s Strömungsgeschwindigkeit. Im Falle von negativer Strommodulation wird es notwendig sein, mittels z.B. eines Bypass-Systems, den Volumenstrom zu verringern.

5.1.2 IBA PDA Software

Die IBA PDA Software wurde installiert um alle Daten, der Testgruppe zu erfassen, anzuzeigen und zu speichern. Dies beinhaltet:

- Seitenwandtemperaturen der Öfen
- Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen
- Temperaturen der Abgase, welche zu der Trockenadsorptions-Anlage (TA) führen
- Ofenparameter wie Spannung, Elektrolyttemperatur, Stromstärke etc.

Während der Inbetriebnahmezeit wurde das System weiterentwickelt, um den Anforderungen der Benutzer und der Auswertung gerecht zu werden. Die Hauptfunktionalitäten beinhalten:

- Individuelle Echt-Zeit-Grafiken (Abbildung 5.9), welche alle installierten Temperaturen und Volumenstromgeschwindigkeiten anzeigen, sowie Daten aus dem TRIMET-System, wie Spannung und Stromstärke im fünf Minuten Rhythmus, wiedergeben.
- Eine Übersichtsgrafik (Abbildung 5.10), welche den aktuellen Status jedes Ofens wiedergibt und mittels Farbkodierung z.B. Temperaturabweichungen aus dem Regelbereich sofort anzeigt.

- Temperaturalarme per Mail, wenn Seitenwandtemperaturen der Öfen außerhalb des Kontrollbands lagen.
- Eine Ventilatoren-Maske zur manuellen und automatischen Regelung der Ventilatoren.



Abbildung 5.9: Echt-Zeit-Grafik

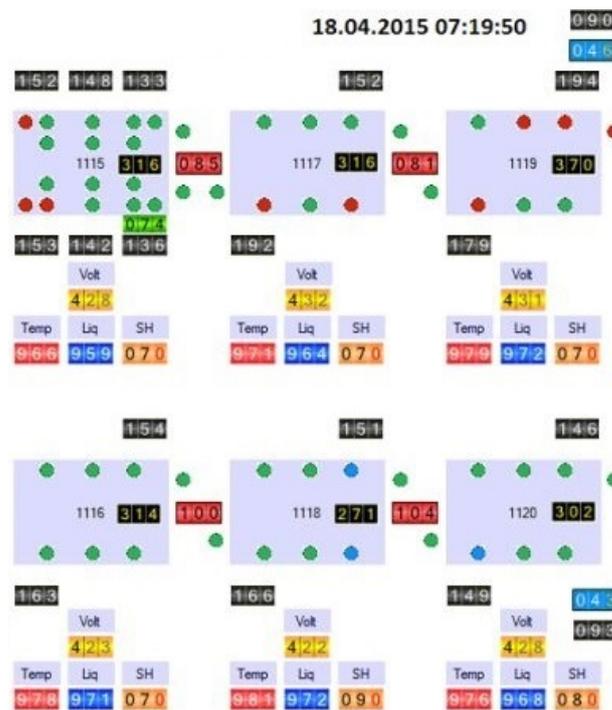


Abbildung 5.10: Übersichtsgrafik

5.2 Positive Modulationsversuche

Länger anhaltende positive Modulationen wurden durchgeführt, um den Einfluss hoher Stromstärken (+10kA, +20kA) auf das System zu beobachten. Diese wurden sowohl im Juni/Juli bei der Inbetriebnahme als auch im August 2014 bei der zweiten Versuchsreihe durchgeführt.

Generell ist das Design des EPT14 Ofens robust genug [EP08], es kurzzeitig mit Stromstärkeänderungen von +10kA aufzunehmen. Mithilfe der Wärmetauscher sollten jedoch Flexibilität, Dauer und Menge der Stromstärke erhöht werden.

Abbildung 5.11 zeigt die durchschnittliche Elektrolyt- und Liquidustemperatur aller Öfen mit gerader Ofennummer über den Zeitraum der +10kA positiven Modulation. Da die Öfen mit gerader und ungerader Ofennummer ein gleiches Verhalten während des Versuchs zeigten, ist diese Auswertung repräsentativ für die

gesamte Testgruppe. Alle anderen Messwerte können im Anhang gefunden werden. Mit Start der Modulation ist ein rapider Anstieg der Temperaturen zu beobachten. Der Anstieg der Elektrolyttemperatur ist durch die massive Zunahme des Energieeintrags zu begründen, während die erhöhte Liquidustemperatur und die damit verbundene chemische Änderung ohne eine Zugabe von Elektrolytbestandteilen (Soda) in so kurzer Zeit nicht zu erwarten war. Dies wurde in Kapitel 3.1 weiter erläutert.

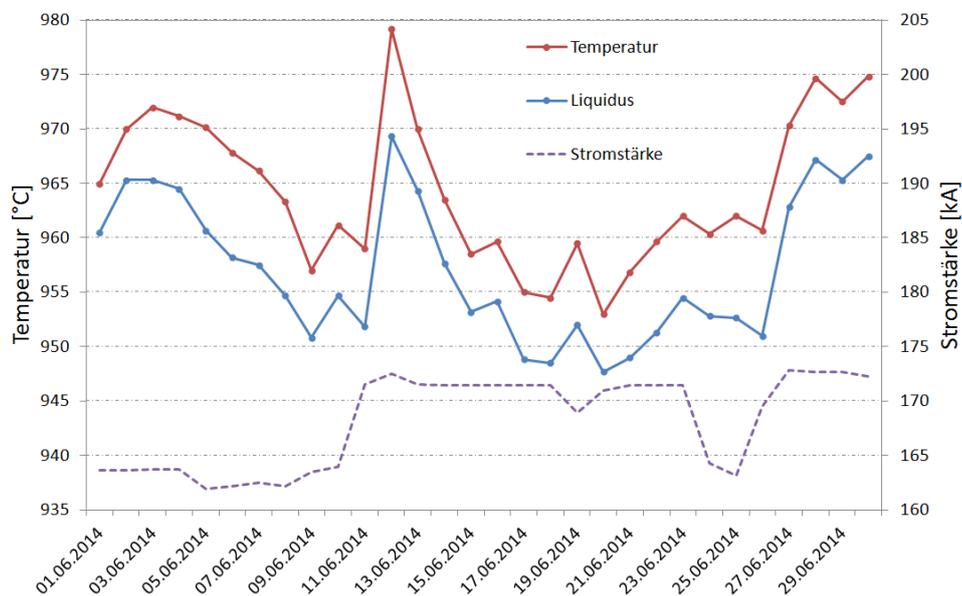


Abbildung 5.11: MW der Elektrolyt- und Erstarrungstemperatur der Öfen mit gerader Nummer

Zusammen mit der Stromstärkeerhöhung wurde die PSP Spannung abgesenkt (Abbildung 5.12), um den Energieeintrag zu verringern. Diese Möglichkeit ergab sich aufgrund der aus den Messungen in Kapitel 3.3.3 getroffenen Annahme, dass der ACD weiter reduziert werden kann. Mittels der Reduzierung des ACD (ca. 100-150mV) und einem minimalen Anheben der Volumenstromgeschwindigkeit im Hauptkanal von 7,5m/s auf 8,3m/s konnten die Temperaturen nach einem Tag wieder in den Temperaturbereich vor Beginn des Versuchs gebracht werden und über die Versuchsdauer dort gehalten werden.

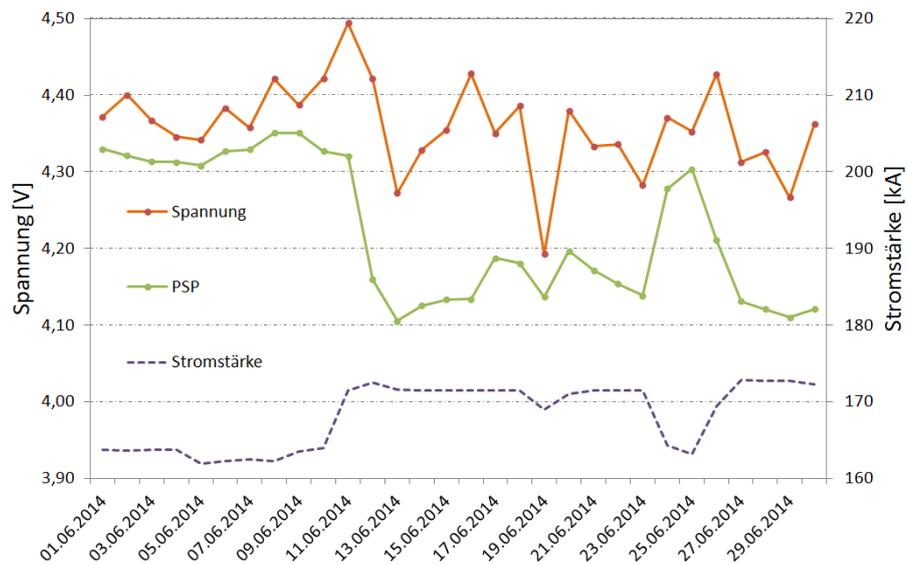


Abbildung 5.12: MW der Spannung und PSP der Öfen mit gerader Nummer

Die Unruhe der gesamten Versuchsgruppe ist über den Versuchszeitraum leicht angestiegen, jedoch nicht über einen Wert von $0,1\mu\Omega$, der den Ofen als „Unruhig“ klassifizieren würde. Die Veränderung lässt sich durch die Spannungsverringerung erklären.

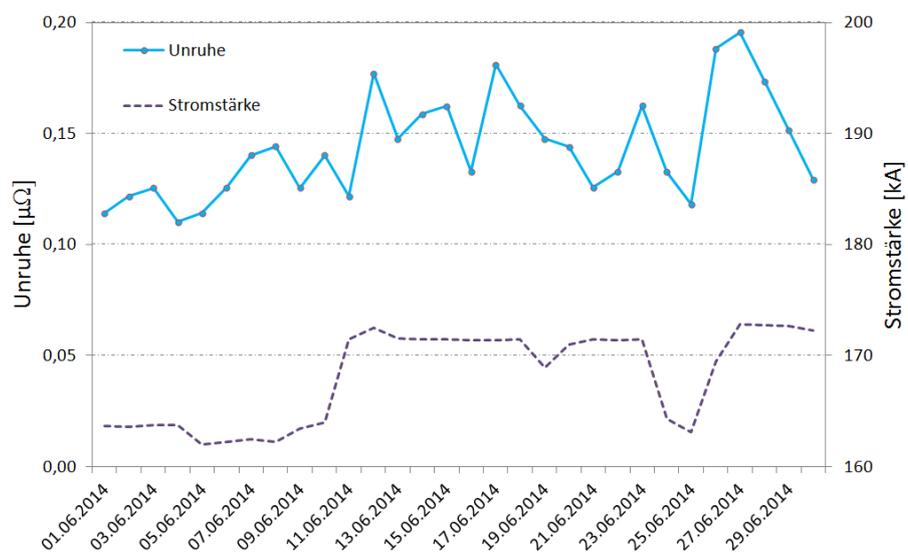


Abbildung 5.13: Ofenunruhe

Während der ersten Testphase der 10kA positiven Modulation, in der das Verhalten noch erlernt wurde, wurden die Versuche noch eher „konservativ“ durchgeführt. Rückblickend waren die Ergebnisse zufriedenstellend und es traten keine Probleme, weder mit den Öfen noch mit den Wärmetauschern, auf. Im Vergleich mit den Werten aus Juni 2014 ist die Stromausbeute stabil bei 92,5% und der Energieverbrauch abgesunken auf 13,75kWh/kg. Dies ist zurückzuführen auf die Verringerung des Anoden-Kathoden-Abstandes. Eine intensivere Untersuchung zur Verringerung des ACD's sowie die Ergebnisse einer Versuchsreihe sind in Kapitel 3.3.3 zu finden.

5.2.1 Kurzzeitige positive Modulation

Diese Phase der Studie konzentrierte sich auf kurzzeitige tägliche Modulationen mit zunehmender Größe sowie der Verringerung der Zeit zwischen den Modulationen. In der ersten Woche wurden Modulationen mit +10kA für zwölf Stunden an drei Tagen, mit einem Tag Pause zwischen den Modulationen, angesetzt. In der zweiten Woche standen +17,5kA an drei Tagen, mit einem Tag Ruhezeit, auf dem Plan. In der dritten Woche ging es dann mit fünf +10kA Modulationen ohne Ruhezeiten weiter und die Basisstromstärke wurde danach auf +10kA stabilisiert. Von dem erhöhten Basisniveau (172,5kA) konnten in der letzten Woche -10kA Modulationen für zwölf Stunden täglich sowie +7,5kA Modulationen (auf 180kA) während der Nacht gefahren werden. Das obere Limit von +17,5kA bzw. 180kA ist durch die Prozesssteuerung gegeben. Nähere Erklärungen dazu sind im Kapitel 7.1.2 gegeben.

Insgesamt haben die positiven Modulationsversuche sehr gut funktioniert. Eine Schlüsselvariable war auch hier wieder die Reduzierung des ACD. Während der +10kA Modulation wurde der OSP um 100mV reduziert und während der +17,5kA Modulation um 150mV. Teilweise führte dies zu einer leicht erhöhten Unruhe, besonders nach dem Anodenwechsel oder der Metallentnahme, die jedoch in allen Fällen durch das normale Unruhe-Lösch-Programm beseitigt werden konnte. Dieses Programm gibt für einen kurzen Zeitraum eine Mehrspannung

in proportionaler Höhe zur Unruhe, die dann in 15 Minuten Schritten wieder komplett abgebaut wird.

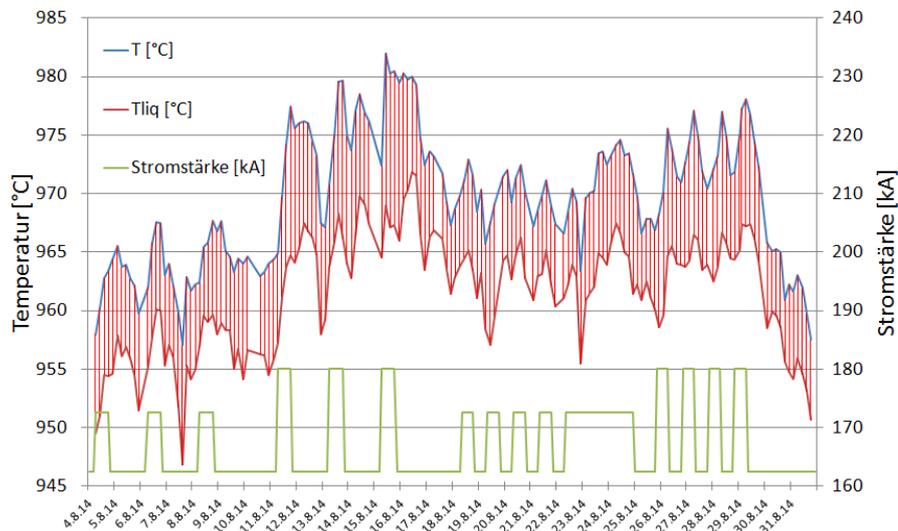


Abbildung 5.14: Mittelwerte der Temperaturen und Stromstärke

5.2.2 Flusstemperatur und Superheat

Die hohe Anzahl an Fiberlab-Messungen (alle 4h) des Mess-Teams gab nützliche Informationen über Temperatur und Superheat Änderungen des Ofens während der Modulation. Der normale Messzyklus ist ein 12h Rhythmus für die Temperatur sowie ein 24h Rhythmus für den Superheat. Des Weiteren wurden Randkrustenmessungen durchgeführt, die normalerweise nicht zum Routine-Betrieb der Elektrolyse gehören.

Auffallend ist der rasche Anstieg der Flusstemperatur und des Superheats, obwohl die Spannung während der stark positiven Modulation reduziert wurde. Diese Veränderung des Energieeintrags wird durch die relativ langsame Abnahme der Temperaturen nach Modulationsende verschärft, da der Ofen bis zum Zeitpunkt der nächsten Modulation, ein bis zwei Tage später, noch nicht wieder auf normalem Temperaturniveau war. Es wurde eine Maximaltemperatur von

rund 998°C an einem Ofen erreicht, mit Mittelwerten der geraden und ungeraden Seiten von 986 und 982°C. Im Gegensatz zu den längerfristigen Modulationen konnten die Öfen deshalb nicht wieder in einen stationären Zustand der Wärmebilanz mit normaler Betriebstemperatur und Superheat, zurückkehren, sondern wechselten die Zustände ständig. Die einzelnen Messergebnisse werden im folgenden näher erläutert, um den Drift der Temperatur und die Theorie, dass der Wärmehaushalt sich ändert, mithilfe weiterer Parameter zu bestätigen.

Bei vereinfachter Rechnung mittels der Annahme, dass ca. die Hälfte der Spannung zur Produktion von Aluminium benötigt wird, bedeutet ein Anstieg von 17,5kA, bei gleichzeitiger Spannungsabsenkung um 150mV, einen Anstieg um 8kW in der Wärmeerzeugung. Bei dieser Produktionsweise gilt es zu beachten, dass durch das Halten der Ofenspannung bereits eine Verringerung des ACD's, zusätzlich zu der 150mV Spannungsabsenkung, erzeugt wird. Dies geschieht, da aufgrund des gleichbleibenden elektrischen Widerstands der einzelnen Ofenmaterialien die Spannung proportional mit steigender Stromstärke steigt.

Vereinfachte Rechnung:

$$P_Z = (I + I_Z) \cdot (U - U_P - U_E - U_V) - I \cdot (U - U_P - U_E) \quad (5.4)$$

I	162,5 kA	Basisstromstärke
I_Z	17,5 kA	Zusatzstromstärke
U	4,36 V	Ofenspannung
U_P	2,0 V	Produktionsspannung
U_E	0,36 V	Externe Spannungsverluste
U_V	0,15 V	Spannungsverringerng

Im Versuch stieg die Flusstemperatur um etwa 10 bis 15°C innerhalb von zwölf Stunden. Der Abfall der Temperaturen nach der Modulation dauerte etwa 28 bis 32 Stunden, wobei die Abnahme größtenteils zum Zeitpunkt der Anodenwechsel auftrat. Es gilt zu beachten, dass der Temperaturanstieg stärker an den Öfen

5 Experimentelle Untersuchungen

mit ungerader Ofennummer auftrat, was auf den Zeitpunkt des Anodenwechsels zurückzuführen ist. Dieser wurde an den Öfen mit ungerader Ofennummer zwischen den Modulationsphasen durchgeführt, während an den anderen Öfen der Anodenwechsel während der Modulation stattfand.

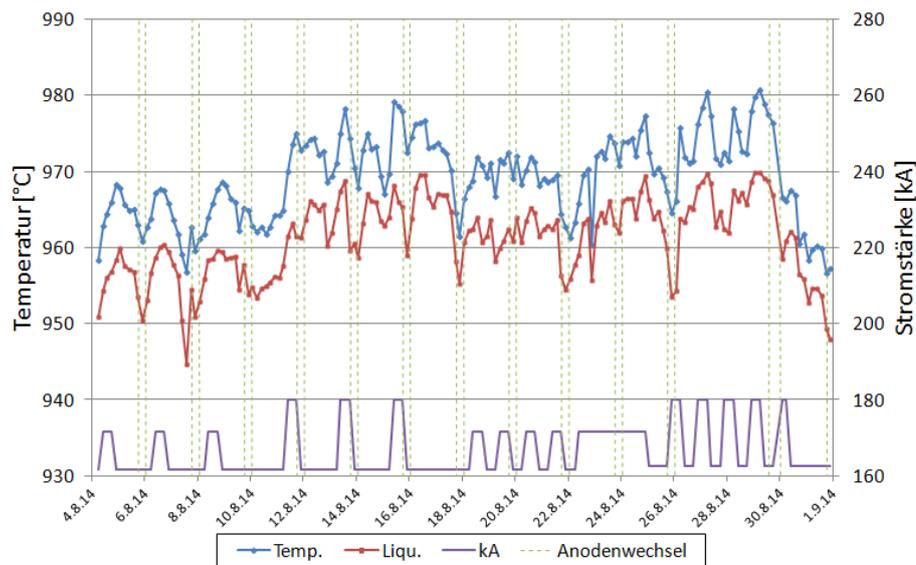


Abbildung 5.15: Mittelwert der Elektrolyt- und Erstarrungstemperatur (gerade Ofennummer)

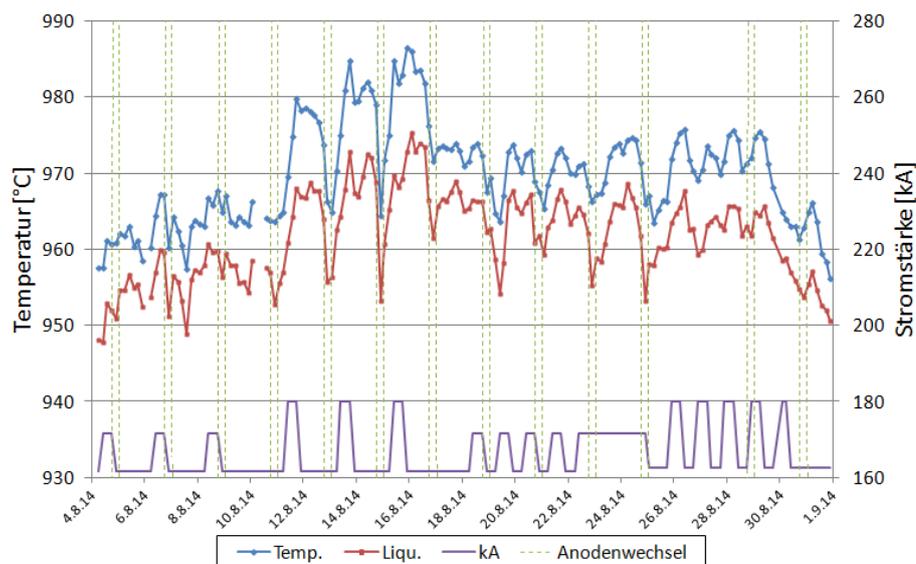


Abbildung 5.16: Mittelwert der Elektrolyt- und Erstarrungstemperatur (ungerade Ofennummer)

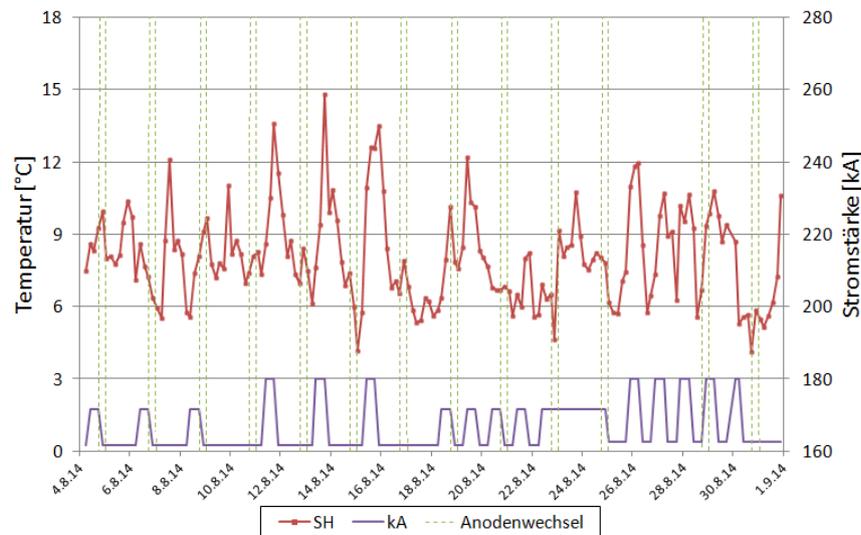


Abbildung 5.17: Mittelwert des Superheats (gerade Ofennummer)

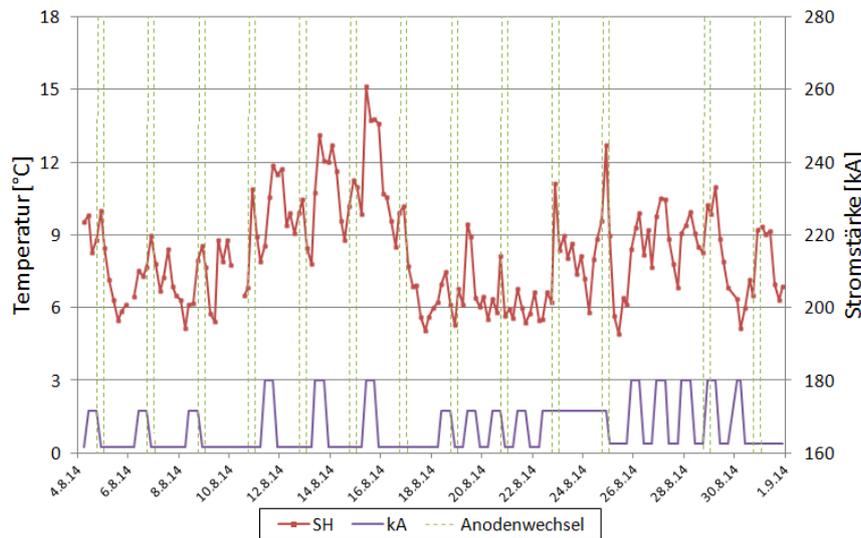


Abbildung 5.18: Mittelwert des Superheats (ungerade Ofennummer)

Obwohl die Temperaturen stark schwanken, ist jedoch kein Aufwärtstrend des Superheats während der Modulation festzustellen. Das bedeutet, dass ein Anstieg der Elektrolyttemperatur jedes Mal mit einem Anstieg der Flusstemperatur einhergeht. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass bei steigendem Energieeintrag Randkruste und Eindeckmaterial, welche einen höheren Schmelzpunkt haben, gelöst werden. Dieses Aufschmelzen spiegelt sich in den Ergebnissen der Randkrustenmessung wider (Abbildung 5.22 und 5.23).

Die 9-Box Steuerung reagiert auf die erhöhte Erstarrungstemperatur durch Anheben der AlF_3 Dosierung (Abbildung 5.19). Diese Einflussnahme in den Chemiehaushalt kann zur Stabilisierung der Temperaturen während der zweiten Hälfte der Modulation beigetragen haben; jedoch führte dies zu einem massiven Einbruch der Temperaturen nach Modulationsende und dem Erstarren von Elektrolyt sowie der Bildung von Randkruste nach Wegfall der erhöhten Stromstärke. Die durchschnittliche AlF_3 Zugabe stieg während der Modulation von ca. fünf auf 20kg AlF_3 pro Tag.

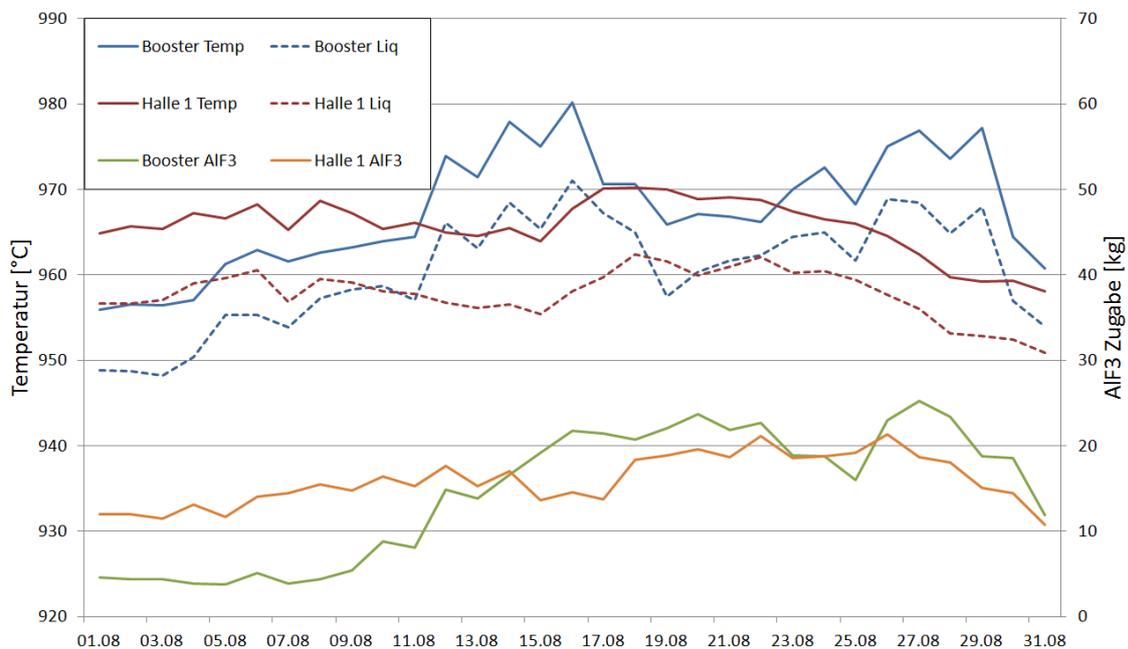


Abbildung 5.19: Temperaturen und Dosierung der Boostergruppe und Halle 1 (AT-Öfen)

Weitere Versuche nach Installation der Magnetfeldkompensation haben von dieser Erkenntnis profitiert, da mittels einer Direkteingabe bzw. über das Ausstellen der AlF_3 -Steuerung ein Überfüttern verhindert werden konnte. Die Öfen wurden dann während der Modulationszeit mit einer konstanten AlF_3 -Dosierung gefahren und der Einfluss der Wärmetauscher mittels größerem Volumenstrom erhöht (siehe Kapitel 5.6).

5.2.3 Randkruste und Elektrolytvolumen

Während der Versuche wurden sowohl Randkrustemessungen, mit einem vom Autor selbst entwickelten Messgerät, als auch Elektrolytinhaltsbestimmungen durchgeführt. Eine Inhaltsbestimmung wird mithilfe von Strontium durchgeführt. Dafür wird eine Elektrolytprobe genommen und anschließend fünf kg Strontium in das Elektrolyt gemischt. Nach ein und zwei Stunden werden weitere Proben genommen. Bei der Nullprobe und den beiden anderen Proben wird dann anhand des Strontiumgehalts das Elektrolytvolumen bestimmt. Es wird Strontium verwendet, da es sich in Kryolith gut und in Aluminium nicht löst. Alle Messungen wurden an den vier Öfen 1113-1116 wöchentlich durchgeführt.

Aufgrund der Gegebenheiten ist die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Randkrustenmessung und auch der Inhaltsbestimmung eher schwach. Das Messgerät ist aufgrund des langen Arms (Arbeitssicherheit) und der Hitze durch Biegung beansprucht und bei der Inhaltsbestimmung muss davon ausgegangen werden, dass nicht immer alles Material in den Ofen fällt. Besonders die Werte von Ofen 1115 sind auffallend, der laut Messung 25cm Seitenwand verliert und demnach vorher stark eingefroren war, was



Abbildung 5.20: Randkrustenmessgerät

der Superheat nicht widerspiegelt. Die Ansichten in Abbildung 5.22 und 5.23 sind vertikal auf den Metallstand normiert. Aufgrund von Metallbewegung und Gasblasenbildung durch den Prozess ist über dem Metallstand meist die dünnste Stelle der Randkruste. Gleichwohl konnte bei allen Öfen eine Verringerung der Randkruste, wie auch eine Zunahme von flüssigem Elektrolyt, nachgewiesen werden. Alle Messungen wurden von einem Studenten (Thomas Pursche) der

5 Experimentelle Untersuchungen

BUW durchgeführt, um personelle Messabweichungen zu vermeiden [Pur14]. Aufgrund der subjektiven Natur der Messeinrichtung wurden für Folgemessungen nur zwei Mitarbeiter des Mess-Teams bestimmt, weitere Messversuche zu begleiten, um eine gute Reproduzierbarkeit zu halten.

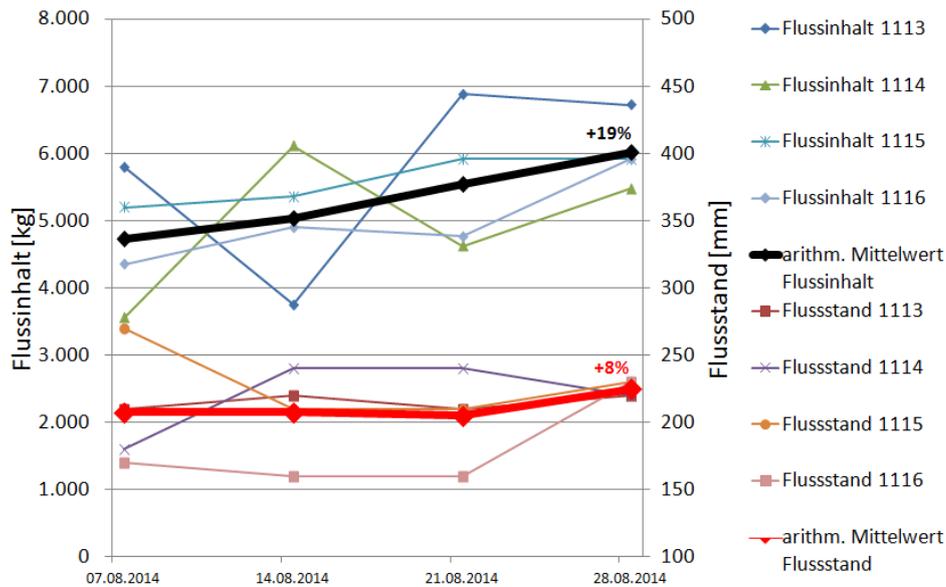


Abbildung 5.21: Flussinhalt und Flusstand während der Modulation

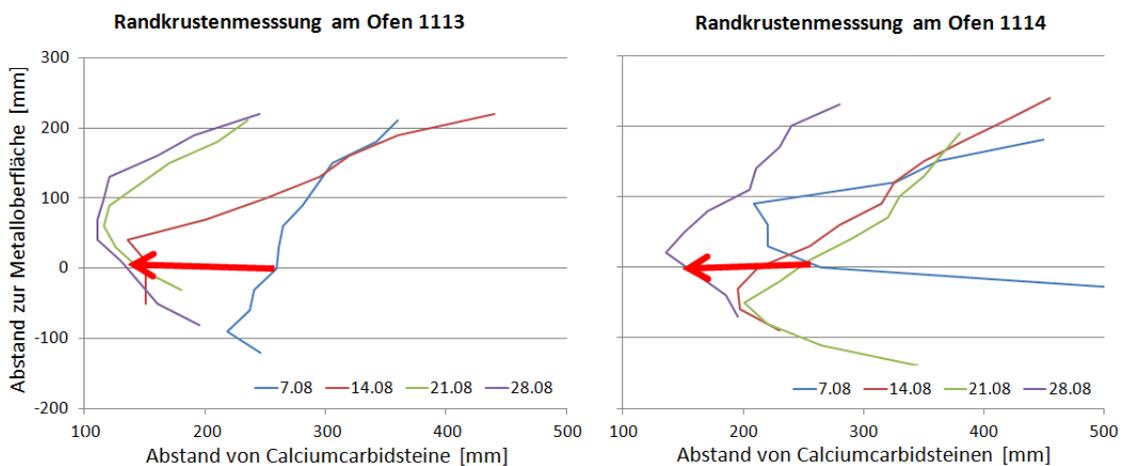


Abbildung 5.22: Randkrustenmessungen während der Modulation Teil a

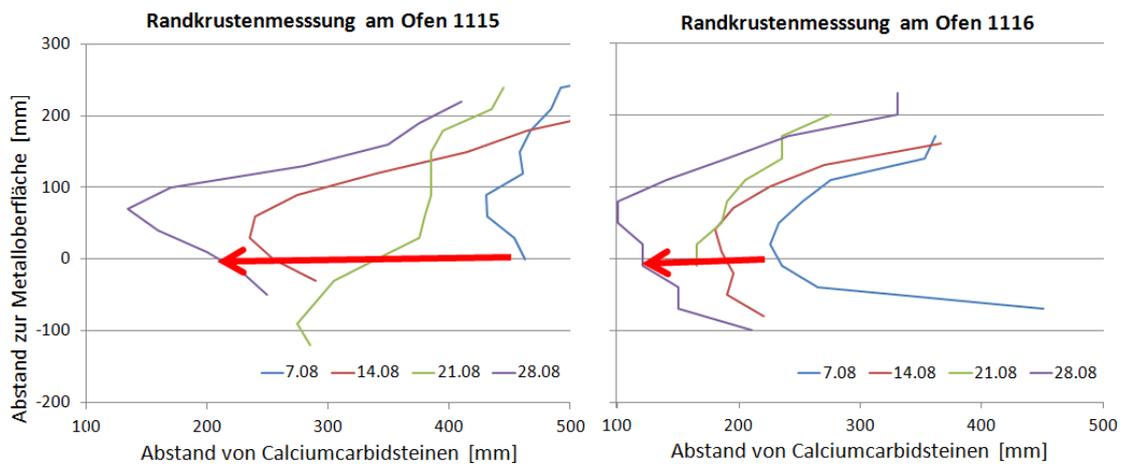


Abbildung 5.23: Randkrustenmessungen während der Modulation Teil b

5.2.4 Seitenwandtemperaturen und Ventilatorsteuerung

Die Einstellung des Ventilators dieser ersten Versuchskampagnen waren eher „gefühlsmäßig“ und mit dem Blick auf den PDA, die maximalen Ofenwandtemperaturen nicht zu überschreiten. Mithilfe von Alarmmails ab 400°C konnten die Ventilatoren kurzfristig so eingestellt werden, dass die Temperaturen im Bereich von 300-350°C blieben. Die meisten Öfen unterlagen während der Versuchszeit einem Anstieg von ca. 10-50°C mit einigen Ausreißern bis 370°C, während die Temperaturen am Ende der Versuchsreihe wieder sanken (Abbildung 5.24). Dies spiegelt den Elektrolyttemperaturverlauf (Abbildung 5.14) sehr gut wider. Die Veränderung der Seitenwandtemperaturen wird die Randkruste beeinflussen und hat mit Sicherheit zu deren Verringerung während des Versuchs beigetragen. Allerdings ist dies nicht der einzige Einfluss, auch der Superheat (siehe Kapitel 3) hat einen großen Einfluss auf die Seitenwandstärke. Nach Gleichung 5.2 wurden in dem Versuchszeitraum 50-80kW Wärmeenergie über die Wärmetauscher abgesaugt (Abbildung 5.28). Sowohl Ofenwandtemperaturen, Elektrolyttemperatur als auch der Verlust von Seitenkruste zeigen, dass mehr Wärme über die Ofenwand abgesaugt werden muss, um die Parameter stabil zu halten.

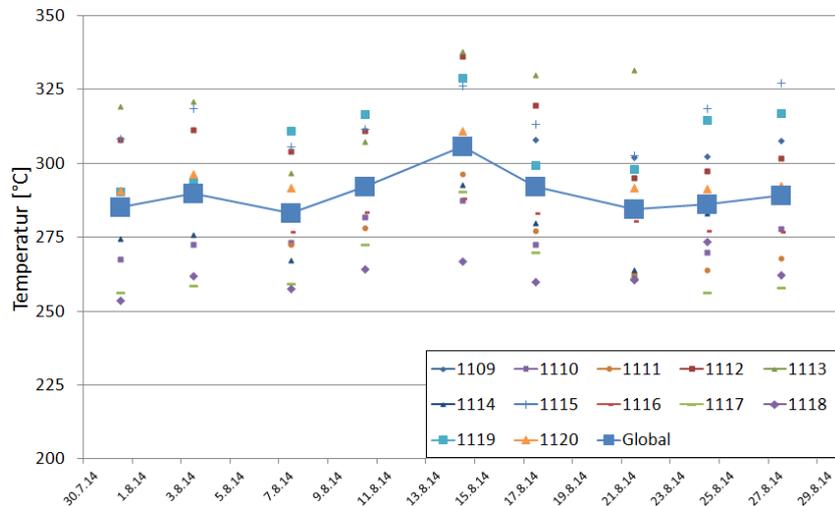


Abbildung 5.24: Seitenwandtemperaturen während der Modulation

Bereits 2011 wurde an Ofen 1119 durch den Autor gezeigt, dass höhere Wärmeverluste (Abbildung 5.1) über die Seitenwand möglich sind. Mit steigender Luftgeschwindigkeit tritt jedoch eine Sättigung auf, bei der keine höheren Wärmeverluste mit der Umgebungsluft erzielt werden können. Der dort erreichte maximale Wärmeverlust betrug 110kW. Dies konnte im Mai 2015 bestätigt werden (Abbildung 5.25).

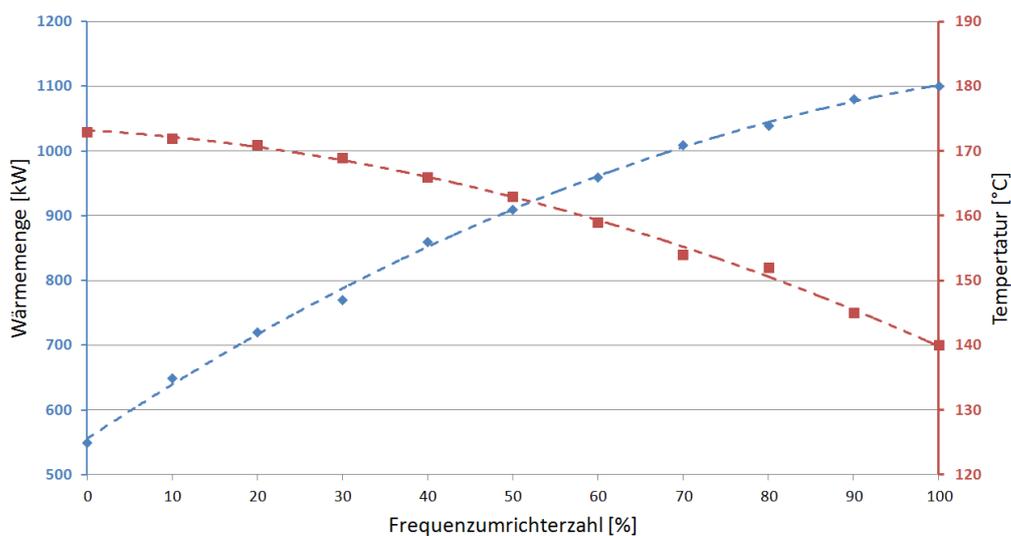


Abbildung 5.25: Wärmeartrag der Boostersektion

Für die nachfolgenden Versuche wurden vorerst alle Sensoren an einem Ofen zu einem Median zur Überwachung zusammengefasst. Zur Vermeidung von Fehlerquellen wurden stark abweichende Temperaturen mit Alarmen versehen sowie eine Standardabweichung eingeführt. In weiteren Versuchen soll nachgewiesen werden, ob eine konstante Seitenwandtemperatur oder verschiedene Zieltemperaturen während der Versuche gehalten werden sollten. Mittels eines Thermoelektrischen Modells [NJ16] kann dann über die Zieltemperaturen der Wärmeverlust eingestellt und die Wandstärke gehalten werden. So kann bei höheren Stromstärken (größere Wärmeentwicklung) mit niedriger und bei niedrigeren Stromstärken (weniger Wärmeentwicklung) mit hoher Wandtemperatur reagiert werden.

Die Philosophie der Seitenwandtemperaturkontrolle ist ähnlich der der Spannungs-/ACD- Anpassung. Mit einem einfachen Modell, dem Energycounter (Kapitel 6), soll eine Korrelation zwischen der notwendigen Seitenwandtemperatur und der erzeugten Wärmeenergie geschaffen werden. Dabei ist zu beachten, dass Veränderungen der Seitenkruste sehr langsam (über mehrere Tage) auftreten [Sol06] und dieser Ansatz möglicherweise nicht für die kurzfristige Modulation (täglich) wirksam ist. Gegebenenfalls ist ein stabiler Wärmeverlust mit stabiler Seitenwandtemperatur bei dieser Modulation effektiver.

5.2.5 Einfluss auf Energieverbrauch und Stromausbeute

Die Auswirkungen der Modulation sind nicht ohne weiteres in Stromausbeute (CE) und Energieverbrauch (EC) ersichtlich. Verglichen wurde die Boostergruppe mit Öfen der Halle 1, die die gleichen Anoden bekommen und nicht im Frishtonerde-Bereich liegen. So konnten zwei große Einflussfaktoren bereits eliminiert werden. Bei der Berechnung der CE und EC treten starke Schwankungen auf, die zum Großteil auf die Saugmengen zurückzuführen sind. Die Saugmenge wird durch eine stark Mitarbeiter und Gegebenheiten abhängige Messung bestimmt. Des Weiteren ist die Sauggenauigkeit im Fahrzeug auf ca $\pm 150\text{kg}$ beschränkt. Die Sauggewichte werden jedoch von einer Waage der Gießerei mit \pm fünf kg Abweichung aufgenommen. Somit kann der Langzeittrend zur Aus-

5 Experimentelle Untersuchungen

wertung herangezogen werden. Dieser zeigt über die Dauer der Kalenderwochen 19-37 eine ca. 1% höhere Stromausbeute, jedoch fallen beide Gruppen um ca. 1,2%. Dieser Abfall ist auf eine deutlich schlechtere Anodenqualität, die in beiden Gruppen eingesetzt wurde, zurückzuführen [DBMR14].

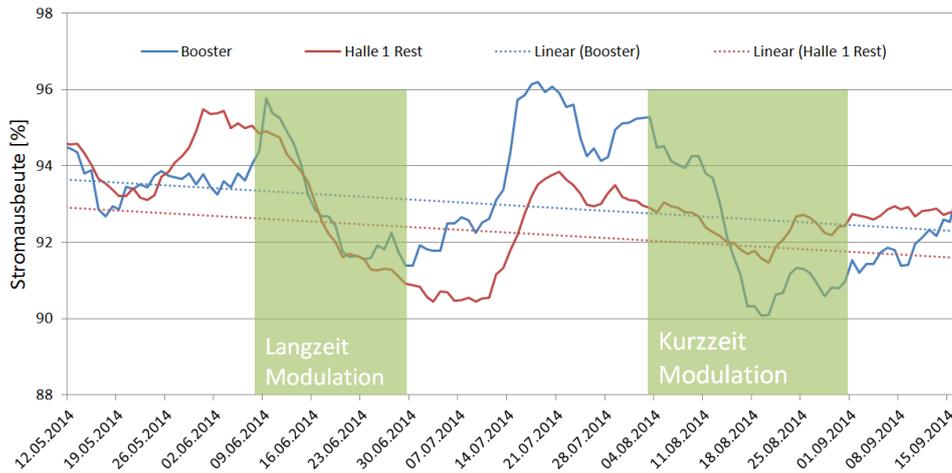


Abbildung 5.26: 30 Tage Mittelwert der Stromausbeute während der Modulation

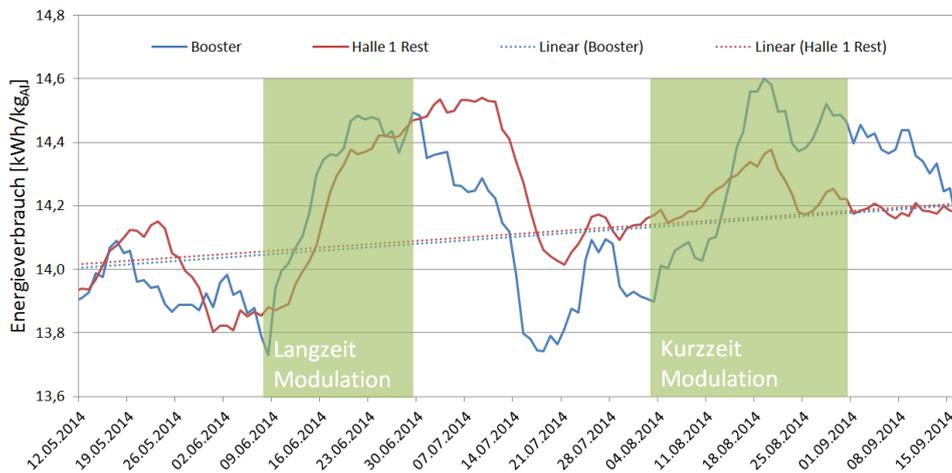


Abbildung 5.27: 30 Tage Mittelwert des Energieverbrauchs während der Modulation

Der Energieverbrauch ist in beiden Gruppen nahezu identisch, mit einem Anstieg von ca. 0,25kWh/kgAl über die gesamte Versuchszeit. Der Trend zeigt auch hier,

dass die Versuche keinen großen Einfluss auf den Energieverbrauch hatten. Interessant hingegen ist das stärkere Schwingen der Boostergruppe während und nach den Versuchen. Aufgrund des Seitenwandverlusts konnte sich das Metall ausbreiten und es wurden bei gleichem Volumen niedrigere Metallhöhen in der Versuchsphase gemessen.

5.2.6 Wärmeeintrag und SHE-Wärmeverlust

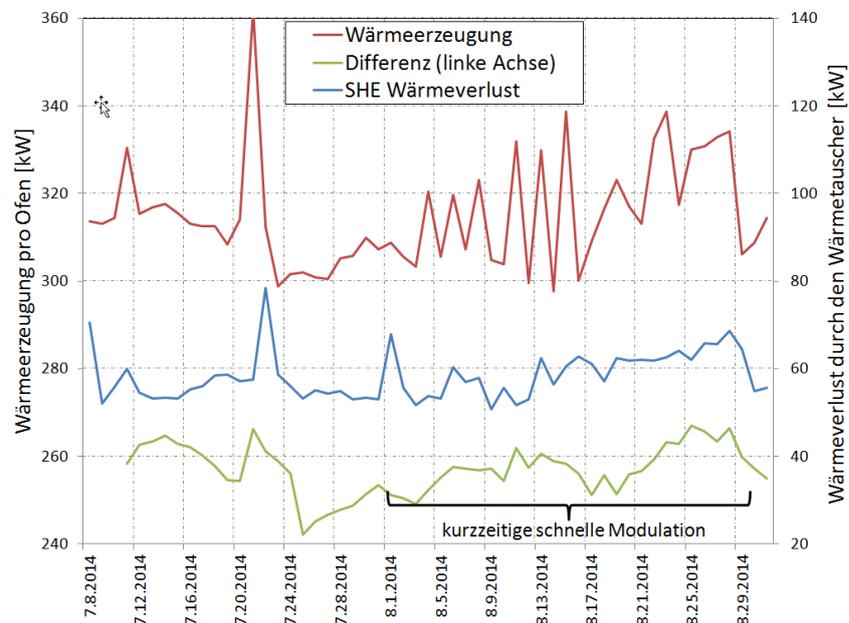


Abbildung 5.28: Wärmeeintrag und SHE-Wärmeverlust

In Abbildung 5.28 ist die am Tag durchschnittlich erzeugte Wärmeenergie sowie der durch die Wärmetauscher entzogene Wärmeverlust über die Seitenwand abgebildet. Im Zwei-Tagesmittel der Differenz aus Wärmeenergie und Wärmeverlust (berechnet nach 5.2) ist ein leichter Anstieg zu sehen. Bei der Berechnung wurden 10°C zur Abgastemperatur hinzugerechnet, da diese Differenz mittels manueller Messung bestimmt wurde und den Temperaturverlust vom Ausgang des Wärmetauschers zur Messstelle berücksichtigt. Aufgrund der Tatsache, dass

die Daten erst nach vollständiger Installation des PDA's zur Verfügung standen, konnte nicht auf diesen Anstieg reagiert werden. Während der Versuche stieg der Wärmeeintrag um 20-40kW an, während der Wärmeverlust über die Seitenwand lediglich um 10-15kW erhöht wurde. Dies ist ein weiterer Indikator für den Seitenwandverlust und den Anstieg der Temperaturen. Es wird nicht die gesamte Energiedifferenz über die Wärmetauscher entzogen werden können, da auch ein Großteil der Wärme über die Eindeckung verloren geht (Kapitel 3.2), jedoch müssen in der Regelung die Differenz und eine zeitlich abgestimmte Reaktion integriert werden (vergleiche 6).

5.2.7 Fazit der positiven Modulation

Die Theorie, den Wärmeverlust mittels der Wärmetauscher zu regeln, ist positiv bestätigt. Die Praxis zeigt aber, dass bei den positiven Modulationstests mit zu geringem Einfluss (Volumenstrom) vorgegangen wurde, um die Energiebilanz und damit die Seitenwandstärke zu halten. Für eine erfolgreiche Regelung müssen Wärmeeintrag und Wärmeverlust über den Zeitraum der Modulation angezeigt und dementsprechend reagiert werden. Ein regelbarer Abluftstrom über die Oberseite des Ofens unterstützt das Vorhaben. Des Weiteren ist eine Anpassung der Regelung des Chemie- und Spannungshaushalts unumgänglich. Für eine eindeutige Aussage zu Stromausbeute und Energieverbrauch müssen Langzeitmodulationen über mehrere Monate durchgeführt werden.

5.3 Negative Modulationsversuche

Während der negativen Modulation wurde die Stromstärke von der Basisstromstärke von 162kA um bis zu 12kA reduziert und um bis zu 18kA angehoben. In dieser Phase wurden die Auswirkungen von negativer Modulation auf die Öfen untersucht. Aufgrund der Tatsache, dass eine negative Modulation nur mit der ganzen Ofenhalle (120 Öfen) durchgeführt werden kann, musste die Dauer und Amplitude der negativen Modulation auf ein vertretbares Maß reduziert werden.

Somit wurde eine maximale Dauer von 28 Stunden für -6kA und 24h für -12kA festgelegt, um die 108 Öfen ohne Wärmetauscher nicht zu beschädigen. Des Weiteren wurde diesen Öfen während der Modulationszeit eine Zusatzspannung über das Anheben des ACD's gegeben. Schwerpunkt der negativen Modulation war, herauszufinden wie die Wärmetauscher unter reduziertem Wärmefluss, hervorgerufen durch eine niedrigere Stromstärke, den Ofen isolieren können. In der Vergangenheit konnten Tests mit verringertem Wärmeeintrag nur bedingt, mit Hilfe eines kleineren ACD's, durchgeführt werden.

5.3.1 Wärmehaushalt der Öfen ohne Wärmetauscher

Für die Öfen ohne Wärmetauscher wurde der ACD, zur Kompensation des Wärmeeintragverlusts während der negativen Modulation, erhöht. Mittels des, durch den größeren Abstand hervorgerufenen, Widerstands konnte genug Wärme im Ofen erzeugt werden, um die Prozesstemperatur zu halten. In Tabelle 5.1 sind die benötigten Zielspannungen aufgelistet. Diese Zielspannungen können über das Prozesssteuerungssystem den Öfen zugeteilt werden und der Anodenbaum fährt die Anoden bis zur Erreichung der Zielspannung nach oben.

Wert	Einheit	Basis	neg. 6kA	neg. 12kA	Hinweis
Stromstärke	kA	161	155	149	-
Spannung	V	4,40	4,30	4,20	konst. ACD
Prod. Spannung	V	2,1	2,1	2,1	-
Externe Spannung	V	0,36	0,35	0,33	-
Spannungsrest	V	1,94	1,85	1,76	-
Wärmeeintrag	kW	312	287	263	-
Diff. zur Basis	kW	-	25	50	-
Zusatzspannung	V	-	0,16	0,33	-
Neue Zielspannung	V	-	4,46	4,53	-

Tabelle 5.1: Berechnete Zielspannungen für Öfen ohne Wärmetauscher bei neg. Modulation

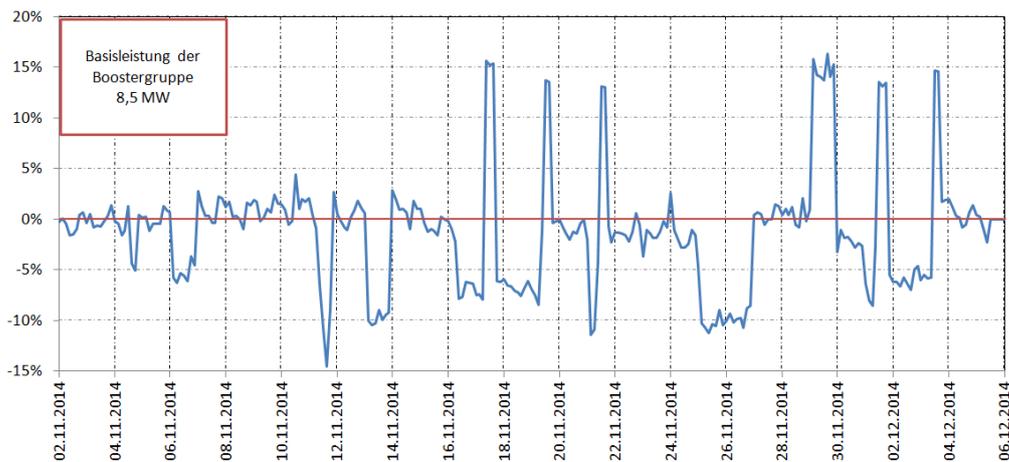


Abbildung 5.29: Prozentuale Veränderung der Ofenleistung durch Modulation

Insgesamt sind die Versuche sehr positiv verlaufen. Es konnten Leistungsänderungen von +18% bis -15% von der Basisleistung (710kW) eines Elektrolyseofens gefahren werden (siehe Abbildung 5.29). Während der Basisleistung wurde eine Geschwindigkeit von 6m/s in den Rohrleitungen gehalten. Dies entspricht einem durchschnittlichen Luftmassenstrom von 0,55kg/s pro Ofen. Während der Leistungsänderung von +18% am 29.11.2014 mit 18,5kA wurde der ACD um 100mV abgesenkt, während die Geschwindigkeit in den Rohrleitungen auf 10m/s (0,95kg/s pro Ofen) angehoben wurde. In der Phase der Leistungsminimierung von -10% um den 26.11.2014 wurde die Halle mit -12kA für 48h gefahren und die Spannung an den Öfen um 100mV erhöht. Die Spannungsreduzierung war eine vorsichtige Annäherung an diesen massiven und langandauernden Eingriff und, wie sich in späteren Versuchen herausstellte, nicht notwendig. Bereits am 11.11.2014 wurden die Öfen mit -12kA ohne Spannungsreduzierung gefahren und konnten so eine Leistungsreduzierung von -15% ohne signifikante Prozessverluste erwirken. Während den Leistungsminimierungen mit -12kA wurde die Geschwindigkeit der Volumenströme auf 3m/s abgesenkt, was einem Luftmassenstrom von 0,29kg/s pro Ofen entspricht. Die Minimierung des Luftstroms zu Geschwindigkeiten kleiner 3m/s ist weiterhin ein Problem, da die Ventilatoren nicht mit kleinerer Drehzahl betrieben werden können. Alternativ können die Ventilatoren ausgestellt werden.

Die Massenströme wurden mit nachfolgender Gleichung berechnet [Bö99]. Dazu wurde die Volumenstromgeschwindigkeit mittels eines Strömungssensors gemessen. Zur Bestimmung der Dichte wurde der Druck mit Hilfe eines Manometers, sowie die Temperatur bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemessen und mit Gleichung 5.6 berechnet [Bö99].

$$\dot{m} = \rho \cdot c \cdot A \quad (5.5)$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (5.6)$$

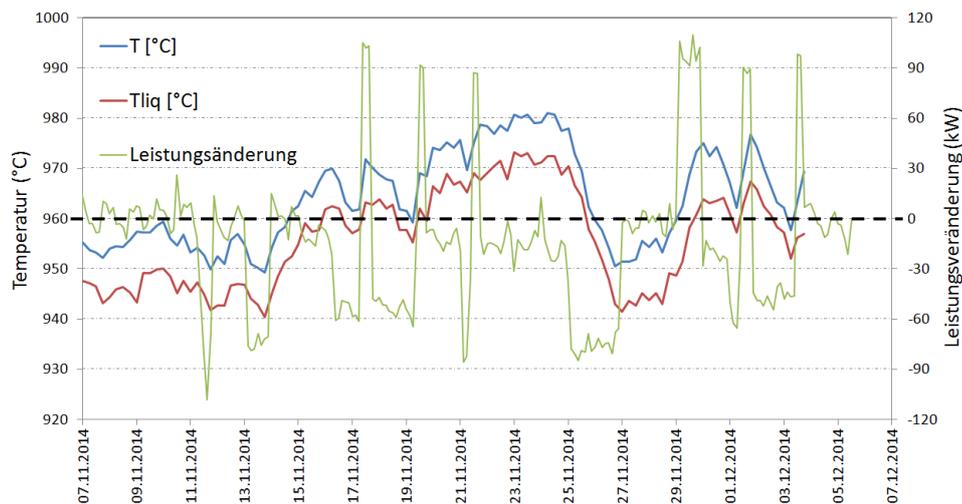


Abbildung 5.30: Temperaturveränderung während der negativen Modulation

In Abbildung 5.30 ist zu erkennen, dass sich die Temperaturen entsprechend der Leistungsänderung verhalten. Dies war zu erwarten, da der Wärmeverlust bzw. Wärmetransport durch die Seitenkruste der Steuerungsfaktor und Verzögerungsfaktor ist. Eine direkte Temperaturveränderung im Medium, das die Wärme produziert, wird somit immer erfolgen, da die Wärmetauscher nicht in der Lage sind die Leistungsänderung umgehend zu kompensieren. Weitere Versuche dazu werden in Kapitel 5.6 erläutert. Innerhalb des Versuchszeitraums ist

der Si-Gehalt im Aluminium nicht angestiegen. Dies zeigt, dass die Seitenkruste den Ofen durchgehend geschützt hat. Des Weiteren wurden keine Elektrolytaufwachungen auf der Kathode festgestellt.

Sowohl in der positiven als auch in der negativen Modulationsphase ist der Superheat in einem Bereich von 6-12°C geblieben. Der konstante Superheat und die Menge des flüssigen Elektrolyten im Ofen (Abbildung 5.31) spiegeln ein weiteres Mal die in Kapitel 5.6 beschriebene Prozessgleichgewichtsänderung wider.



Abbildung 5.31: Elektrolytmasse und Temperaturveränderung Ofen 1112

Tonerdefütterung

Für die Tonerdezugabe wurde ein spezielles Programm geschrieben, welches die Tonerdezugabe bei Leistungsänderung anpasst. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei auf Strategien gelegt, welche Anodeneffekte oder ein Verschlammen (Kapitel 3.3.1) vermeiden. Dafür wurde die Tonerdezugabe bereits 15min vor einer Leistungsanpassung verändert. Über den gesamten Versuchszeitraum wurde der Kathodenboden periodisch abgetastet und keine signifikanten Prozessänderungen festgestellt.

Ofeneindeckung

Die Ofeneindeckung zeigte während des Versuchszeitraums keine besonderen Vorkommnisse. Es traten keine Flammlöcher auf, die Eindeckung ist an keiner Stelle eingebrochen und schwarze Stellen, verursacht durch Anodenabbrand, waren auch nicht zu sehen (Abbildung 5.32). Aufgrund der Vielzahl an Temperaturmessungen (min. alle 6h) war es nicht möglich, das Schöpfloch während der Versuchsphase zu schließen.



Abbildung 5.32: Zustand der Eindeckung bei -12 bis +18,5kA

5.3.2 Fazit der negativen Modulation

Die Versuche waren sehr positiv. Aufgrund der intensiveren Reaktionsweise mittels ACD und Kühlung konnten die Öfen in einem sehr guten Prozessfenster bzgl. Energieverbrauch und Stromausbeute betrieben werden (siehe Kapitel 5.34). Aufgrund der sehr positiven Ergebnisse ist es möglich, die negative Modulation in Dauer und Amplitude auszudehnen, wenn der Einfluss auf Öfen ohne Wärmetauscher vermieden werden kann. Dies ist nur mit einer Erweiterung der Anlage

auf eine ganze Ofenhalle möglich, da die Prozessverluste bei Öfen ohne Wärmetauscher gravierend sind. Der Unterschied liegt bei bis zu 3% Stromausbeute und im Energieverbrauch bei über 1kWh/kg Aluminiumproduktion. Besonders hervorzuheben ist der Versuch mit -12kA vom 03.12.2014, bei dem der ACD nur um 50mV angehoben wurde und die gesamte restliche Wärmebilanz durch die Isolation mittels der Wärmetauscher gehalten werden konnte. Dafür wurde der Volumenstrom in den Hauptrohrleitungen von 6,5m/s auf 4m/s gedrosselt. Eine derartige Fahrweise hält die Öfen auch mit niedrigem ACD stabil und bringt mithilfe der Verwendung von Wärmetauschern das Ziel der variablen Stromstärke einen Schritt näher.

Schnelle Änderungen der Elektrolyt- und Liquidus-Temperatur sind mit Versuchen aus der positiven Modulation kongruent und deren Folgen (Ofenausfälle durch Randkrustenverlust oder die Bildung von Elektrolytaufwachsungen) können mit den Wärmetauschern abgewendet werden. Besondere Maßnahmen zur Tonerdefütterung und Vermeidung von Anodeneffekten wurden erfolgreich umgesetzt. Es wurde eine Leistungsänderung von +18% und -10% über 48h erreicht. Die Reaktion der 9 Box auf die Liquidustemperatur mittels AlF_3 Zugabe muss dringend angepasst werden.

5.4 Versuche mit Spannungsreduzierung

Aufgrund der positiven Ergebnisse der negativen Modulation wurde eine weiterer Versuch zur Verringerung der Ofenspannung unternommen. In Kapitel 3.3.3 wurde bereits gezeigt, dass eine Reduzierung der Ofenspannung (Abbildung 3.10 und 3.11) möglich ist. Mithilfe der Verteilung der Wärmeverluste (Kapitel 3.2) wurde ein Konzept entwickelt, bei dem die Wärmetauscher bei geringerem ACD und somit geringerem Wärmeeintrag in den Ofen, mit einem geringeren Volumenstrom gefahren werden sollten.

Bei einem geringeren Wärmeeintrag von ca. 10kW (60mV x 162kA) und einem um 1% verringerten Wärmeverlust von 3kW (aufgrund von verringerter Erzeu-

gung, 300 statt 310kW) bleiben ca. 7kW Differenz in der Wärmebilanz. Diese Differenz konnte über den Wärmetauscher ausgeglichen werden. Mittels der Gleichung 5.2 konnte die veränderte Ventilatoreinstellung ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.33 und 5.34 dargestellt.

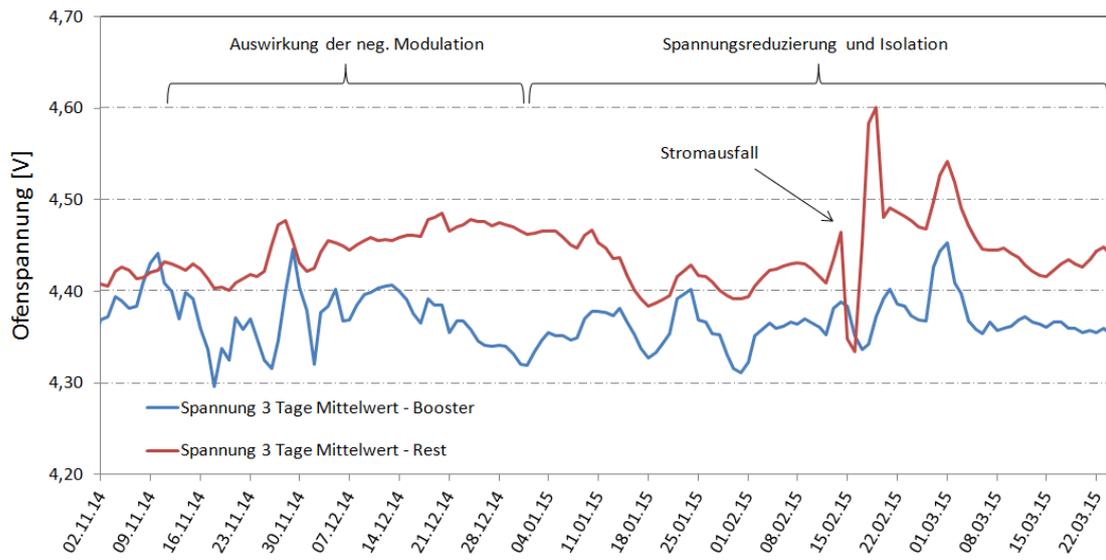


Abbildung 5.33: Spannungsverlauf der Booster und Vergleichsgruppe

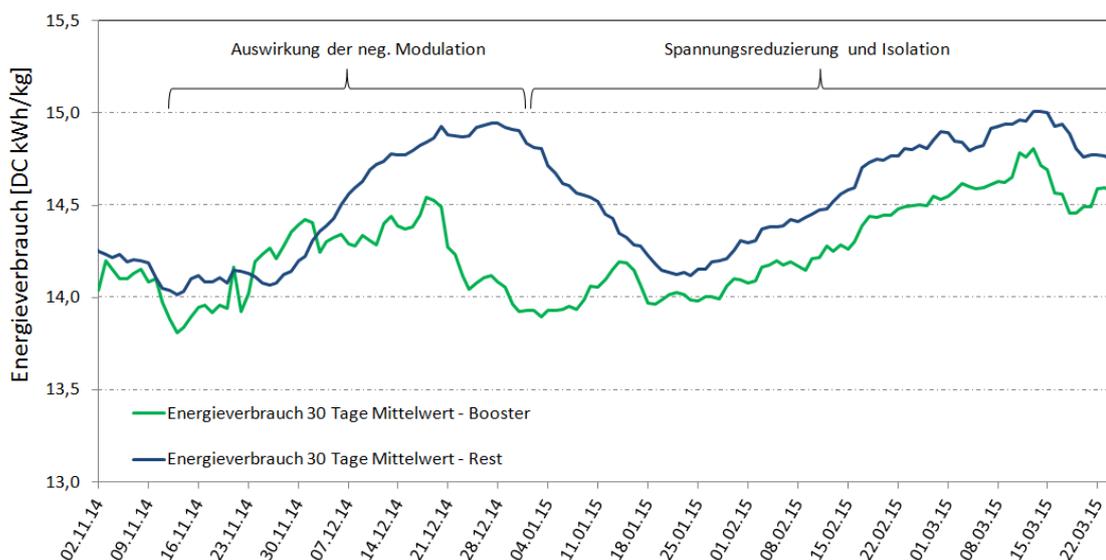


Abbildung 5.34: Energieverbrauch der Booster und Vergleichsgruppe

5.5 Magnetfeldkompensation

Das Aluminium im Ofen unterliegt aufgrund des durchfließenden Stroms einem starken Magnetfeld, welches eine Wölbung des Aluminiums hervorruft. Bei gleicher Stromstärke verändert sich das Magnetfeld nur durch die Veränderung der Richtung oder Verteilung der Strömungsvektoren (zB. beim Anodenwechsel oder bei massiven Veränderungen der Randkruste) [GK93].

Der Strom wird von der Kathode des vorigen Ofens zur Traverse (an der die Anoden hängen) geleitet. Dabei ist eine gleichmäßige Verteilung der Strommenge auf die beiden Seiten der Traverse für einen gleichmäßig durchflossenen Ofen äußerst wichtig. Messungen am EPT 14 Ofen haben gezeigt, dass die

Verteilung auf den beiden Traverseeingängen bei 17% zu 83% liegt [GD15].

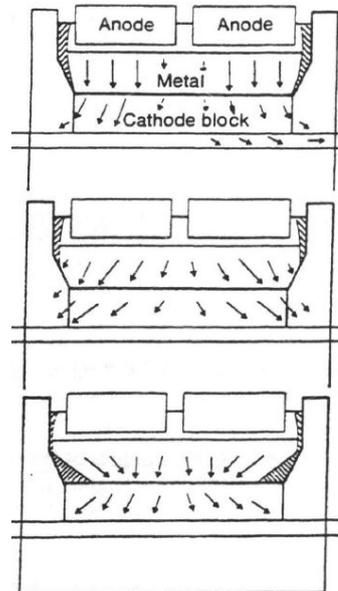


Abbildung 5.35: Einfluss der Randkruste auf den Stromfluss im Ofen [GK93]

5.5.1 Metallwölbung

Aufgrund der Metallwölbung befindet sich am Ofeneingang und am Ofenende deutlich weniger Metall als in der Mitte des Ofens. Dies hat zum einen eine ungleiche Wärmeverteilung zur Folge, da das Aluminium die Wärme aufgrund seiner Bewegung und hohen Wärmeleitfähigkeit am besten im Ofen verteilt. Zum anderen brennen die Anoden aber auch entlang dieser Wölbung ab, sodass sich, über den Ofen verteilt, ein Abbild der Wölbung auf der Anodenunterseite, mit ca. fünf cm Abstand (ACD), bildet.

Mit Änderung der Stromstärke tritt somit auch eine verstärkte Wölbung ein, welche den ACD der Ofenmitte verringert und den ACD an den Ofenenden vergrößert. Diese Veränderung bringt eine Instabilität in den Ofen. Der Widerstand des Elektrolyts wird an den Ofenenden aufgrund des Abstands deutlich größer und der Widerstand im Ofeninneren kleiner. Somit fließt im Ofeninneren deutlich mehr Strom, so lange bis die Anoden wieder alle den gleichen Abstand zur neuen Metallwölbung haben. Wird die Stromstärke hingegen so stark verändert, dass einzelne Anoden einen Kontakt zur Metallwölbung erzeugen, wird aufgrund des Kurzschlusses und Aussetzen des Produktionsvorgangs keine Anpassung der Anodenunterseite stattfinden. Dies kann mitunter zum Ausfall des Ofens führen.

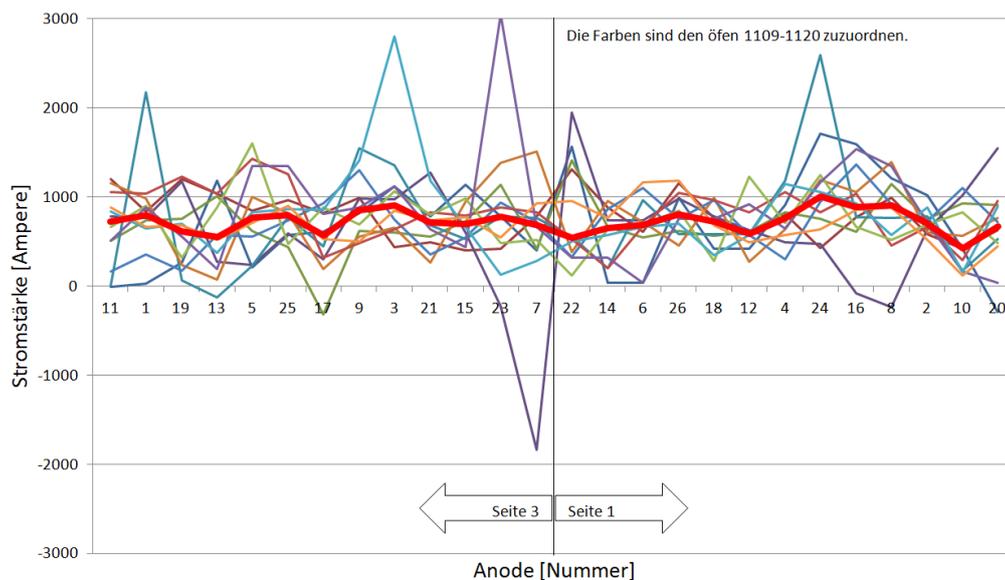


Abbildung 5.36: Stromaufnahmeänderung der Anoden nach 6h, Test 161,5-180kA

Zur Bestätigung dieses Effekts wurde an zwölf Öfen über einen Abstand von zehn cm an allen 26 Anodenstangen der Spannungsabfall gemessen. Dazu wurde die Stromstärke auf 180kA angehoben und der Spannungsabfall nach sechs Stunden gemessen. Die Differenz zum Spannungsabfall vor der Stromstärkeänderung zeigt eine gleichmäßige Verteilung über alle 26 Anoden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anodenunterseite nach ca. sechs bis acht Stunden

wieder die Geometrie der Metalloberfläche angenommen hat. In weiteren Tests wurde der Spannungsabfall fünf bis sechs Minuten nach der Stromstärkeänderung von 180kA auf 161,5kA gemessen. Hier ist eine ungleichmäßige Verteilung zu erkennen (Abbildung 5.37). Bei der Darstellung wurde mittels der Gesamtstromstärke die Stromstärke an den einzelnen Anoden berechnet. Es ist zu erkennen, dass die 18,5kA im ersten Versuch gleichmäßig mit ca. 700A über die Anoden verteilt sind, während im zweiten Versuch die Mittelwerte der einzelnen Anoden von 200-1500A schwanken.

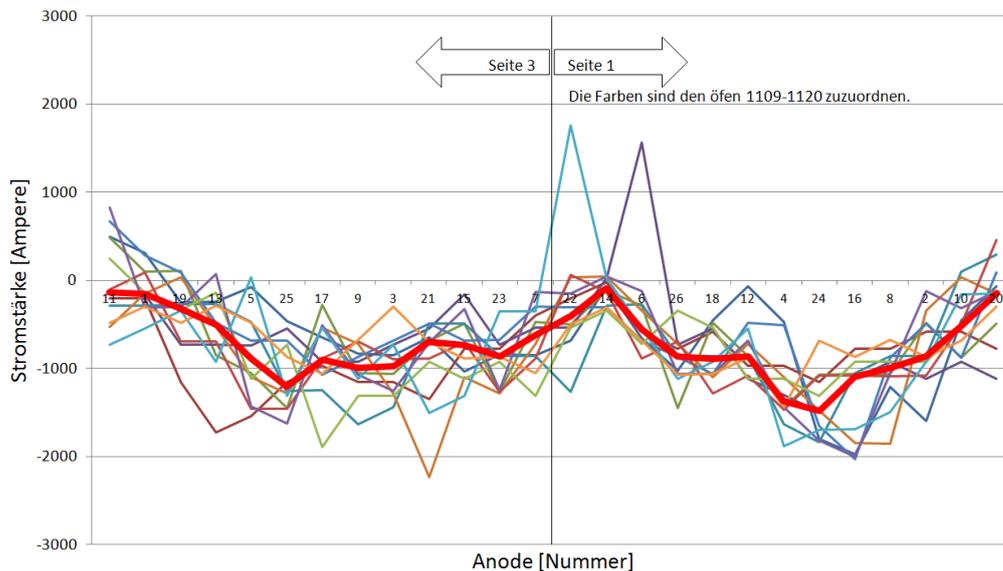


Abbildung 5.37: Stromaufnahmeänderung der Anoden nach 0,1h, Test 180-161,5kA

Zusammen mit dem Unternehmen KAN-NAK SA aus der Schweiz [KAB14] wurde ein Konzept zur Kompensation des Magnetfeldes entwickelt. Mithilfe von zusätzlichen Stromschienen, in Abbildung 5.38 in Grün dargestellt, sollte genügend Strom auf die andere Seite des Ofens gebracht werden, um eine gleichmäßigere Verteilung des Stromeingangs auf der Traverse zu gewährleisten. Des Weiteren sollten die zusätzlichen Stromschienen, unter und neben dem Ofen, das Magnetfeld so kompensieren, dass sich die Wölbung im Normalzustand nahezu halbiert.

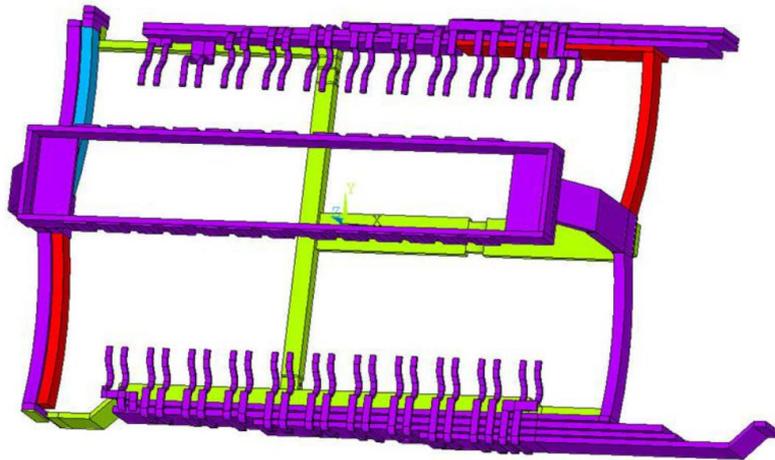


Abbildung 5.38: Altes (lila) und neues (grün) Stromschienen Design.

Nach Installation der Stromschienen wurden mithilfe von Eisenstangen, welche im Aluminium stärker ablagern als im Elektrolyten, die Wölbung des Aluminiums im Ofen gemessen. Es konnte ein signifikanter Unterschied von 8,7cm ohne Wölbung und 5cm mit Wölbung gemessen werden 5.39.

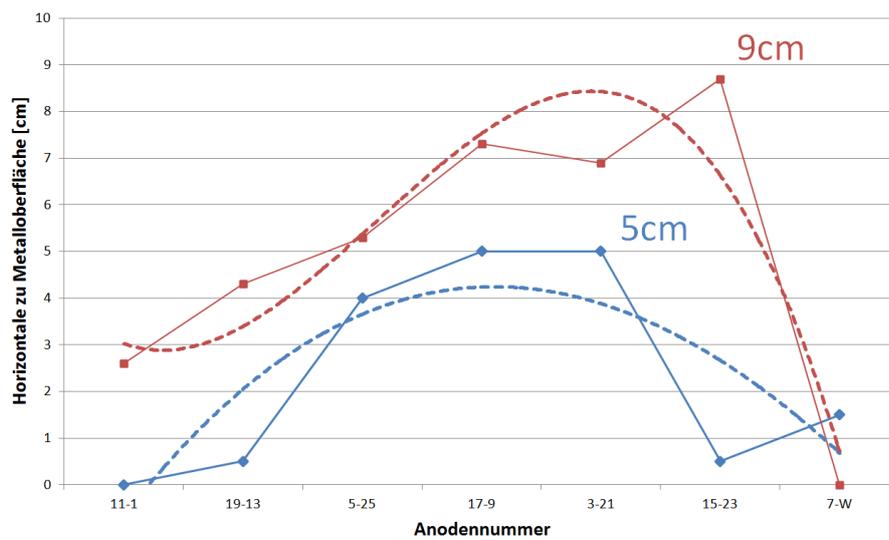


Abbildung 5.39: Metallwölbungsmessung mit (blau) und ohne (rot) MK [Gat15]

5 Experimentelle Untersuchungen

Für die Magnetfeldkompensation wurden ca. fünf Tonnen Aluminium pro Ofen als zusätzliche Stromschienen installiert. Die Vergrößerung des durchströmten Materials brachte eine deutliche Verringerung des externen Widerstands zwischen den Öfen mit sich. Der externe Spannungsabfall von den Kathodenbarrenenden bis zur mittleren Traversenposition betrug vor Installation der Magnetfeldkompensation ca. 320mV und nach der Installation ca. 270mV. Die Differenz von 50mV wurde umgehend von der Soll-Spannung der Prozesssteuerung abgezogen und somit eine Reduzierung des ACD erreicht.

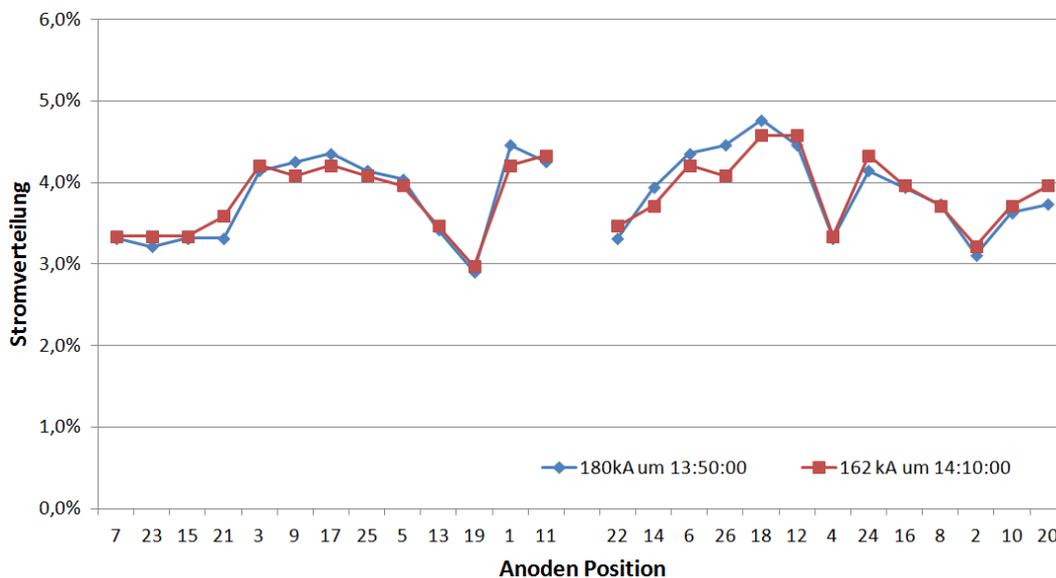


Abbildung 5.40: Stromaufnahme Ofen 1111 bei 18kA Modulationsschritt

Eine Verbesserung der Stromaufnahme während des Modulationsschrittes konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Dazu wurde an vier Öfen die Stromaufnahme 10min vor und 10min nach einem Modulationsschritt von 18kA gemessen. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein Ofen mit Magnetfeldkompensation einen Modulationsschritt von 18kA mit kaum einer ACD Veränderung durchläuft. Des Weiteren konnte die Stromverteilung auf der Kathodenseite deutlich verbessert werden. Eine Ansicht befindet sich im Anhang, Abbildung .17.

5.5.2 Fazit Magnetfeldkompensation

Die Wölbung konnte mittels der Magnetfeldkompensation um über 40% verringert werden. Der damit einhergehende schlechtere Abfluss der Gasblasen aus der Produktion wird in Zukunft mittels geschlitzter Anoden kompensiert. Die um 50mV verringerten externen Spannungsverluste wurden umgehend in der Prozesssteuerung umgesetzt und tragen seitdem zum niedrigeren Energieverbrauch bei (Abbildung 5.41).

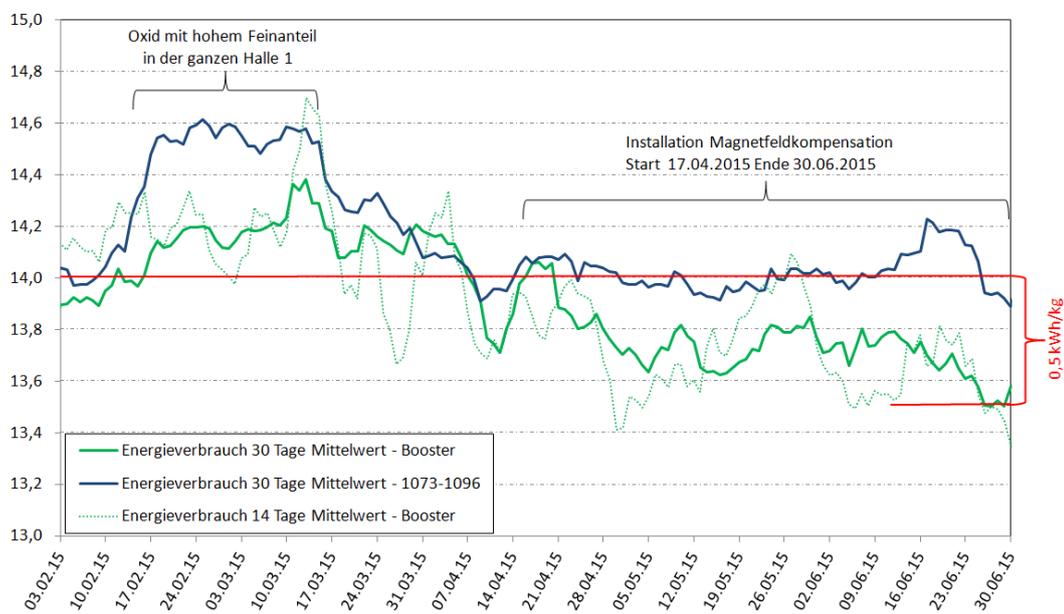


Abbildung 5.41: Energieverbrauch der Boostersektion und einer vergl. Sektion ohne MK

5.6 Elektrolyt-Temperatur, -Menge und -Chemie

Aufgrund des in den vorherigen Kapiteln dargestellten Einflusses der Modulation auf die Temperatur, die Menge und die Chemie des Elektrolyten wurden weitere Versuche zur Differenzierung durchgeführt. Im April 2015 wurden vier Öfen

5 Experimentelle Untersuchungen

besonders im Hinblick auf die Veränderung der Parameter unter Modulationseinfluss untersucht.

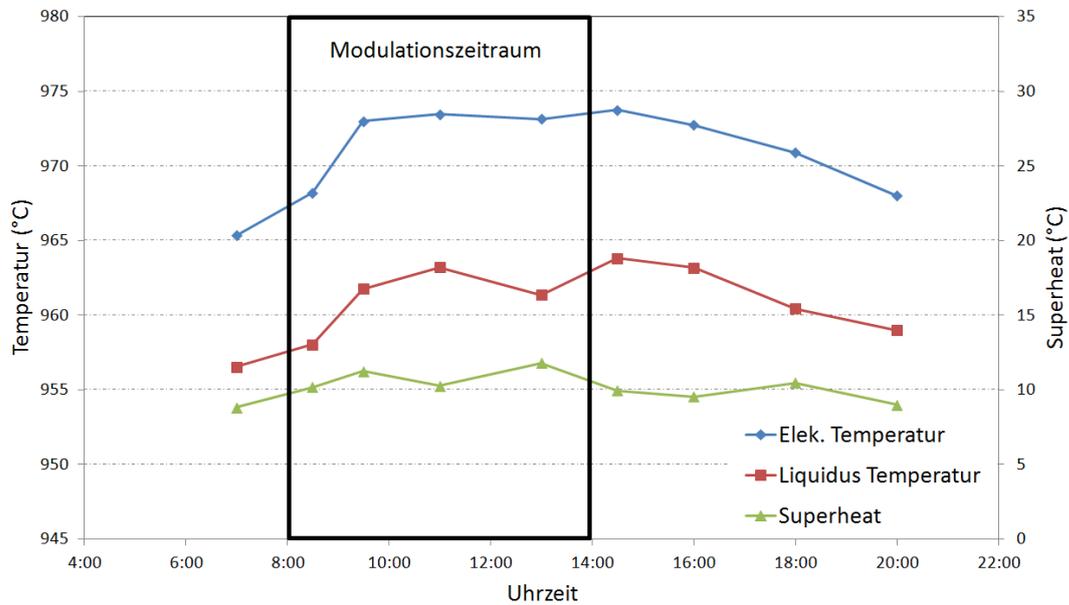


Abbildung 5.42: Temperaturveränderung bei +12kA

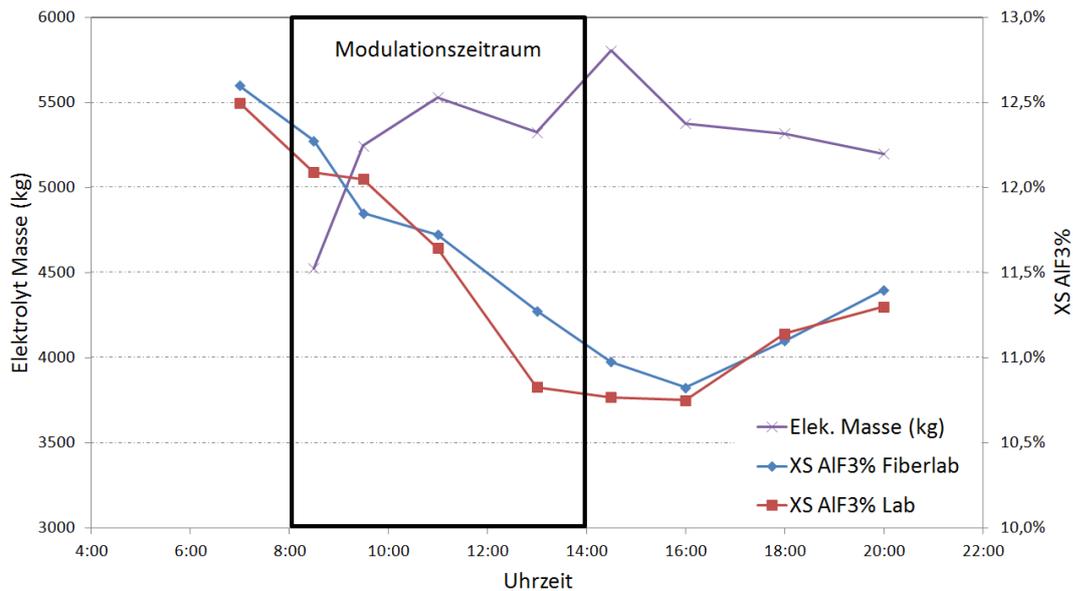


Abbildung 5.43: Chemieveränderung bei +12kA

In Abbildung 5.42 und 5.43 ist zu erkennen, dass sofort nach Anheben der Stromstärke um 8 Uhr auf 180kA ein Anstieg der Temperaturen erfolgt. Während der Superheat mit Ende der Modulation um 14 Uhr wieder in einen normalen Bereich zurückkehrt, benötigen Liquidus- und Elektrolyt-Temperatur weitere 4-8h für die Abkühlung. Der rapide Anstieg der Liquidustemperatur deutet eine Veränderung der Elektrolytchemie an, welche sich auch in den AlF_3 Messungen mit einem Abfall von 1% widerspiegelt. Diese chemische Veränderung ist zurückzuführen auf einen Verlust der Seiten- oder der Eindeck-Kruste. Die Tatsache, dass der Massenüberschuss an AlF_3 abnimmt zeigt, dass es ein Verlust von Randkruste ist, da diese vorwiegend aus Kryolith besteht [LT91]. Die Eindeckkruste hat im Allgemeinen einen höheren AlF_3 Gehalt [ZTC⁺ 13], aufgrund der Absorption gasförmiger Fluoride aus dem Elektrolyt. Aus diesem Grund würde bei Verlust der Eindeckung der Gehalt an AlF_3 eher ansteigen. Obwohl beide Reaktionen auftreten können, zeigen die Ergebnisse, dass der Verlust an Randkruste der Bestimmende ist (Vergleich auch Tabelle 3.3). Das Phänomen des Aufschmelzens wird durch die Zunahme an flüssiger Elektrolytmasse weitgehend bestätigt. Des Weiteren wird die These von [RS90] bestätigt (Kapitel 4.3.4). Wie in Tabelle 4.2 beschrieben, steigt die Liquidustemperatur um ca. 6°K an, bei einem Abfall des Überschusses an AlF_3 von 1%.

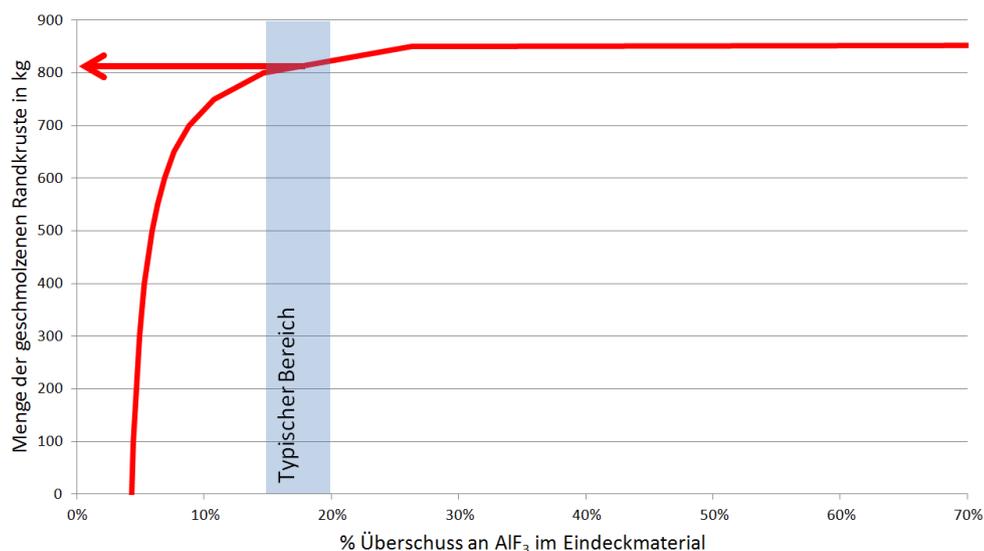


Abbildung 5.44: Eindeck-/Randkrustenverlust

Ereignis	kW	Wärmeverteilung
Anheben der Elektrolyttemperatur um 20°	35	7%
Anheben der Flüssialuminiumtemperatur um 20°C	40	8%
Anheben der Anodenbodentemperatur um 20°C	55	11%
Schmelzen einer Tonne Randkruste	167	64%
Schmelzen einer Tonne unterer Eindeckung	225	10%

Tabelle 5.2: Thermische Reaktionen eines 170kA Elektrolyseofens [Wel98]

Mit Beginn der Modulation ist die flüssige Elektrolytmenge im Mittel um 900kg angestiegen, während der AlF_3 Überschuss von 12,6 auf 11,3% $xsAlF_3$ gefallen ist. Der Massenanteil an AlF_3 im unteren Eindeckmaterial liegt bei ca. 15-19% [ZTC⁺13]. Unter der Annahme, dass die Randkruste einen Überschuss von 3% $xsAlF_3$ besitzt ([LT91]), berechnet sich die Verteilung von aufgeschmolzener Randkruste zu aufgeschmolzener Eindeckkruste mit neun zu eins Teilen (siehe Abbildung 5.44).

Die benötigte Wärmemenge zum Aufschmelzen der Randkruste sowie zum Anheben der Temperatur im Ofen ist in der Literatur [Wel98] wie in Tabelle 5.2 angegeben. Ergänzt wurde die Tabelle mit dem Verhältnis der Wärmeverteilung, die sich aus den gemessenen Werten (Abbildung 5.42-5.44) ergeben, und einer Wärmezugabe von 212kWh.

Interessant ist, dass bei allen Öfen nach kurzer Zeit ein Temperatur-Plateau erreicht wird, welches zeigt, dass sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Frühere Untersuchungen [SS07], [EP08] haben gezeigt, dass sich ein Gleichgewicht ohne Wärmetauscher viel später einstellt. Daraus lässt sich schließen, dass der Grund für die schnelle Reaktion die massive Kühlreaktion mittels der Wärmetauscher ist. Bei einem Sprung von 18kA kann somit ein neuer Betriebszustand schon nach unter 4h erreicht werden.

Die deutlich geringere Abnahme der Elektrolyt- und Liquidustemperatur ist zurückzuführen auf einen langsameren Abkühlungsprozess. Der gesamte Versuchsaufbau hat gezeigt, dass mit Start der Modulation die Kühlung noch stärker betrieben werden kann, während nach ca. 3h mit normaler Kühlung fortgefahren werden kann.

den kann. Um den Erstarrungsprozess nach der Modulationzeit zu beschleunigen ist es sinnvoll mit der Kühlung für einen Zeitraum fortzufahren.

Fazit:

Zusammenfassend bleibt zu erwähnen, dass aufgrund der Ergebnisse eine Regulierung des Wärmehaushalts mit dem Wärmetauscher möglich ist, jedoch eine komplette Veränderung der Randkrustenstärke nicht vermieden werden kann. Durch die Temperaturänderungen auf beiden Seiten, im Inneren durch die Leistungsänderung und von Außen durch die Wärmetauscher, bewegen sich die isothermen Linien parallel zueinander hin oder voneinander weg (die Temperaturveränderung pro cm Wandstärke nimmt zu oder ab). Die Wärmetauscher vermindern jedoch das Risiko von Ofenausfällen kurz nach den Leistungsänderungen und tragen dazu bei, einen stationären Zustand in entsprechender Zeit zu erreichen.

6 Energycounter

Im Kapitel 5.6 wurde gezeigt, dass sich innerhalb eines Modulationszeitraumes ein neues Gleichgewicht einstellt. So kann es beispielsweise sein dass ein Ofen mit 960°C nach einer Niedrig-Energiephase als heiß und einer Hoch-Energiephase als kalt eingestuft wird [Ree15]. Aus diesem Grund ist es für die Prozesssteuerung äußerst wichtig, die Historie des Energiehaushaltes zu kennen. Dazu wurde ein „EnergyCounter“ (Energie-Zähler) entwickelt, der Wärmeverlust und Wärmeeintrag der Öfen ermittelt.

6.1 Gleichungsermittlung

Die Änderung des Wärmehaushaltes wird in vier Teilpunkte gegliedert:

- Wärme-Eintrag (Ofenspannung und Stromstärke)
- Wärme-Verlust (Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung)
- Wärme-Umwandlung (Produktionsprozess und Phasenänderung des Elektrolyten)
- Wärme-Inhalt (Ofen-Temperatur und Arbeitsschritte wie Anodenwechsel)

Daraus lässt sich folgende Grundgleichung ermitteln.

$$\Delta\dot{Q} = \dot{Q}_E - \dot{Q}_V - \dot{Q}_U - \dot{Q}_I \quad (6.1)$$

6.1.1 Wärme-Eintrag

Der Wärmeeintrag lässt sich mittels dem Produkt aus Ofenspannung (U_{Ofen}) und Stromstärke (I_{Ofen}) ermitteln. Die Datenaufzeichnung in der Ofensteuerung erfolgt im 60ms Rhythmus, während die Daten in den Energycounter alle 5min gemittelt übertragen werden. Die Messung der Ofenspannung erfolgt von Ofen zu Ofen. Aus diesem Grund müssen zur Berechnung die externen Spannungsverluste (U_{ext} , Kapitel 3.3.1) subtrahiert werden. Die externen Spannungsverluste wurden bei 162kA aufgenommen und folgende Gleichung aufgestellt:

$$\dot{Q}_E = I_{Ofen} \cdot \left(U_{Ofen} - U_{ext} \cdot \frac{I_{Ofen}}{I_{162kA}} \right) \quad (6.2)$$

6.1.2 Wärme-Verlust

Zur Aufnahme des Wärmeverlustes wurden am Ofen 1114 und 1115 über 50 Thermoelemente und drei Volumenstromsensoren pro Ofen installiert. Insgesamt wurde die Boostergruppe mit über 300 Sensoren versehen. Zur Bestimmung der Wärmeverluste wurden folgende Gleichungen verwendet:

Konvektion:

$$\dot{Q}_{V,Konvektion} = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{Kre11}] \quad (6.3)$$

Strahlung:

$$\dot{Q}_{V,Strahlung} = \epsilon_1 \cdot \sigma_1 \cdot A_1 (T_1^4 - T_{Umgebung}^4) \quad [\text{GF14}] \quad (6.4)$$

Wärmeleitung:

$$\dot{Q}_{V,Wärmeleitung} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} \quad [\text{Fou22}] \quad (6.5)$$

Bei einem Wärmeübergang von Festkörper in eine Gasphase ist die konduktive Wärmeübertragung (Gleichung 6.5) nicht vorhanden. Des Weiteren sind die

Strahlungsverluste (Gleichung 6.4) vernachlässigbar, da die Temperaturunterschiede zwischen Umgebungsluft und Oberfläche zu gering sind. Als Beispiel sind für eine Oberflächentemperatur von 110°C und einer Umgebungstemperatur 15°C die flächenspezifischen Wärmeübergänge für Strahlung $1,660-5,394 \frac{W}{m^2K}$ und für Konvektion $475-2375 \frac{W}{m^2K}$. Aus diesem Grund wurde zur Berechnung der Wärmeverluste über die Ofenflächen nur der Wärmeverlust durch Konvektion (Gleichung 6.3) verwendet.

Als Grundlage für die Berechnung werden die Außenwandtemperaturen mittels Thermoelementen gemessen. Diese sind an Boden, Stirn- und Längsseite der Ofenwanne sowie der Ofenhorizontalen angebracht. Zur Vereinfachung werden alle Flächen als glatte Oberflächen behandelt und je nach Lage der Fläche Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen 10 und $24 \frac{W}{m^2K}$ gewählt [LND⁺11]. Die unterschiedlichen Werte begründen sich durch die unterschiedlichen Luftverhältnisse an Ofenboden, -Seite und -Kapselung.

Luftbewegung	Intensität	$\alpha [\frac{W}{m^2K}]$
senkrecht zur Metallwand	ruhend	3,5-35
senkrecht zur Metallwand	mäßig bewegt	23-70
senkrecht zur Metallwand	kräftig bewegt	58-290

Tabelle 6.1: Wärmeübergangskoeffizienten bei Konvektion [Ome98]

Position	Leistung	Verteilung	Bereiche	Verteilung
Gesamtwärmeverlust	325 kW	100%		
Abgasstrom	104 kW	32%		
Kapselung	59 kW	18%	Oben	50%
Wärmetauscher	65 kW	20%		
Stirnseite	32 kW	10%		
Längsseite unten	20 kW	6%		
Barren	19 kW	6%	Seite	42%
Boden	26 kW	8%	Unten	8%

Tabelle 6.2: Wärmeverluste bei 162kA Normalbetrieb

Für die Wärmeleitung über die Kathodeneisen und Anodenstangen wurde ein dynamischer Wert von 6% des Wärmeeintrags angenommen [TZWS96], [Wel01], [Bru98].

Die mit Hilfe der genannten Formeln erstellten Wärmeverluste sind in Tabelle 6.2 dargestellt. Die Werte sind mit gemessenen Werten mittels eines Wärmeflusskalorimeters [Koy14] vergleichbar.

6.1.3 Wärme-Umwandlung

Der Produktionsprozess und die damit verbundene Spannung ist bereits ausführlich in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Die Wärmereduzierung aufgrund des Produktionsprozesses ist proportional zur Stromausbeute des Produktionsprozesses. Die Stromausbeute schwankt zwischen 90 und 95% und kann theoretisch mittels des entnommenen Aluminiums und dem im Ofen bleibendem Aluminium bestimmt werden. Durch Umgebungseinflüsse und veränderliches Ofenvolumen ist diese Messung sehr ungenau und muss vernachlässigt werden. Des Weiteren wird aus dem Elektrolyseofen nur alle 48h Aluminium entnommen. Für eine berechnete Wärmeumwandlung ergibt sich somit mit mittlerer Stromausbeute folgende Gleichung.

$$\dot{Q}_{U,Produktion} = I_{Ofen} \cdot U_{prod} \cdot CE_{93,5\%} \quad (6.6)$$

Event	benötigte Wärme in [kW]
Anheben der fl. Elektrolyttemperatur um 20°C	≈35
Anheben der fl. Aluminiumtemperatur um 20°C	≈40
Anheben der unteren Anodentemperatur um 20°C	≈55
Lösen/Formen von einer Tonne Bodenschlamm	≈150
Aufschmelzen von einer Tonne Randkruste	≈180
Anheben der Aluminiumoxidkonzentration um 2%	≈47

Tabelle 6.3: Transiente thermische Reaktionen eines Elektrolyseofens

Für das Aufschmelzen der Randkruste konnte keine direkte Messeinrichtung installiert werden. Lediglich aus der chemischen Zusammensetzung kann eine ungefähre Ermittlung des flüssigen Elektrolyten erstellt werden. Wie viel Energie für verschiedene Vorgänge im Elektrolyseofen notwendig ist, hat Welch [Wel98] in Tabelle 6.3 wiedergegeben. Aufgrund der Tatsache, dass die chemische Zusammensetzung nur alle 48h ermittelt wird und unter der Vereinfachung, dass ein Aufschmelzen und Erstarren in diesem Zeitraum in einem Gleichgewicht bleiben, wurde diese Energieveränderung in der Regelung vorerst vernachlässigt. In einem zweiten Ansatz wurden mittels der Ergebnisse aus Kapitel 5.6 und den Grundlagen nach Kapitel 4.3.4 folgende Gleichung integriert.

$$\dot{Q}_{U,Aufschmelzen} = \Delta exAlF_3 \cdot 0,5 \frac{t}{\%exAlF_3} \cdot 180 \frac{kW}{t} \quad (6.7)$$

6.1.4 Wärme-Inhalt (Enthalpie)

Veränderungen am Ofen tragen meist eine Temperaturänderung mit sich und verändern so die Enthalpie des Ofens. Die drei größten Einflüsse sind das Aufwärmen/Abkühlen des Ofens, ein Anodenwechsel und die Zugabe von Tonerde und AlF_3 . Während AlF_3 , Tonerde und Anoden auf die Prozesstemperatur gebracht werden müssen und in der Produktionsspannung mit 0,26V integriert sind, kann die Veränderung der Ofentemperatur sowohl Energieverlust als auch Gewinn darstellen. Die dafür verwendete Formel ist nachfolgend dargestellt.

$$\dot{Q}_{I,Enthalpie} = \Delta T \cdot 6,5 \frac{kW}{K} \quad (6.8)$$

6.2 Fehleranalyse

Die Fehleranalyse, welche jedem Prozess zugrunde liegen sollte, ist immanent für die Bewertung der Qualität der gewonnenen Ergebnisse. Dies liegt in der Natur der Sache, denn bei jeder Messung, die entweder im Labor oder in einer

andere gearteten Umgebung durchgeführt wird, treten zwangsläufig Fehler auf. Es liegt daran, dass Messgeräte in ihrer Genauigkeit oft nur relativ sind und die zu untersuchenden Körper nur in der Theorie in ihren Eigenschaften homogen sind, nicht aber in der Realität. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass jede Messung fehlerbehaftet sein muss und zwar nicht vermeidbar, wohl aber minimierbar ist. Im Umgang mit Fehlern sind zwei Dinge zu betrachten, zum einen den Fehler einer einzelnen Größe abzuschätzen (z.B. Abweichung bei der Messung der Temperatur) und den Fehler im Resultat. Also, wie setzt sich der Fehler im Energycounter aus den einzelnen Fehlern der Volumenstrommessung, Temperatur etc. zusammen.

Im Weiteren unterscheidet man zwischen zeitabhängigen und zeitunabhängigen Fehlern. Die zeitabhängigen Fehler, wie der Drift in einer Temperaturmessung, treten oft in Verbindung mit Prozessen auf, die wärmeempfindlich und träge sind. Sie lassen sich oft nur durch eine eingehende Unter-

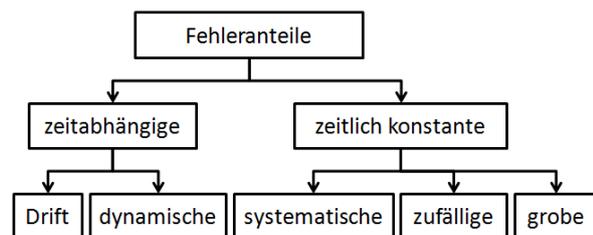


Abbildung 6.1: Fehleranteile

suchung der physikalischen Grundlagen (siehe Kapitel 4.3) eindämmen. Die zeitlich konstanten Fehler werden im Folgenden näher erläutert. Sie lassen sich wie folgt klassifizieren:

- grobe Fehler
- zufällige Fehler
- systematische Fehler

Unter die Kategorie der groben Fehler fallen im weitesten Sinne alle vermeidbaren und leicht erkennbare Fehler, wie z.B. defekte Messgeräte, ungeeignete Messmethoden und fehlerhafter Umgang mit der Messung. Übertragen auf die zugrunde liegende Dissertation fallen darunter zum Beispiel eine fehlerhafte

Randkrustenmessung durch unsachgemäße Ausführung oder offensichtliche mathematische Fehler, wie das Vertauschen eines Vorzeichens. Diese groben Fehler lassen sich zum größten Teil durch eine geeignete Schulung und wiederkehrende Überprüfung im Umgang mit den Messmethoden, wenn nicht gänzlich eliminieren, dann doch minimieren. Der Anteil der groben Fehler des vorliegenden Systems liegt bei Null. Auftretende grobe Fehler werden umgehend entfernt und die Software in neuer Revision aufgespielt. Durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen, wie z.B. Alarme, werden grobe Fehler umgehend gemeldet.

Die systematischen Fehler beeinflussen die Ergebnisse immer im gleichen Maße und können sich durch einen Wechsel im Versuchsaufbau direkt ändern. Darunter fallen Ursachen wie eine fehlerhafte Kalibrierung, eine Überlastung des Messgeräts bei Verlassen des gültigen Einsatzbereichs oder eine Alterung der Messgeräte (Besonders bei der Randkrustenmessung setzt eine Verformung des Winkelstücks ein, welches in den Fluss getaucht wird. Daher wurde von Herrn Pursche ein Wechselzyklus initiiert, um diesen Fehler zu begrenzen [Pur14]). Für das träge System eines Aluminiumofens wurde für den Energycounter eine periodische Kalibrierung und Überprüfung der Messgeräte eingeführt, so dass der Messfehler über einen langen Zeitraum gegen Null tendiert.

Der letzte mögliche auftretende Fehler ist der zufällige Fehler, der einen rein statistischen Charakter hat. Der gemessene Wert besitzt ein Schwankungsintervall, welches nach oben bzw. unten variieren kann. Die Ursachen hierfür sind sehr vielfältig. Häufige Ursachen dafür sind Ungenauigkeiten beim Ablesen der Messwerte, unvorhergesehene und nicht beachtete Umwelteinflüsse oder auch nicht beachtete physikalische Prozesse. Der Aufwand, der betrieben werden muss, um diese Fehler zu eliminieren variiert von sehr gering zum Beispiel bei den Ablesungenauigkeiten bis zu fast unmöglichen, wenn interatomare Prozesse berücksichtigt werden sollen, um möglichst alle physikalisch möglichen Prozesse zu berücksichtigen. Die Größe dieses Fehlers wurde in der vorliegenden Arbeit nicht bestimmt.

6.3 Fazit Energycounter

Mittels des Energycounters kann der aktuelle Status (Abbildung 6.2), wie auch die bis dahin angefallene Wärmemengendifferenz (Abbildung 6.3), dargestellt werden. Sind Energieeintrag und Verlust nicht kongruent, kann mittels der Einstellung des Volumenstroms der Wärmetauscher über die Frequenzumrichter der Wärmeverlust verändert werden. In Abbildung 6.2 ist zu erkennen, dass der Wärmeeintrag (blau) geringer als der Wärmeverlust (grün) ist. Mit Absenken der Kühlleistung durch die Wärmetauscher (dunkelgrün) können Wärmeeintrag und Verlust wieder ins Gleichgewicht gebracht werden.

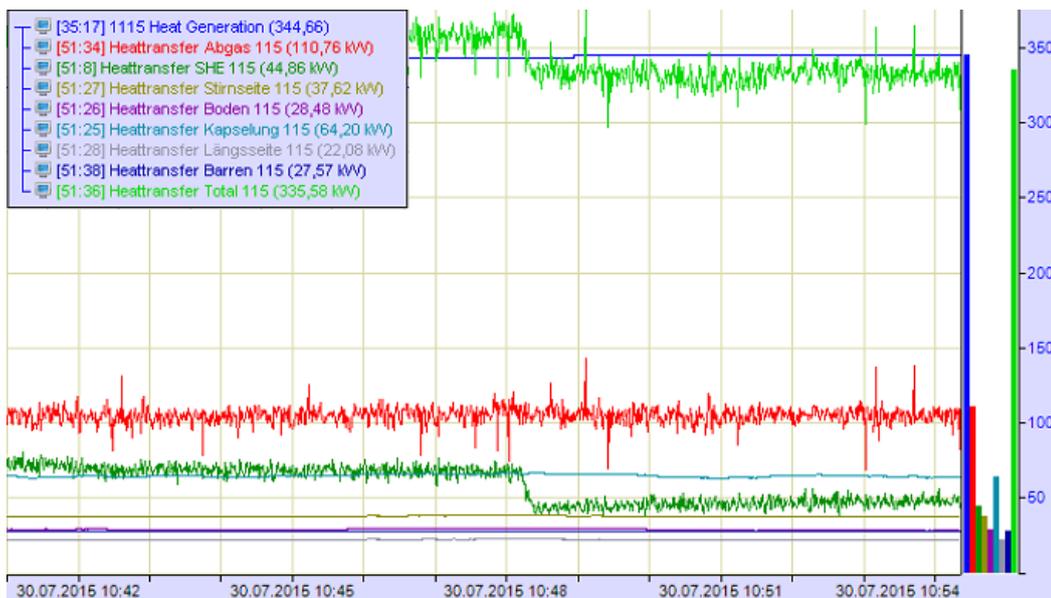


Abbildung 6.2: Wärmeverluste im MWES

Die kontinuierliche Aufnahme der Wärmeverluste eines Elektrolyseofens ist eine Neuheit und der erste Schritt zu einem Konzept für einen regelbaren Wärmeverlust eines Aluminiumelektrolyseofens. Die Einbindung in das Prozesssystem sowie die Erweiterung des aktuellen Prozesssystems im Hinblick auf die Chemieänderungen und möglichen unterschiedlichen Prozessgleichgewichte (Kapitel 5.6) wird im Kapitel 7 beschrieben.



Abbildung 6.3: Wärmemengendifferenz über 48h

7 Echtzeit-Energiebilanz-Regelung

In diesem Kapitel werden im ersten Teil alle Systemgrößen beschrieben sowie mögliche Fehlerquellen aufgelistet. Im weiteren Verlauf wird mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen und unter Zuhilfenahme des Energycounters ein Regelungskonzept formuliert. Schlussendlich wird das Verhalten des geregelten Systems virtuell und reell getestet.

7.1 Systemgrößen

Je genauer man die Parameter eines Systems kennt, umso besser können die Regler auf diese Parameter abgestimmt und die Regelstrecke beschrieben werden [Sch10]. Die wichtigsten Systemgrößen von Regel- über Stör- und Stellgrößen werden nachfolgend beschrieben.

7.1.1 Regelgrößen

Seit Erfindung der Aluminiumelektrolyse-Technologie im Jahre 1886 ist eine absolut gleichbleibende Energiezufuhr der wichtigste Garant für einen stabilen und energieeffizienten Produktionsprozess. So sind auch seither die Regelungskonzepte auf einen gleichbleibenden Energieverlust ausgelegt. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben, sind die beiden Regelgrößen für das bisherige System die Temperatur und die Liquidustemperatur. Sie werden über die beiden Stellgrößen

Ofenspannung und AlF_3 -Zugabe geregelt. Mittels des Energycounters wurde nun eine weitere zu regelnde Größe in das 9Box System eingeführt, die Wärmebilanz.

- **Regelgröße Thermischer Zustand:** Temperatur des Elektrolyten
- **Regelgröße Chemischer Zustand:** Erstarrungstemperatur des Elektrolyten ($x_s AlF_3$)
- **Regelgröße Wärmebilanz:** ΔQ aus dem Energycounter

Die Regelgrößen werden bestimmt durch kontinuierliche Messungen (Energycounter, Volumenstrom), diskontinuierliche aber häufige Messungen (Energycounter, Stromstärke $F=0,1\text{Hz}$) und tägliche Messungen (Ofentemperatur täglich, Chemie alle zwei Tage).

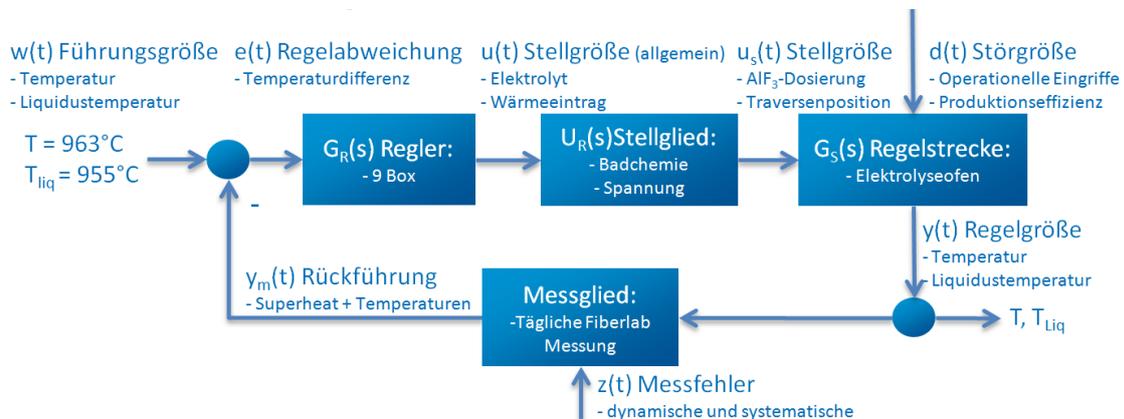


Abbildung 7.1: Ursprünglicher Regelkreis

7.1.2 Störgrößen

Chemisches Gleichgewicht

Eine der Hauptstörgrößen ist die Veränderung des chemischen Gleichgewichts durch Zu- oder Abnahme von Randkruste (Vergleich 5.6). Erfolgt eine Messung

der Liquidustemperatur nach Änderung der Randkrustenposition und vor Rückbildung der Kruste auf die Ursprungssituation, so wird eine Liquidustemperatur gemessen, die nicht dem zu regelnden Chemiehaushalt des Ofens entspricht. Während der Versuchsphase wurde die AlF_3 Zugabe manuell blockiert bzw. geeignet nachgefahren, um das Anfahren des alten Zielwertes zu verhindern. Ohne diese Blockade setzt ein Schwingen der AlF_3 Zugabe des Prozesssteuersystems ein, das auch bei massiven Änderungen des Na_2O -Gehaltes der Tonerde beobachtet werden kann (siehe Abbildung 7.2).

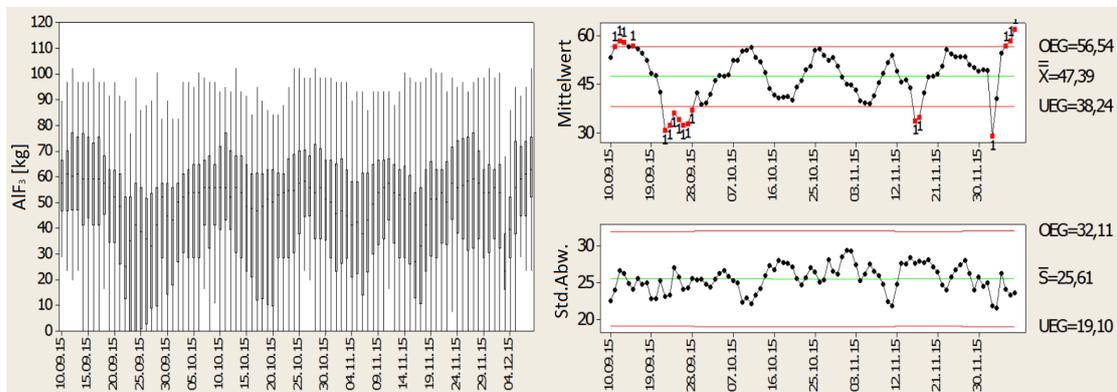


Abbildung 7.2: Schwingen der AlF_3 Zugabe

Unruhe

Proportional zur Stromstärkeänderung verändert sich auch die Unruhe im Ofen (siehe Kapitel 3.3.2). Dies kann bei Überschreiten der Grenzwerte der Strommodulation zu einem Anheben der Ofenspannung führen. Wird ein niedrigerer Grenzwert über einen längeren Zeitraum nicht mehr überschritten, wird die Spannungserhöhung schrittweise abgebaut. In nachfolgender Grafik um 6:40h wurde die Stromstärke (obere rote Linie) von 187kA auf 171kA abgesenkt und die Spannung (untere rote Linie) zur Kompensation angehoben. Aufgrund der nach Spannung reagierenden Unruhekontrolle (blaue Fläche), wurde vom System eine Zusatzspannung (Versatz des gelben Kontrollbandes) gegeben und erst gegen 10:40h schrittweise wieder abgebaut.

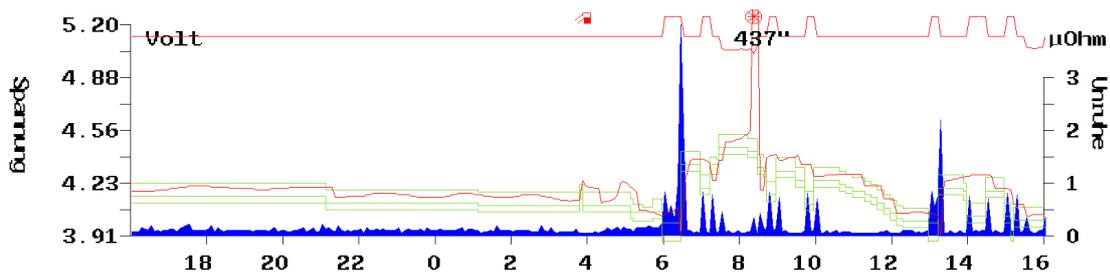


Abbildung 7.3: Unruhe und Spannung des Ofens 1109 am 25.11.2015

Systeme gegeneinander als Störgröße

Der Energycounter selbst besitzt ebenfalls mehrere Störgrößen. Die durch die Ergebnisse des Energycounters hervorgerufene Veränderung der Wärmebilanz, mittels Änderung des ACD und/oder Volumenstroms, ist Störgröße des aktuellen Prozessregelsystems der 9Box. Sollten dabei Resonanz des 9Box Systems und Anregung durch die Regelung des Energycounters ähnlich oder ein ganzheitliches Vielfaches voneinander darstellen, so werden sich die beiden Systeme aufschaukeln. Das aktuelle Prozessregelsystem 9Box wird ebenfalls Störquellen erzeugen. So werden Parameter, die während Modulationszeiten gemessen werden, das System anders beschreiben und somit nicht den Einfluss auf das System nehmen, der notwendig ist. Beide Verhalten wurden bei möglichen Regelungen erforscht und werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Maximale Stromstärke

Nicht direkt ein Störfaktor aber eine Begrenzung der Stromstärke lag bei 180kA. Die Analogeingänge im Ofenrechner liefern Zahlen zwischen 0 und 4095. Bislang entsprach 4095 einem Strom von 180kA. Um bis zu 240kA zu messen, musste das Messsignal des alesa Current (signal) Transmitter neu skaliert werden. Des Weiteren mussten die HUI „Handler Units Current“, die die Werte für die Prozesssteuerung liefern, entsprechend zur neuen Skalierung angepasst und die Programme, die davon Gebrauch machen, neu kompiliert werden. Dazu wurden

alle Werte auf einer virtuellen Einheit vorbereitet und dann auf die Ofenrechner in Halle eins kopiert.

Stromstärke

Die Veränderung der Stromstärke führt zu einer veränderten Energieaufnahme und Produktion. Bislang war eine gleichbleibende Stromstärke der Garant für eine energieeffiziente und vor allem stabile Produktion. In diesem Projekt ist die Stromstärke Stellgröße für den flexiblen Energieeintrag und somit Störgröße für die Wärmebilanz des Ofens.

7.1.3 Weitere Systemgrößen

Nachfolgend werden weitere Systemgrößen aufgelistet, die als Stellgröße ersten Grades verwendet werden, jedoch auch als Störgröße Einfluss auf das System haben.

- **Traversenposition:** Eine Veränderung führt zu einem veränderten ACD und damit zu einer veränderten Aufnahme von elektrischer Energie. Starke Änderungen haben jedoch Einfluss auf die Unruhe-Kontrolle. Des Weiteren kann durch massive Veränderungen Eindeckmaterial in den Ofen fallen.
- **Elektrolytzusammensetzung (AlF_3 , NaO):** Die aktive Zugabe der Bestandteile ändern als Stellgröße die Erstarrungstemperatur des Elektrolyten. Gleichmaßen ist die passive Zugabe (siehe Tab. 3.2) eine Störgröße, die die Erstarrungstemperatur, den Widerstand des Elektrolyten sowie den Prozesswirkungsgrad beeinflusst.
- **Seitenwandwärmetauscher:** Durch Änderung der Parameter verändert sich der Wärmeverlust des Ofens und somit die Stärke der Randkruste am Ofen und schlussendlich der Prozesswirkungsbereich.

Im Weiteren werden Stellgrößen zweiten Grades, zur Aufrechterhaltung des Produktionsprozesses, aufgelistet. Sie alle sind ebenfalls Störgröße der Regelung.

- **Elektrolytzusammensetzung (Al_2O_3):** Die Bestandteile ändern den Widerstand des Elektrolyten sowie den Prozesswirkungsgrad. Siehe Abb. 2.5.
- **Metall-/Elektrolytstand (Schöpfen):** Je nach Metall-/Elektrolytmenge verändert sich der Wärmeverlust des Ofens.
- **Ofenabdeckung, Ofenabsaugung:** Durch Änderung der Parameter verändert sich der Wärmeverlust des Ofens.
- **Manuelle Eingriffe:** Darunter der Anodenwechsel, das Traverseheben und Messungen am Ofen.

7.2 Lösungsansatz

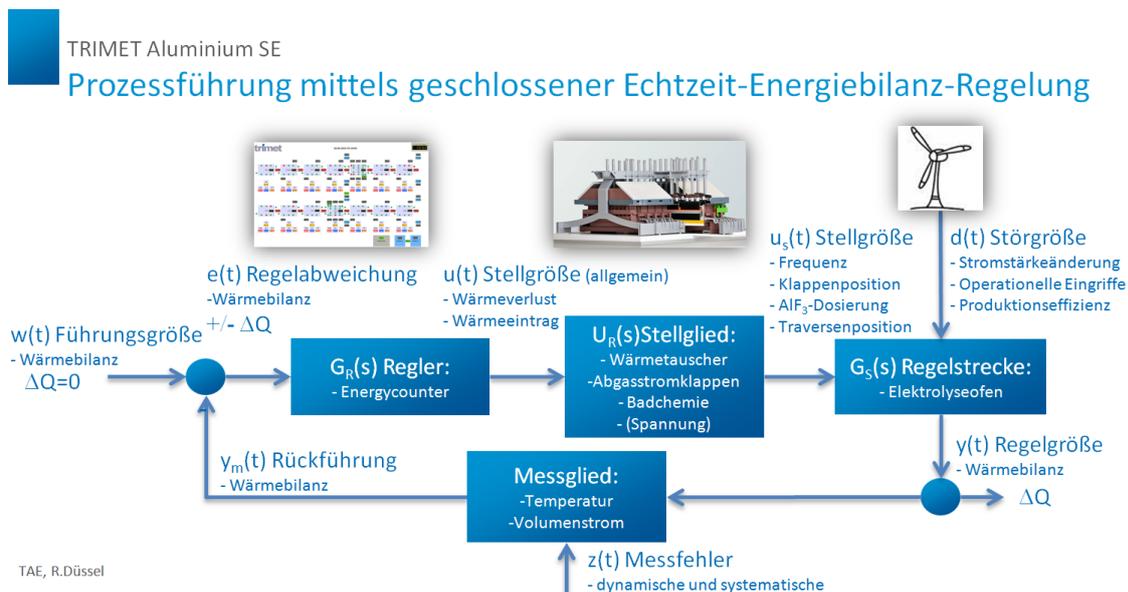


Abbildung 7.4: Lösungsansatz Regelkreis

Der Lösungsansatz ist der Energycounter selbst, dessen Art der Verwendung im Weiteren beschrieben wird. Die Stellgrößen Energie (ACD) und Chemie (AlF_3) werden um eine dritte Stellgröße erweitert; den Wärmeverlust (Volumenstrom).

Des Weiteren müssen auftretende Störgrößen wie Unruhe und auch die 9Box selbst minimiert oder eliminiert werden. Es wurden verschiedene Regelversuche über proportionale Regelungen (Proportionalität von Stromstärke zu Kühlleistung), bis hin zu einer Regelung mittels PI-Regler des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik virtuell (Kapitel 7.3.2) und real getestet. Aufgrund der Komplexität des Systems, der Vielzahl der zu regelnden Wärmetauscher (528St.) mit nur einem Ventilator, und da das bestehende Prozesssteuerungssystem (9Box) aktuell nicht ausgetauscht werden kann, stellte sich jedoch heraus, dass eine annähernd lineare Regelung der Wärmebilanz die geeignetste ist.

7.2.1 Kühlung anhand Wärmebilanzdifferenz (PI)

Für die Regelung der Kühlung wurde zusammen mit dem Lehrstuhl für Automatisierungstechnik [FT16] ein P- und ein I-Anteil verwendet. Zur Realisierung von $\Delta Q = 0$ wird mithilfe des Energycounters eine für die Ventilatoren der Wärmetauscher errechnete Stellgröße (Frequenz in Hz) ermittelt.

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_E - \dot{Q}_{V,SHE} - \dot{Q}_{V,Rest} - \dot{Q}_U - \dot{Q}_I = 0 \quad (7.1)$$

$$\dot{Q}_{V,SHE} = \dot{Q}_E - \dot{Q}_{V,Rest} - \dot{Q}_U - \dot{Q}_I \quad (7.2)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_{V,SHE}}{\Delta T \cdot c_p \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{3}{2}} \quad (7.3)$$

$$f = \frac{\dot{V} - 0,3 \frac{m^3}{s}}{0,26 m^3} \quad (7.4)$$

Der I-Anteil wird über die Wärmemengendifferenz Abbildung 6.3 berechnet. Überschreitet die Differenz einen festgelegten positiven oder negativen Grenzwert, wird die Frequenz um +/-3Hz verändert.

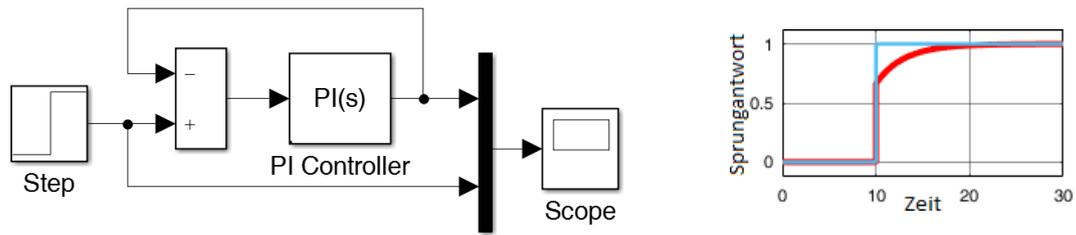


Abbildung 7.5: Vereinfachte Darstellung des PI-Reglers mittels SHE und Energycounter

Fazit:

Der I-Anteil wurde installiert, um eine auftretende Regelabweichung kontinuierlich zu minimieren. Leider bestätigten sich jedoch in der Testphase die zuvor gestellten Bedenken, dass sich die Wärmebilanz-Regelung und das Regelungskonzept des Ofens (9Box) gegenseitig anregen (aufschaukeln). Das 9Box System ist bereits parallel zur Aluminiumoxid-Regelung, Unruhe Regelung ein Mehrgrößensystem. Durch die Integration dieses weiteren Regelsystems werden dessen Führungsgrößen zu Störgrößen der bestehenden Systeme und lassen das Gesamtsystem instabil werden. Des Weiteren ist es deutlich effektiver, die Ursache der Änderung direkt bei der Entstehung zu bekämpfen. Die Wärme wird hauptsächlich im Bereich des Anoden-Kathoden-Abstandes erzeugt, somit ist eine Verringerung des Abstandes bei Stromstärke Erhöhungen und eine Maximierung bei Stromstärke Verringerungen sinnvoll. Schlussendlich ist es bei der Vielzahl von Öfen, 120 Stück mit 5280 Wärmetauschern in einem Regelkreis, schwierig mit einem Mittelwert zu regeln. Sollten sich einzelne Gruppen aufheizen und andere abkühlen, so ist der Mittelwert über alle Öfen ggfs. innerhalb des Sollbereichs oder wenn er das nicht ist, führt der Regler einige aus dem Bereich während andere hineingeführt werden. Aus den genannten Gründen wird nachfolgend eine lineare Regelung mit einfachem P-Glied vorgestellt. Mithilfe der Anpassung des ACD's kann im Zusammenspiel mit SHE und Energycounter das gewünschte Ergebnis erreicht werden. Für die Regelung einzelner Gruppen wird dann weiterhin das bewährte 9Box-Regelsystem verwendet. Dieses soll in den folgenden Jahren mit einem Prozessteam ebenfalls weiterentwickelt werden.

7.2.2 Proportionale Spannungsanpassung

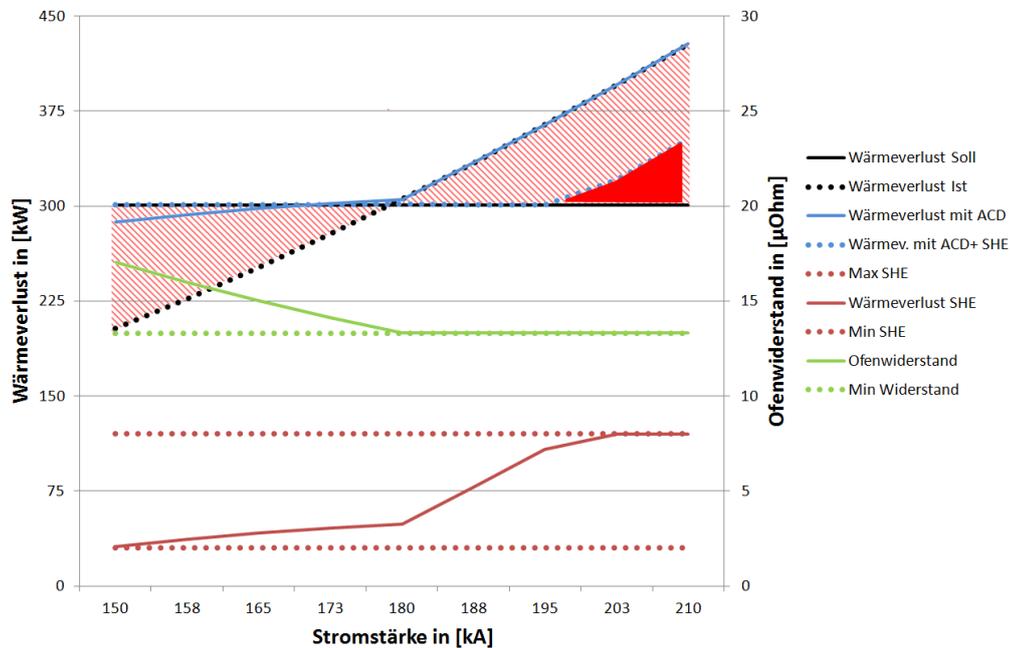


Abbildung 7.6: Regelung des Wärmeverlustes mittels SHE und ACD

Der größte Hebel zur Einhaltung der Wärmebilanz ist die Anpassung des Wärmehaushalts mittels Veränderung der Spannung (Vergleich Kapitel 3.3.3). So wird übermäßige Energie, hervorgerufen durch eine höhere Stromstärke, durch gleichzeitiges Absenken der Spannung kompensiert. Dies ist jedoch nur bedingt möglich, denn die Grenzen sind der minimale Ofenwiderstand sowie ein energieeffizienter Prozess. In Abbildung 3.12 ist schematisch das Prozessfenster dargestellt. Der minimal einzuhaltende Ofenwiderstand mit Magnetfeldkompensation liegt bei $13,3\mu\Omega$. Er berechnet sich aus der minimalen Ofenspannung von $3,90\text{V}$ (bei 162kA , Kapitel 3.3.3) abzüglich der durch die Installation der Magnetfeldkompensation reduzierten externen Spannungsverluste von $0,05\text{V}$ (bei 162kA , Kapitel 5.5) sowie einer Prozessverbesserung von $0,06\text{V}$.

$$\text{Ofenwiderstand}_{\min} = \frac{3,79\text{V} - U_{\text{Prod}}}{I_{\text{Hallenstrom}}} = 12,9\mu\Omega \quad (7.5)$$

Die Funktionsweise der Regelung aus Spannungsanpassung und Wärmetauscherregelung ist in Abbildung 7.6 vereinfacht dargestellt, dabei ist die Differenz des Wärmeverlustes zwischen Soll und Ist (Ist=302kW, Tab. 2.1) schraffiert dargestellt. Mit Absenkung des Ofenwiderstands (grüne Linie) bis zu seinem Minimum (grün gepunktete Linie), kann bis 180kA der Wärmeverlust annähernd konstant gehalten werden (blaue Linie). Darüber hinaus wird mit der Steigerung der Kühlleistung der Wärmetauscher (rote Linie) der Wärmeverlust bis etwa 200kA konstant gehalten (blau gepunktete Linie). Oberhalb von 200kA wird der Ofen sich definitiv aufheizen (rote Fläche). Somit können Werte über 200kA nur kurzzeitig angefahren werden, wenn keine andere Möglichkeit der Wärmereduzierung, wie beispielsweise das Anheben des Abgasstromes, installiert wird.

7.2.3 Unruhe Unterdrückung

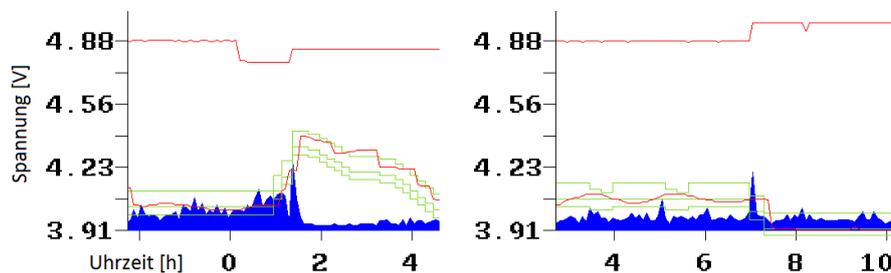


Abbildung 7.7: Unruhe des Ofens 1109 vor und nach Änderung der Unruhekorrektur

Um diesen Störfaktor zu umgehen muss die Unruhekorrektur anhand des Widerstandes in $\mu\Omega$ und nicht nach der Spannung in mV geregelt werden. Diese Anpassung konnte umgehend umgesetzt werden und so ein Auslösen der Unruhekorrektur durch Stromstärkeschwankungen verhindert werden. Des Weiteren müssen Spannungsanpassungen (Widerstandsanpassungen) mittels Veränderung des ACD's in den Unruhwert integriert bzw. von ihm subtrahiert werden. Nach Überprüfung des Quellcodes wurde diese Vorgehensweise bereits von der

Alusuisse integriert. In Abbildung 7.7 sind auf der rechten Seite keine Unruheschwankungen (blaue Fläche) nach Stromstärkeänderungen (obere rote Linie) mehr zu sehen. Nach erfolgreichem Test wurde die Korrektur an allen Öfen vorgenommen.

7.2.4 Anpassen der 9Box

Wie bereits in Kapitel 5.6 beschrieben, kommt es bei starker Modulation zu einem kurzzeitigen Versatz des chemischen und thermischen Gleichgewichts. Finden in dieser Zeit Temperaturmessungen statt, so erzeugen diese Werte eine Stellgrößenveränderung, welche wiederum selbst eine Regelungsdifferenz für den Zeitraum nach der Modulation hervorruft. Darüber hinaus kommt es durch das Aufheizen oder Abkühlen zu einem weiteren überlagerten Temperaturversatz. Damit die 9Box Regelung (Abb. 2.19) weiterhin stabil funktioniert, werden für Temperatur und Liquidustemperatur ein Versatz ermittelt, der in die Regelung eingeht. Schematisch ist diese Störgrößenaufschaltung auf die Regelgröße (vgl. Kapitel 2.2.1) in Abbildung 7.8 dargestellt.

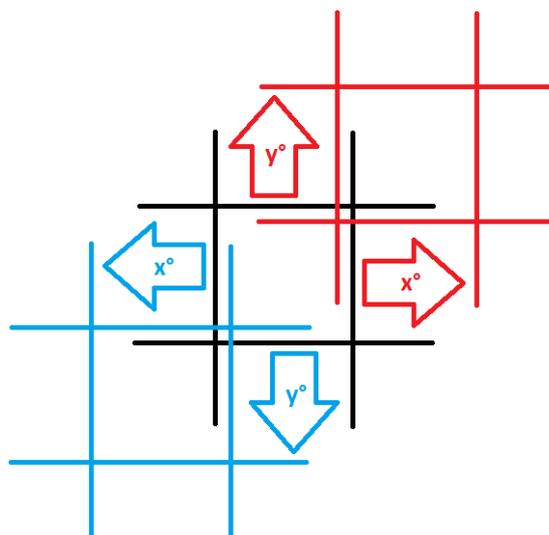


Abbildung 7.8: Versatz der 9Box bei Strommodulation

Temperaturversatz

Das ΔQ , ermittelt im Energycounter über einen Zeitraum von 12h, bestimmt die Größe des Temperaturversatzes. Dabei ist die Grenze von $\pm 8^\circ\text{C}$ eine, mithilfe der in Kapitel 5.6 beschriebenen Versuche, ermittelte Größe, die zum einen den maximal verlierbaren SH darstellt, zum anderen das System nicht so weit verändert, dass es instabil wird.

$$x' = \frac{1}{40} \frac{^\circ\text{C}}{\text{kWh}} \cdot \int_{t=-12h}^{0h} \Delta Q dt$$

$$x_{9\text{BoxVersatz}} = \begin{cases} -8^\circ\text{C} & \text{für } x' \leq -8^\circ\text{C} \\ 8^\circ\text{C} & \text{für } x' \geq 8^\circ\text{C} \\ \text{sonst } x' & \end{cases} \quad (7.6)$$

Liquidustemperaturversatz

Als Lösung für die AlF_3 Zugabe Regelung wird auch hier der Zielwert angepasst. Wird der Zeitstempel des Messwerts ausgelesen, kann dieser mit dem Modulationsplan, der schon 12h vorher bekannt ist (Vergleich Kapitel 4.2.1), abgeglichen werden und anhand des Energycounters das ΔQ zu der Zeit bestimmt werden. Mittels der Wärmeverteilung (Tabelle 5.2) kann dann nach folgender Gleichung ermittelt werden, wie viel Randkruste aufgeschmolzen wird.

$$m_{\text{Randkrustenverlust}} = 0,64 \cdot 6 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot \int_{t=0h}^{12h} \Delta Q dt \quad (7.7)$$

Mit abnehmender Randkruste muss die Zielgröße (Liquidustemperatur) proportional um einige $^\circ\text{C}$ angehoben werden. Das Verhältnis bei 3% x_{sAlF_3} der Randkruste und 15% Massenanteil in der Eindeckung sowie einem Aufschmelzverhältnis von neun zu eins (siehe Abb. 5.44) ist in nachfolgender Formel beschrieben.

$$y_{AlF_3} = \frac{m_{Elektrolyt,Soll} \cdot \phi_{AlF_3El.,Soll}}{m_{Elektrolyt,Soll} + m_{Randkrustenverlust}} + \frac{m_{Randkrustenverlust} \cdot (0,9 \cdot \phi_{AlF_33\%} + 0,1 \cdot \phi_{AlF_315\%})}{m_{Elektrolyt,Soll} + m_{Randkrustenverlust}} \quad (7.8)$$

In Abbildung 7.9 sind 375 gemessene AlF_3 und Liquidustemperaturen miteinander verglichen. Der Vergleich ist nicht direkt, da auch andere Elemente des Elektrolyten, z.B. der CaF_2 Gehalt, Einfluss auf die Liquidustemperatur haben. Eine Vergleichsmessung sollte alle zwei Jahre durchgeführt werden. Der 9Box Versatz für den Liquiduswert kann demnach mit folgender Gleichung beschrieben werden.

$$y' = \left(-0,4821 \frac{^{\circ}C}{xsAlF_3^2} \cdot y_{xsAlF_3}^2 + 7,3326 \frac{^{\circ}C}{xsAlF_3} \cdot y_{xsAlF_3} + 939,94^{\circ}C \right) - T_{Liquidus,Soll}$$

$$y_{9BoxVersatz} = \begin{cases} -8^{\circ}C & \text{für } y' \leq -8^{\circ}C \\ 8^{\circ}C & \text{für } y' \geq 8^{\circ}C \\ \text{sonst } y' & \end{cases} \quad (7.9)$$

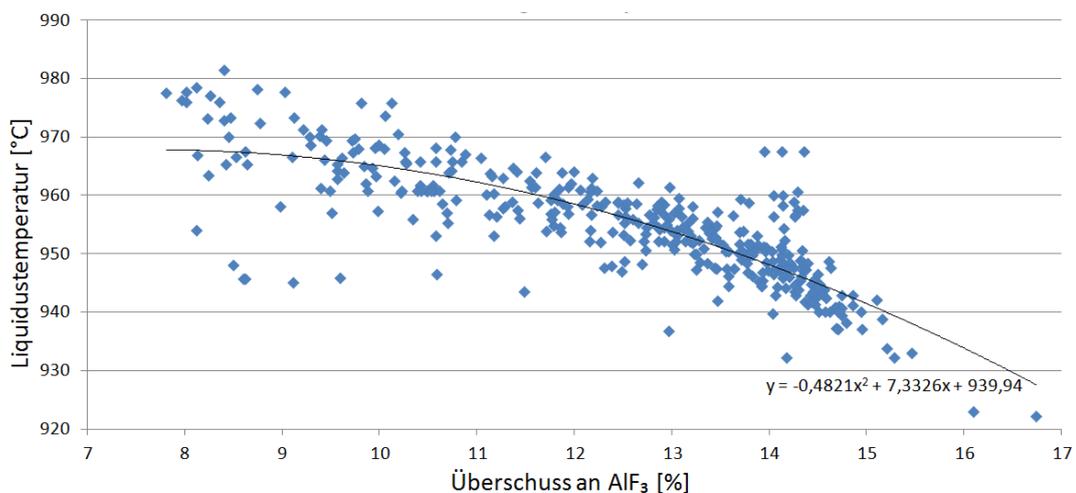


Abbildung 7.9: Vergleich von Liquidus und AlF_3 Wert am EPT14 Ofen 2015

7.2.5 Der neue Algorithmus

Schlussendlich wird der 9Box Algorithmus (Kapitel 2.2.3) nicht verändert. Störgrößen wie die Unruhe werden jedoch eliminiert und auftretende berechenbare (systematische) Messfehler werden konvertiert. Dabei spielt der Energycounter eine wichtige Rolle zur Ermittlung der Energiebilanz bzw. des aktuellen Zustandes des Ofens. Zur Gewährleistung des Prozesses wird weiterhin das Konzept verfolgt, die Einflüsse auf das System so gering wie möglich zu halten. Dabei bekommt der Begriff Stabilität eine neue Bedeutung. Eine gleichbleibende Elektrolyt-Temperatur ist nicht mehr ausschließlich Garant für die Stabilität, sondern eine sich in einem bestimmten Temperaturband befindende Elektrolyttemperatur.

Die Regelung wird mithilfe eines PT_1 -Gliedes, anhand der in Kapitel 7.2.2 SHE-Anpassung, beschrieben. Zur Kompensation des Zeitversatzes des thermischen Verhaltens der Randkruste (siehe Kapitel 4.3.1) ist das PT_1 -Glied negativ dargestellt, so dass die Sprungantwort den Zielwert überschreitet und sich von der Gegenseite annähert. In nachfolgender Abbildung sind das vereinfachte Ablaufdiagramm und dessen Sprungantwort schematisch dargestellt. Dieses Regelverhalten ist ausschließlich für den Wärmeverlust über die SHE, während die Regelung mittels ACD mit einem einfachen P-Glied mit Verzögerung erfolgt.

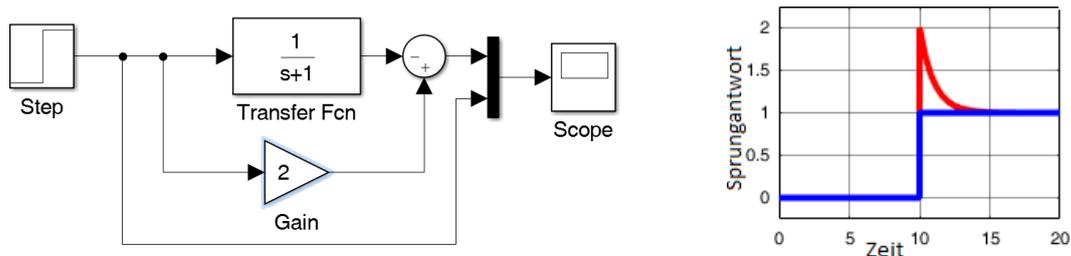


Abbildung 7.10: Überschwingen der Kühlung zur schnelleren Einstellung des Wärmeverlustes

Ermittlung der Stellgrößen:

$$\begin{aligned} \dot{Q}'_{V,SHE} &= m \cdot (I - 180kA) + 30kW \\ \text{mit } m &= \begin{cases} 3,625 \frac{kW}{kA} & \text{für } I \geq 180kA \\ 0,6 \frac{kW}{kA} & \text{für } I \leq 180kA \end{cases} \quad (7.10) \\ \text{und } \dot{Q}_{V,SHE} &= \begin{cases} 120kW & \text{für } \dot{Q}'_{V,SHE} \geq 120kW \\ 30kW & \text{für } \dot{Q}'_{V,SHE} \leq 30kW \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R'_{ACD} &= -0,12 \frac{\mu\Omega}{kA} \cdot (I - 150kA) + 17,07\mu\Omega \\ R_{ACD} &= \begin{cases} 17,07\mu\Omega & \text{für } R'_{ACD} \geq 17,07\mu\Omega \\ 12,90\mu\Omega & \text{für } R'_{ACD} \leq 12,90\mu\Omega \end{cases} \quad (7.11) \end{aligned}$$

Übertragungsfunktion ACD-Anteil:

$$G_{\{ACD\}}(s) = K_{ACD} \quad (7.12)$$

Im Versuch stellte sich heraus, dass der minimale ACD nicht mit einem Sprung größer 20mV innerhalb 15min erreicht werden kann. Aus diesem Grund werden ACD Änderungen, die den minimalen ACD erreichen, in zwei Schritten durchgeführt.

Regelabweichungen sowie prozesstechnische Abweichungen werden durch das angepasste Spannungskontrollband (siehe Abbildung 7.19 untere grüne Linien), ausgeglichen.

Übertragungsfunktion SHE-Anteil:

$$G_{\{SHE\}}(s) = \frac{-K_{SHE}}{T \cdot s + 1} + 2 \quad (7.13)$$

Die Sprungantwort des vorliegenden PT_1 -Systems kann wie folgt beschrieben werden:

$$y(t) = e^{-\frac{t}{T}} + 1 \quad (7.14)$$

Zur Kompensation der Reaktionszeit von ca. 2h (Kapitel 4.3.1) wird der Wärmeverlust über einen definierten Zeitraum stärker verändert. Die einzustellende Wärmeverluständerung wird verdoppelt und nähert sich dann asymptotisch dem einfachen Wert an. Dabei ist die Zeitkonstante so zu wählen, dass die Fläche der verstrichenen Zeit (verlorenen Wärmeverlustes) gleich der gewollt überkompensierten Zeit ist. Gleichung 7.15 zeigt den Rechnungsweg und Abbildung 7.11 die beiden Flächen. Zur Kompensation wird für die Zeitkonstante ein Wert von $T = 7200s$ eingestellt.

$$\begin{aligned} \int_{7200s}^{\infty} 1 + e^{-t/T} dt &= \int_{0s}^{\infty} 1 dt \\ \Leftrightarrow \int_{7200s}^{\infty} e^{-t/T} dt &= \int_{0s}^{7200s} 1 dt \\ \Leftrightarrow -T \cdot e^{-\infty/T} + C - (-T \cdot e^{0s/T} + C) &= 7200s - 0s \\ \Leftrightarrow T &= 7200s \end{aligned} \quad (7.15)$$

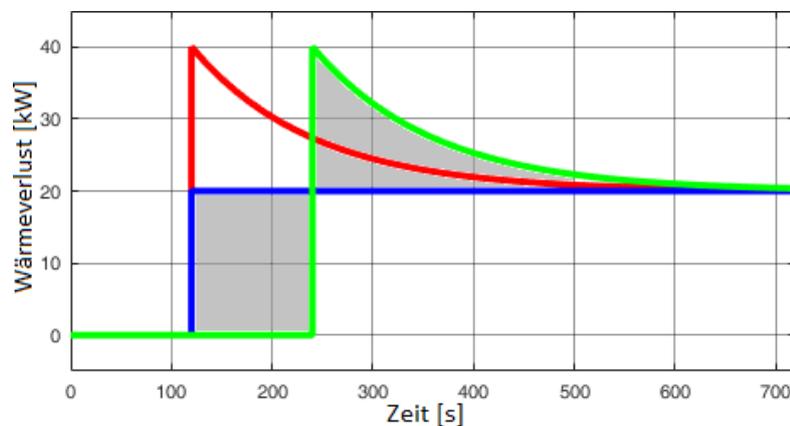


Abbildung 7.11: Verhalten des Systems

Gesamtübertragungsfunktion:

$$G(s) = G_{\{ACD\}}(s) \cdot G_{\{SHE\}}(s) \quad (7.16)$$

Differentialgleichungen:

$$y(t) = K \cdot u_{ACD}(t) \quad (7.17)$$

$$-T \cdot \dot{y}(t) - y(t) + 2 = K \cdot u_{SHE}(t) \quad (7.18)$$

7.3 Untersuchung des Verhaltens des geregelten Systems

Ziel dieses Kapitels ist es, den entworfenen Regler auf seine Leistungsfähigkeit hin zu untersuchen. Dabei werden die Untersuchungen in zwei Aspekte unterteilt. Der Erstellung eines virtuellen Systems und Test dieses Systems mit dem entworfenen Regler sowie der Test des realen Systems in der Booster-Gruppe. Ein allgemeines virtuelles System wurde mithilfe von Matlab und Simulink zusammen mit der Firma KANNAK entworfen [Ant16]. In dieses System wurden im Rahmen dieser Dissertation das 9Box System sowie die Echtzeit-Energiebilanz-Regelung eingebaut. Des Weiteren musste das System auf den EPT-14 Ofen und alle Arbeitsabläufe (Anodenwechsel u.v.a.) angepasst werden.

7.3.1 Aufbau eines virtuellen Systems

In der Systemmodellierung und Simulation ist die Entwicklungsplattform Matlab stark verbreitet, [Mat16], [Hof97]. Matlab verfügt über eine eigene Scriptsprache sowie über eine große Auswahl an Toolboxen zu verschiedenen Anwendungsbe-reichen wie Statistik und Steuerungs- und Regelungstechnik. Die leistungsfähige

mathematische Entwicklungsumgebung basiert hauptsächlich auf Matrizenkalkulationen. Zusammen mit Matlab bietet Simulink eine komplett integrierte Arbeitsumgebung für Analyse, Modellierung, Visualisierung und Simulation von dynamischen Systemen an. Das vorliegende System wurde mithilfe von Simulink modelliert, in welcher Komponenten, wie z.B. ein PI-Regler, aus Bibliotheken entnommen und in einem Blockschaltbild in Verbindung gebracht werden. Eine ideale Prozessregelung benötigt mathematische Beziehungen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie Werte der Zustandsfunktionen. Eine direkte kontinuierliche Bestimmung dieser Werte ist im Fall der Aluminiumschmelzflusselektrolyse oft technisch nicht möglich. Das nachfolgende numerische Modell beschreibt diese Werte bzw. das Verhalten des Systems über einen festgelegten Zeitraum. Mithilfe aus der Literatur entnommenen Systembeschreibungen, Differentialgleichungen, Zusammenhängen und unter Wechselwirkung bestehenden Komponenten wurde der Prozess der Schmelzflusselektrolyse in Simulink modelliert [Ant16]. Zur Formulierung des Zeitverhaltens des Widerstandes und der Aluminiumoxidkonzentration wurden z.B. einfache Differentialgleichungen wie die nachfolgende verwendet. C beschreibt die Menge an ungelöstem Aluminiumoxid und K die Konstante für das Lösen von Aluminiumoxid. Für die Fütterungsregelung wird ein Polynom zweiten Grades des Widerstandes gebildet und von diesem die erste und zweite Ableitung über die Zeit berechnet [Ant16].

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot C \quad (7.19)$$

$$R(t) = A \cdot t^2 + B \cdot t + C \quad (7.20)$$

$$\frac{dR}{dt} = 2 \cdot A \cdot t + B \quad (7.21)$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = 2 \cdot A \quad (7.22)$$

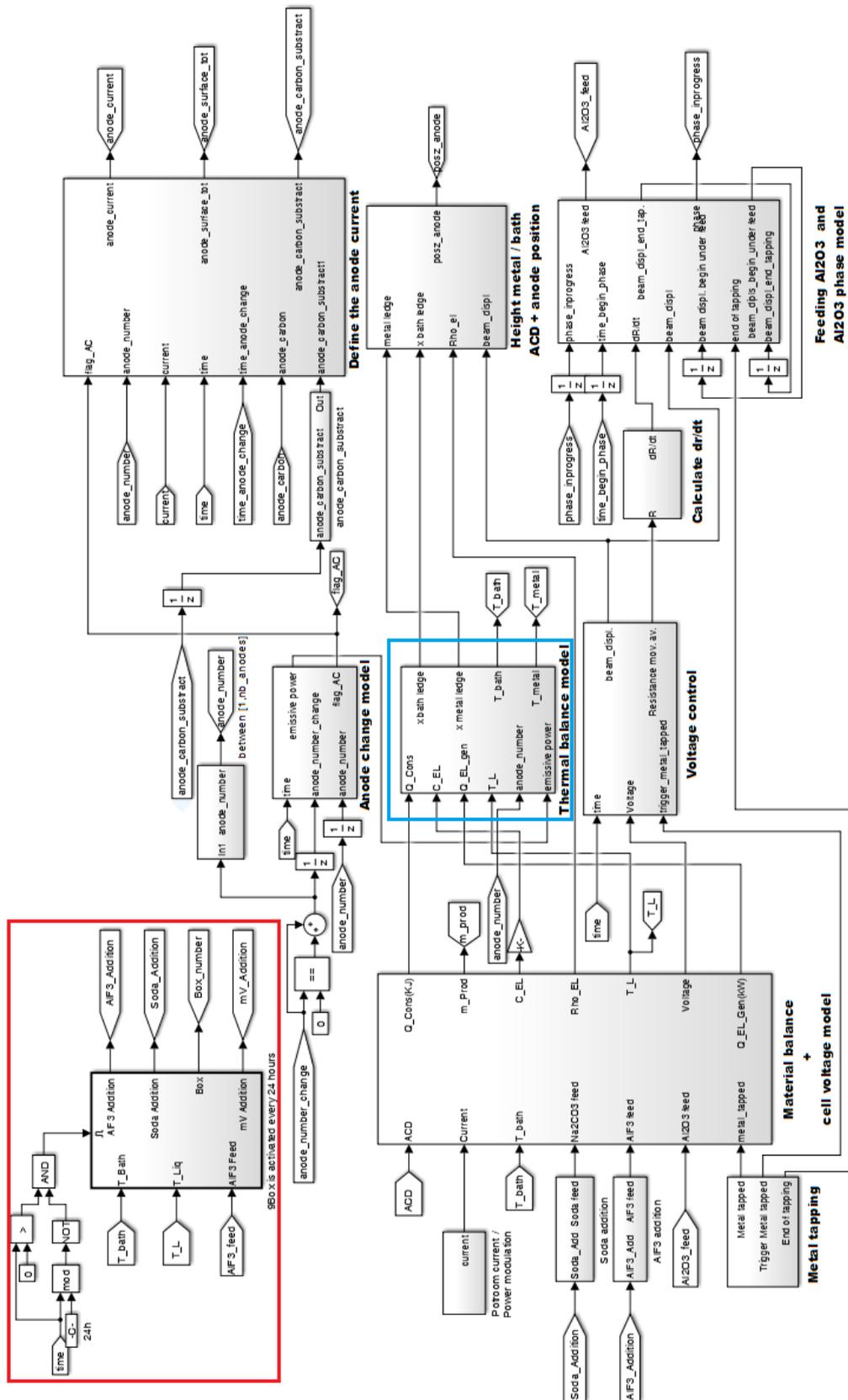


Abbildung 7.12: Aufbau des EPT14 Elektrolyseprozesses mit 9Box, Wärmebilanzregelung und Energycounter

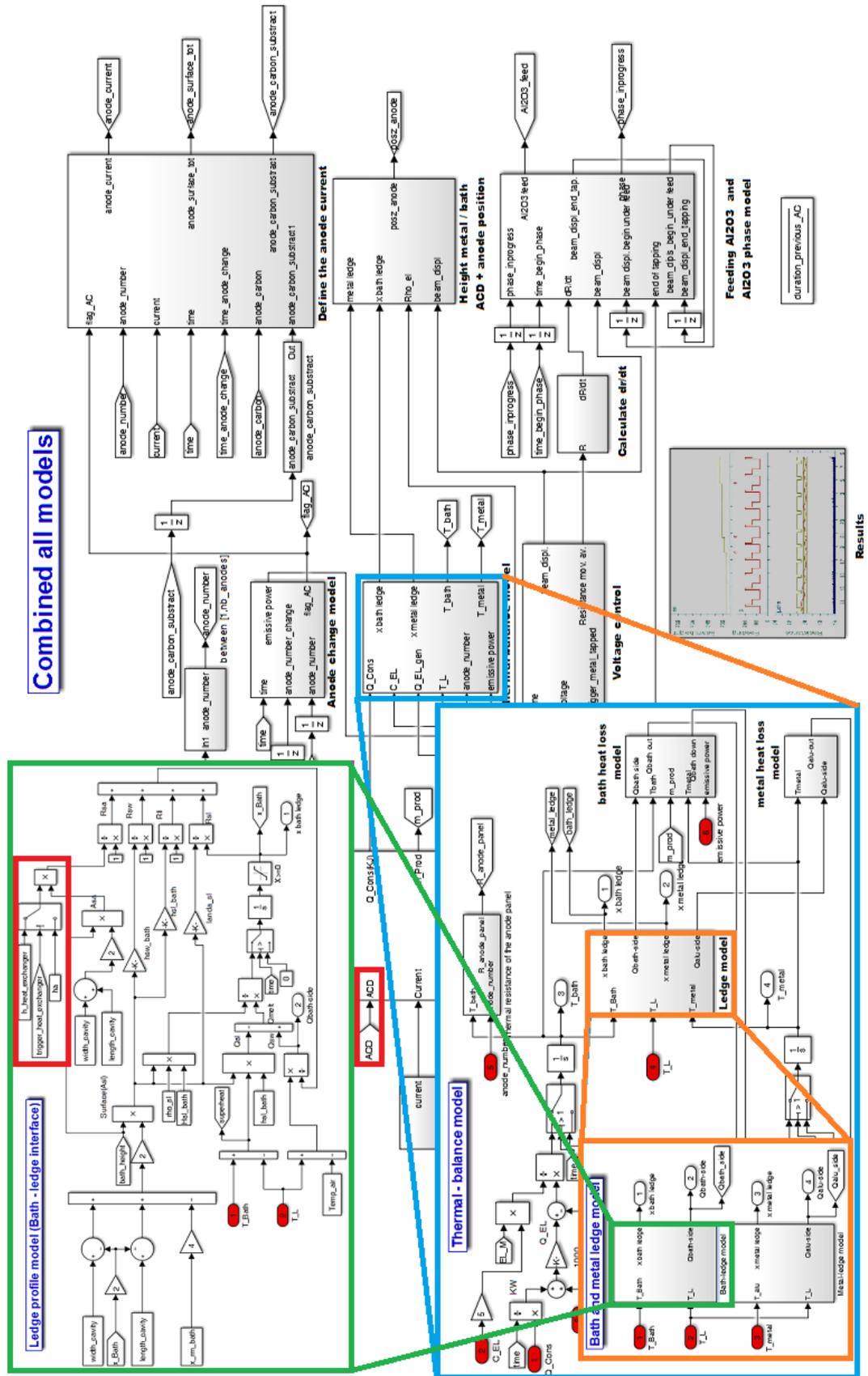


Abbildung 7.13: Aufbau des Prozesses mit 9Box, Wärmebilanzregelung und Energycounter

Im Rahmen der hier vorliegenden Dissertation wurden nachträglich die Umgebungsbedingungen wie z.B. Wärmeverluste, Ofenmaterialien und Kennzahlen, Arbeitsabläufe, Maße, sowie die Wärmetauscher identifiziert und in das System integriert. Des Weiteren wurde das Simulationssystem um die vorhandenen Prozessregelungen, wie den 9Box-Algorithmus, die Unruhe-Erkennung und Zusatzspannungen für Anodenwechsel zusammen mit der ausgearbeiteten Echtzeit-Energiebilanz-Regelung, erweitert. Die einzelnen mathematischen Systeme sind miteinander vernetzt, wobei Ergebnisse eines Systems Eingang für ein anderes System sind. So ist z.B. der ACD Ausgang des Spannungssystems und der Eingang für das Stromausbeutesystem oder die Temperatur Ausgang des thermischen Bilanzsystems und der Eingang für die Berechnung der Materialeigenschaften wie der Leitfähigkeit des Elektrolyten. In Abbildung 7.12 ist die Gesamtübersicht des Systems, mit dem 9Box-Algorithmus in rotem Rahmen und der Wärmebilanzregelung in blauem Rahmen, dargestellt. Insgesamt verfügt das System über 7944 Objektbausteine, die in Wechselwirkung miteinander stehen.

Das Gesamtsystem wurde, zur besseren Übersicht, in einzelne Untersysteme aufgeteilt. Abbildung 7.13 zeigt dies am Beispiel des Wärmeverlustes mithilfe der Wärmetauscher. Der Wärmeverlust über die Wärmetauscher (dargestellt in Rot) ist Eingangsgröße des Randkrustenmodells, welches wiederum Teil des Wärmebilanzmodell ist und im Gesamtmodell eingebettet ist. Ebenfalls in Rot dargestellt ist der ACD, der als Eingangsgröße für das Spannungsmodell im Hauptsystem fungiert. Beide Eingangsgrößen sind Ausgangsgrößen der beschriebenen Echtzeit-Energiebilanz-Regelung, die übergeordnet in das System eingreift.

7.3.2 Test des virtuellen Systems

Zur Verifikation wurde das System parallel mit EPT14 Öfen der Halle 1 getestet. In einem Zeitraum von zwei Wochen zeigen System und Realität gleiche Verhaltensweisen. Dabei sind die Unterschiede zwischen System und Realität minimal selbst-korrelierend. Mittelwert und Standardabweichung sind aber nicht wesentlich verschieden. Sogar ein besonderes Problem der 9Box, das Schwingen zwi-

schen Box eins und neun bei einer massiven Abweichung, z.B. ein Anodeneffekt oder das Verschlammen (siehe Kap. 2), konnte im virtuellen System nachgewiesen werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird einer der durchgeführten Modulationsversuche und die Ergebnisse beschrieben.

Im durchgeführten Test wurde am zweiten Tag um 9:00h die Stromstärke von 175kA auf 186,5kA erhöht. Laut beschriebener Theorie (Abbildung 7.6) kann bis 180kA der ACD bis zum Spannungsminimum abgebaut werden. Nach Gleichung 5.4 wird die Spannung um 40mV reduziert und darüber hinaus, zur Aufrechterhaltung der Wärmebilanz, der Wärmeverlust über die Wärmetauscher um 20kW angehoben. In Simulink wird dies über einen höheren Wärmedurchgangskoeffizienten $\frac{W}{m^2K}$ realisiert. In Abbildung 7.14 sind diese Änderungen dargestellt.

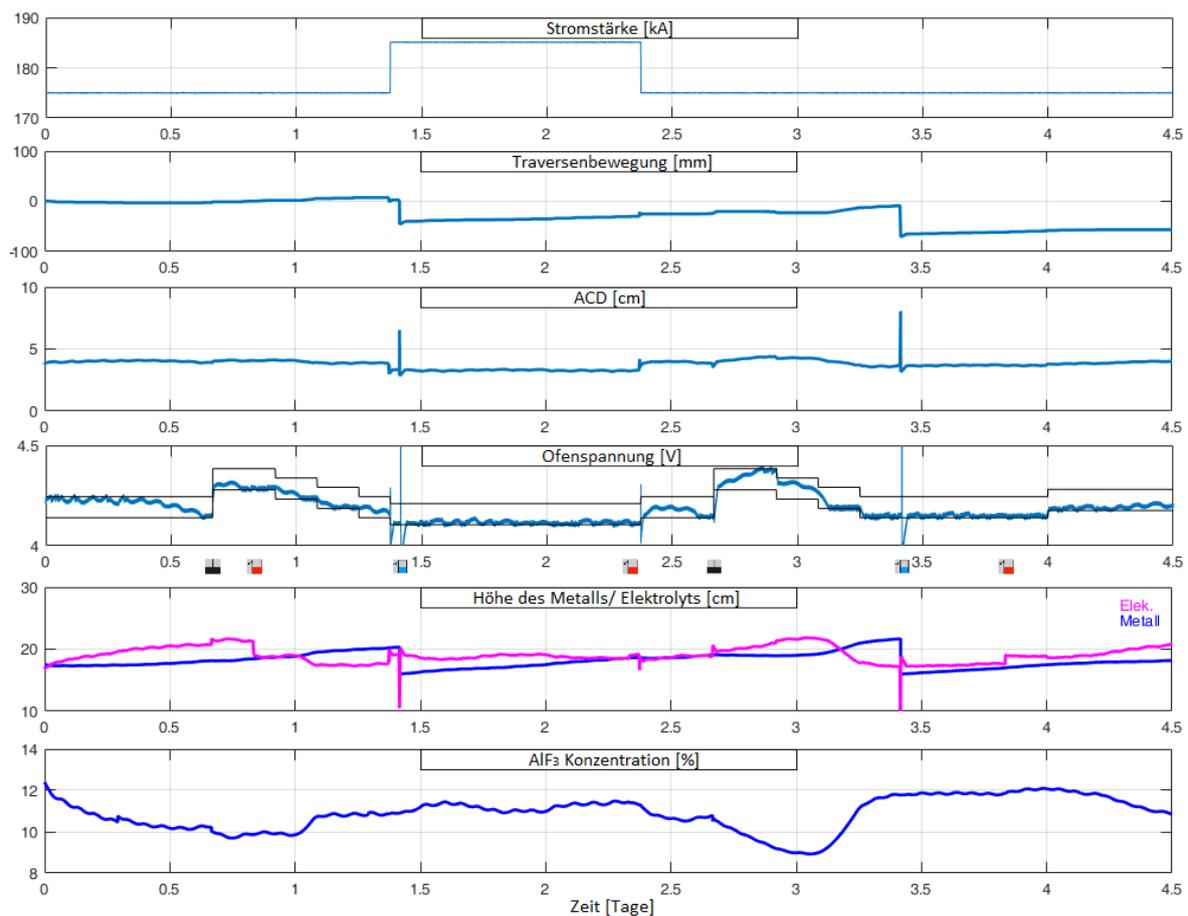


Abbildung 7.14: Grafiken mit Stromstärke und Spannungsänderungen des virtuellen Systems

7.3 Untersuchung des Verhaltens des geregelten Systems

Die Traverse bewegt sich nach unten und verringert den ACD um den entsprechenden Wert (Abb. 7.14). Dies hat direkten Einfluss auf den Elektrolytstand und die Spannung. Aufgrund des Aufschmelzens von Elektrolyt verändert sich ebenfalls der Aluminiumfluorid-Gehalt.

Abbildung 7.15 zeigt die durch den Versuch resultierenden Temperatur- und Randkrustenänderungen. Durch die positive Veränderung des Wärmeverlustes über die Seiten, kann die Randkruste gehalten werden und der Anstieg an Elektrolytmenge ist minimal. Temperatur und Liquidustemperatur des Elektrolyten bleiben, wie auch der Superheat, konstant.

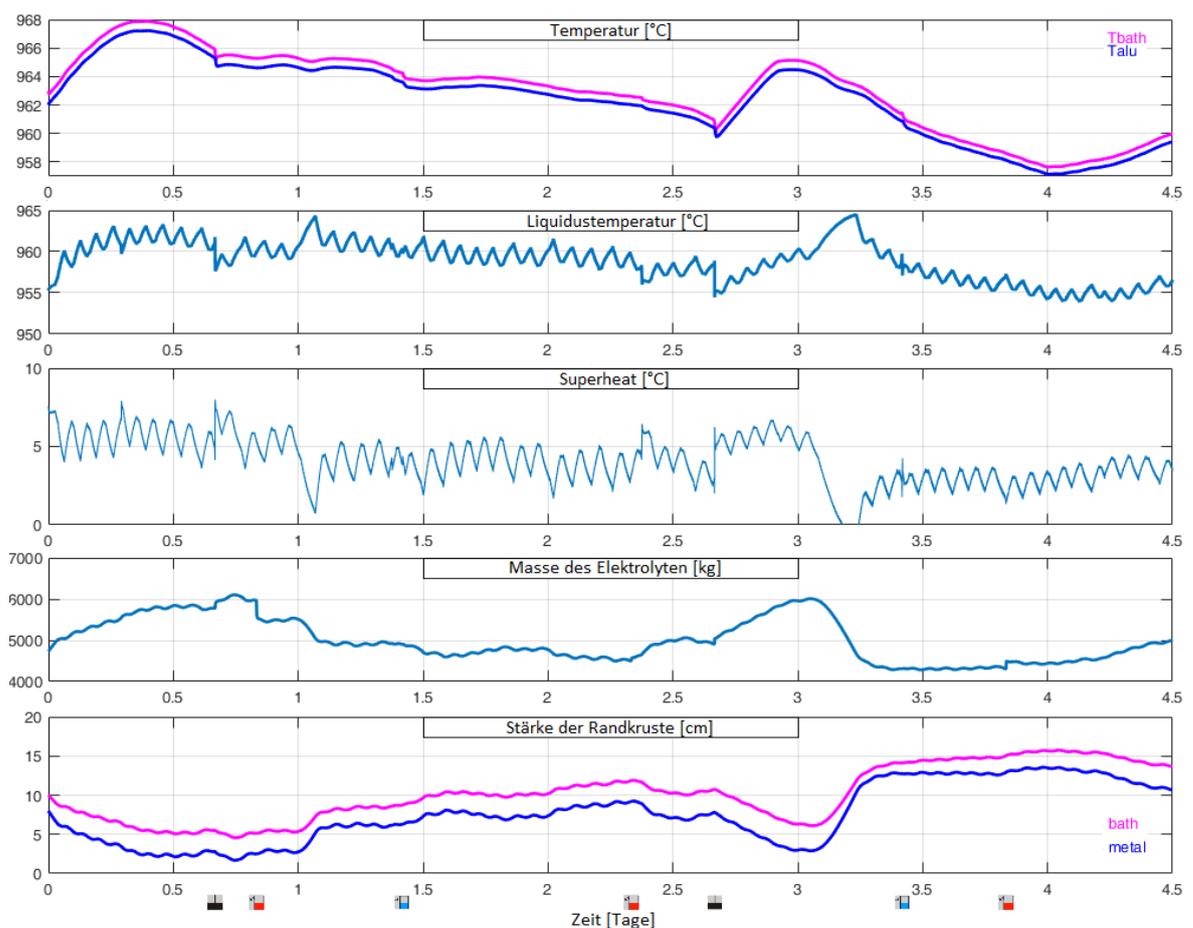


Abbildung 7.15: Grafiken mit Temperaturen und Randkrustenstärke des virtuellen Systems

In Abbildung 7.16 ist der Temperaturanstieg, ohne Kompensation durch Spannungsreduzierung und Wärmeverluständerung, abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturen des Systems innerhalb kürzester Zeit außerhalb des Regelbereichs laufen. Die simulierten Versuche zeigen, dass ein so betriebener Ofen die schützende Randkruste verliert und irreparabel zerstört wird. Darüber hinaus führt der massive Abfall der Temperatur nach Ende der Modulation zu einem Superheat gegen null. Somit ist ein Lösen von Tonerde nach der Modulation nur schwer möglich und führt zu einem Verschlammen des Ofens.

Durch Anheben der Stromstärke steigt die Spannung der stromdurchflossenen Ofenmaterialien proportional an (Abb. 7.17), während durch die Reduzierung des ACD's ein Großteil der Spannungserhöhung kompensiert werden kann. Die Veränderung des Spannungsabfalls ist in genannter Abbildung in grün dargestellt. Die Wärmeverluste (Abb. 7.18) verändern sich kaum. Lediglich die Wärmeverluste über die Ofenoberseite (blau) steigen leicht an, da die Produktion von Aluminium und damit auch von CO_2 proportional zur Stromstärke ansteigt. Kompensiert wird die zusätzliche Wärmeerzeugung mit dem massiven Anstieg der Wärmeverluste über die Ofenseiten durch die Wärmetauscher (in rot dargestellt).

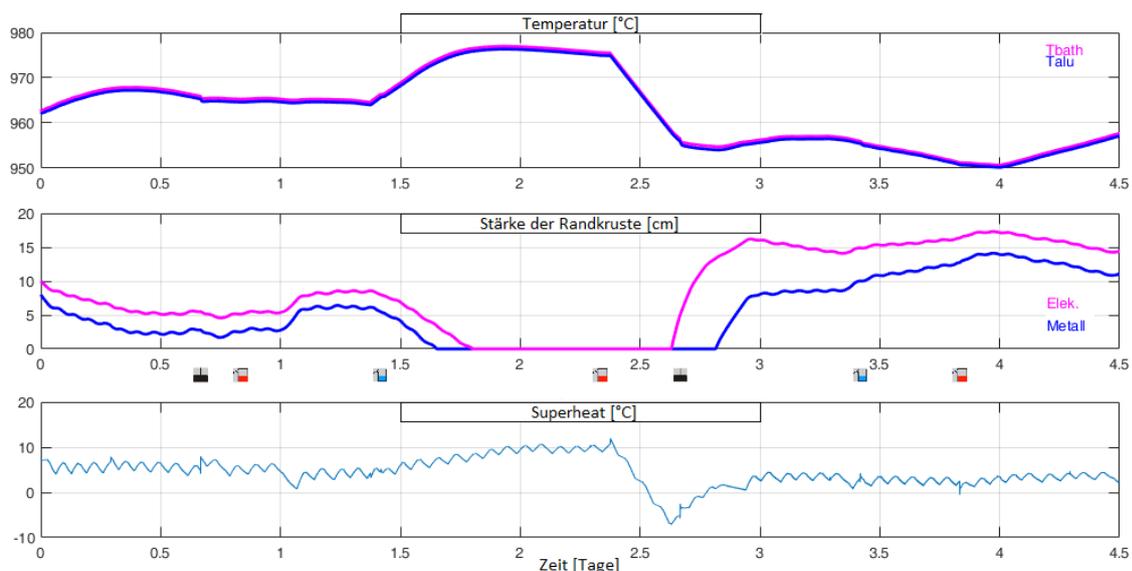


Abbildung 7.16: Grafiken der Temperaturen des virtuellen Systems ohne Kompensation

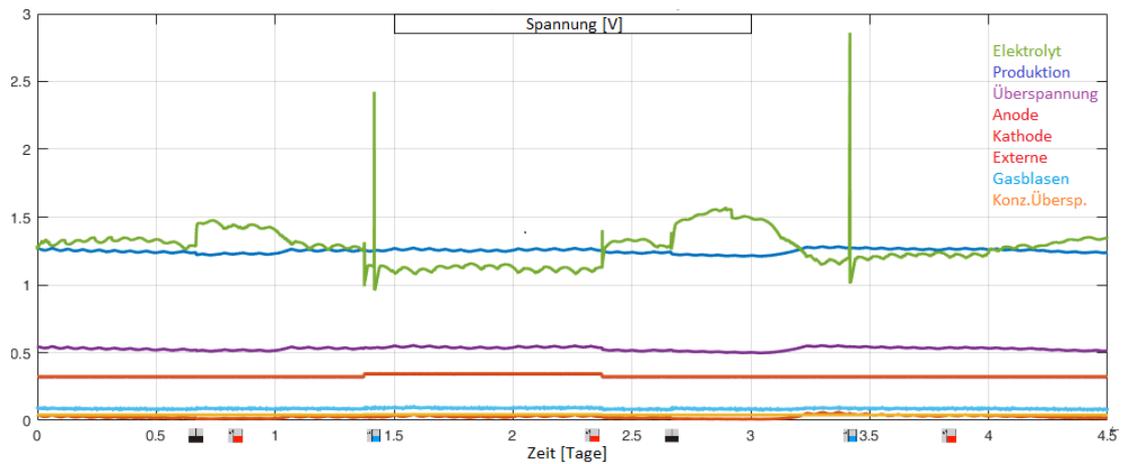


Abbildung 7.17: Grafiken der Spannungen des virtuellen Systems

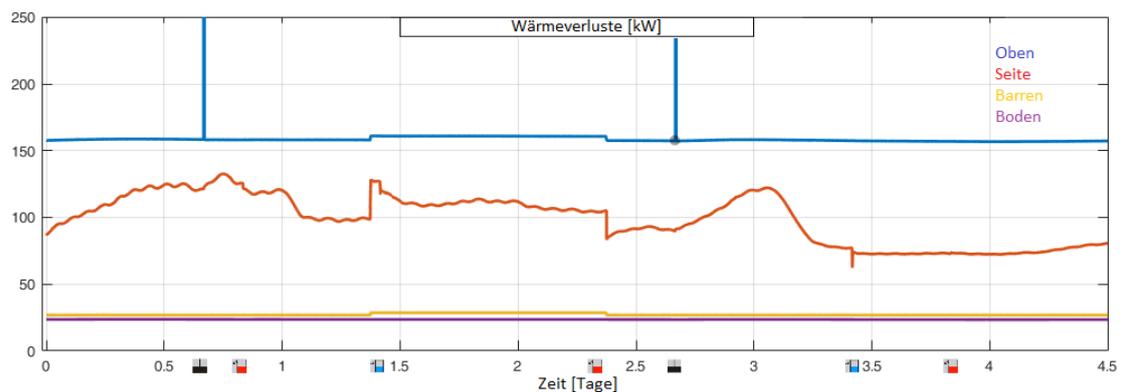


Abbildung 7.18: Ausgabegrafiken der Wärmeverluste des virtuellen Systems

7.3.3 Reale Versuchsdurchführung

Im vorigem Abschnitt wurde gezeigt, dass theoretisch (virtuell) mithilfe der geeigneten Einstellung eine Flexibilisierung unter gewissen Rahmenbedingungen möglich ist. Zur Verifizierung wurden die gleichen Parameter im realen Versuch angewandt. Die thermischen Rahmenbedingungen werden besonders in der realen Versuchsdurchführung durch operationelle Rahmenbedingungen, wie dem

minimalen ACD, ergänzt (siehe Kapitel 7.2.2). In früheren Versuchen ist bei direktem Anfahren des minimalen ACD's mit Schritten größer 30mV die Unruhe des Ofens stark angestiegen. Aus diesem Grund wurde der minimale ACD in zwei Schritten von jeweils 20mV durch Absenken der Traverse angefahren (Abbildung .12).

Nachfolgende Abbildung 7.19 stellt den Verlauf der Parameter an einem der zwölf Versuchsofen dar. Weitere Grafiken der anderen Öfen sind im Anhang .3 abgebildet. Nach der Stromstärkeerhöhung (rote Linie unter der Schrift „Volt“) und der Spannungsabsenkung (rote Linie zwischen den grünen Linien), bleibt die Unruhe (blaue Fläche) weiterhin auf niedrigem Niveau.

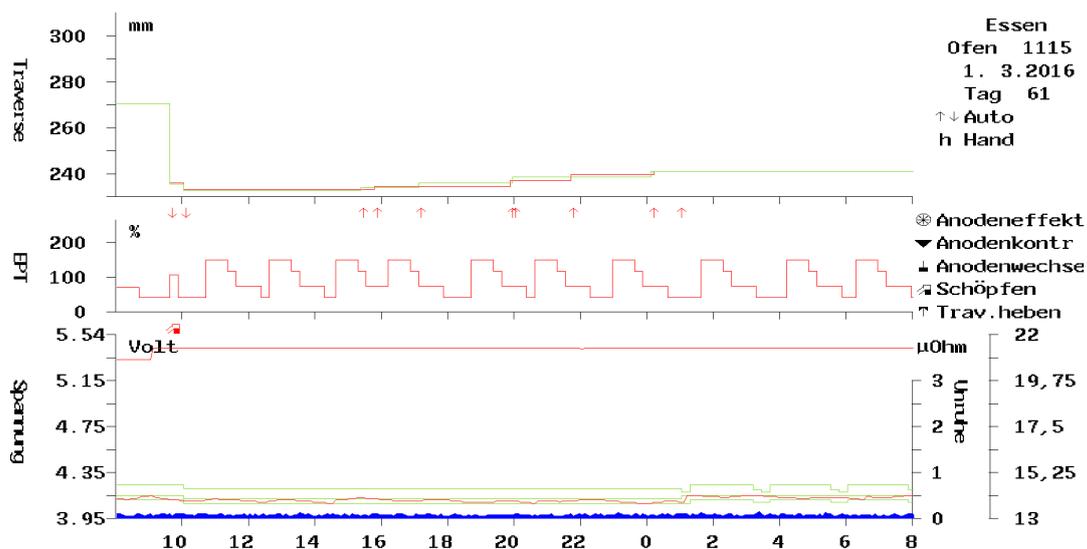


Abbildung 7.19: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1115

Der Wertebereich der Spannung nimmt mit Start des Versuchs um 9 Uhr nur minimal zu, wie in Abbildung 7.20 zu erkennen ist. In einem früheren Versuch (Abbildung 7.21) wurde der Bereich nach Modulationsstart zum Teil verdreifacht. Hauptursache waren das Unterschreiten des minimalen ACD's, sowie eine unzureichende Kühlung mittels der Wärmetauscher, welche linear und ohne das PT_1 -Verhalten ausgeführt wurde.

7.3 Untersuchung des Verhaltens des geregelten Systems

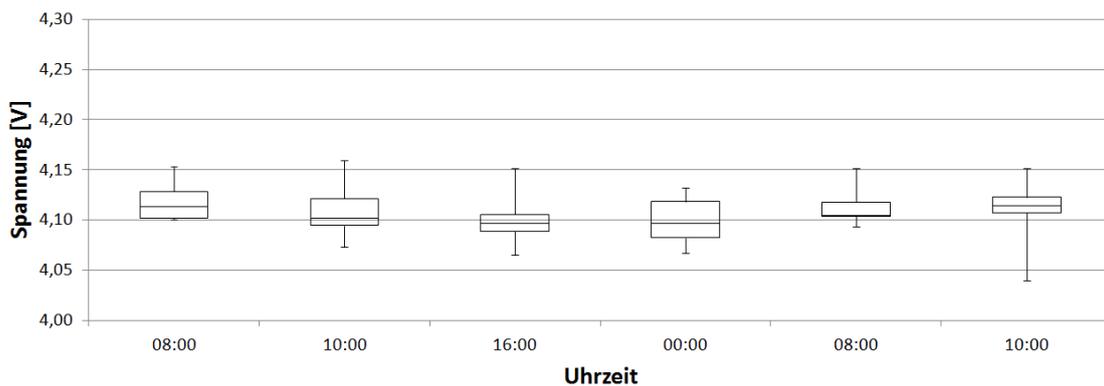


Abbildung 7.20: Spannungsverteilung der Öfen während der Versuchsdurchführung 1.3.16

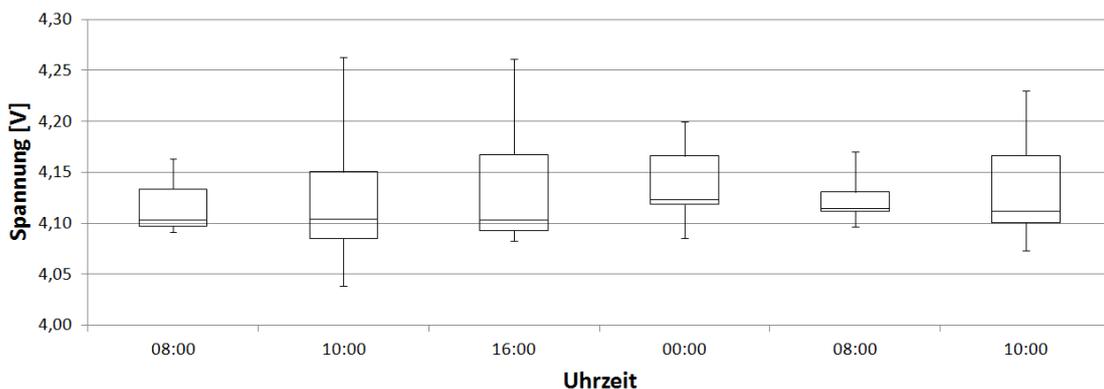


Abbildung 7.21: Spannungsverteilung der Öfen während einer früheren Versuchsdurchführung

In der realen Versuchsdurchführung wurde gleichermaßen der Wärmeverlust über die Wärmetauscher um 20kW angehoben. In Abbildung 7.22 ist der Wärmeverlust über die Wärmetauscher, berechnet nach den Grundlagen aus Kapitel 6, dargestellt. In Summe lag der Wärmeverlust bei allen zwölf Öfen bei ca. 900kW und wurde auf 1150kW angehoben. Grafiken zur Luftmenge und den aufgenommenen Thermoelementen an der Ofenwand sind im Anhang in den Abbildungen .13 und .14 abgebildet.

Die Temperatur der Versuchsofen verhielt sich vor und während des Versuchs ähnlich der Referenzgruppe. Lediglich der Messwert am 02.03.2016, am Ver-

suchsende, zeigt einen massiven Anstieg. Daraufhin folgt ein Abdriften der Temperatur der Versuchsgruppe gegenüber der Referenzgruppe. Dieses Phänomen wurde bereits in den vorigen Kapiteln erläutert, sowie eine Lösung in Kapitel 7.2.4 beschrieben. Durch Implementierung des 9-Box Versatzes wird die starke Spannungsanpassung der 9-Box-Regelung verhindert. Durch diese Maßnahme kann das Abdriften der Temperatur (Abbildung 7.23) nach Versuchsdurchführung verhindert werden.

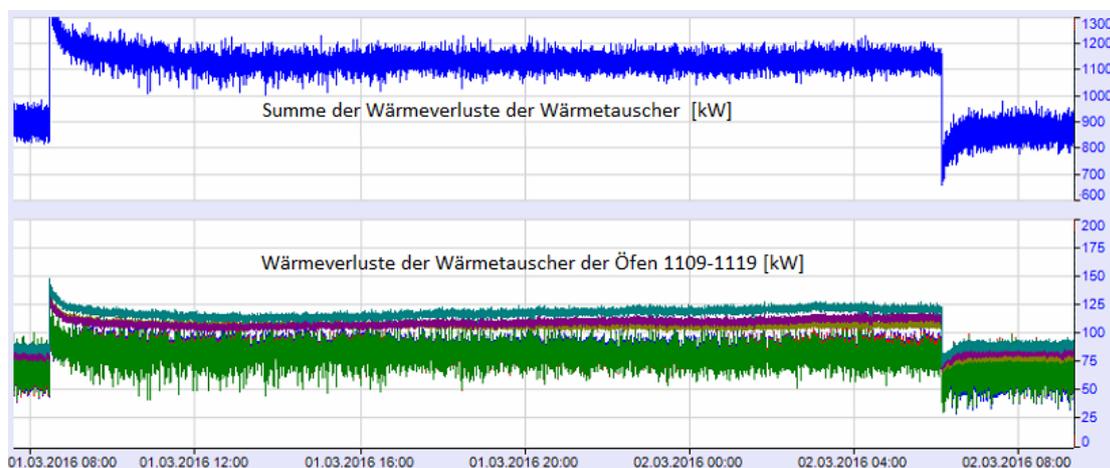


Abbildung 7.22: Wärmemenge der Wärmetauscher

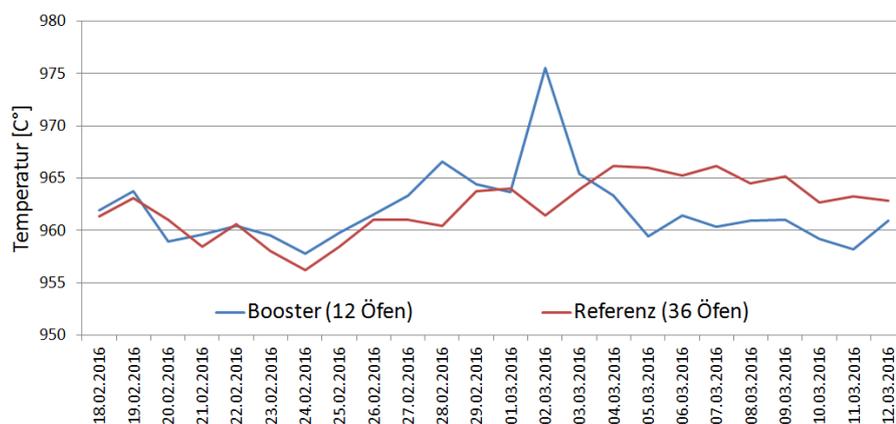


Abbildung 7.23: Temperaturverlauf der Booster und Referenzgruppe

8 Ergebnis und Zukunft

8.1 Fazit

Seit Erfindung der Schmelzflusselektrolyse ist ein gleichbleibender Wärmeeintrag Garant für einen stabilen und zerstörungsarmen Produktionsprozess. Mithilfe der Wärmetauschertechnologie zur Flexibilisierung des Wärmeaustrages aus dem Elektrolyseofen, ist erstmals die Möglichkeit für einen volatilen Energieeintrag gegeben. Mithilfe umfangreicher Versuche (vgl. Kapitel 5) konnte nachgewiesen werden, dass eine Flexibilisierung des Energieeintrages möglich ist, ohne den Prozess zu zerstören.

Notwendig für die Flexibilisierung ist ein magnetisch kompensierter Ofen zur Erstellung einer ebenen Aluminiumoberfläche, damit Stromstärkeänderungen keinen Kurzschluss der Aluminiumoberfläche mit den Anoden erzeugen. Darüber hinaus ist eine zusätzliche Kühlung zwingend erforderlich, um die Enthalpie des Ofens nicht so stark anzuheben, dass keine schützende Randkruste mehr vorhanden ist. Beide Maßnahmen wurden im Rahmen dieser Dissertation an zwölf Öfen umgesetzt und ihre Eigenschaften in Versuchen erforscht und beschrieben (Kapitel 5).

Der Lösungsansatz ist in drei Themenbereiche gegliedert. Im ersten Schritt den Energieeintrag so weit wie möglich zu reduzieren und im Folgeschritt den Wärmeverlust mittels der Wärmetauscher zu kompensieren. Die Umsetzung erfolgt überlagert und ist für jeden Ofentyp einzeln zu bestimmen. Wie in Kapitel 3 beschrieben, unterliegen alle Öfen thermischen und prozesstechnischen Grenzen (vergl. Abbildung 3.12), welche für den EPT14 Ofen des Standorts Essen

bestimmt wurden. Für das aktuelle Ofendesign liegt die Grenze des minimalen Ofenwiderstands bei $12,9\mu\Omega$, während die Wärmeverluste des Ofens ohne Wärmetauscher bei 162kA für einen Widerstand von $14,4\mu\Omega$ konstruiert sind. Für den ersten Schritt der Regelung des Wärmehaushalts kann nach dem Ohmschen Gesetz der Widerstand antiproportional zur Stromstärke bis zu seinem Minimum angepasst werden. Mit Erreichen des Minimums wird der Wärmeverlust über die Wärmetauscher proportional zu weiteren Stromstärkerhöhungen angepasst. Schlussendlich müssen Regelungen eines bestehenden Prozesssystems so angepasst werden, dass sie der Flexibilisierung nicht entgegenwirken, sondern sie begünstigen. Diese Anpassungen werden in Kapitel 7.2.4 erläutert.

Ein veränderter Wärmeverlust stellt sich jedoch nicht, wie die Anpassung des Energieeintrags über den ACD, unmittelbar ein. Die Wärmeverluständerung unterliegt einer Reaktionszeit, welche in Kapitel 4.3.4 beschrieben und in Kapitel 5.6 nachgewiesen wurde. Durch ein gezielt überkompensierendes PT_1 -Glied wird der nachteiligen Wärmeverluständerung entgegengewirkt, sodass sich ein neues thermisches Gleichgewicht schneller einstellt. Die Grenzen des Systems sind bei der negativen Modulation wirtschaftlicher Art, während bei der positiven Modulation der einzustellende Wärmeverlust über die Wärmetauscher nicht beliebig erhöht werden kann.

8.2 Ausblick

Die bisherigen, aber auch weitere Ansätze zum volatilen Energieeintrag und Ausstrom zeigen, dass mit der Flexibilisierung Effizienzeinbußen einhergehen. Diese führen unter anderem zu erhöhtem Energieverbrauch und CO_2 -Ausstoß. Um dies zu minimieren und den äquivalenten Speicherwirkungsgrad der virtuellen Batterie zu erhöhen, müssen wesentlich mehr Daten erfasst, analysiert und aufbereitet werden, als dies im aktuellen Prozess der Fall ist. Dazu sind entsprechende Mess- und Datenübertragungstechniken zu entwickeln (z.B. eine individuelle Anodenstrommessung), sowie weitere Flexibilisierungsmaßnahmen am Ofen zu entwerfen und zu installieren (z.B. eine Abluftsteuerung oder Designänderungen

an der Ofenausmauerung). Die Regelung des Wärmeverlustes über die Seitenwände umfasst nur etwa 20-30% der Wärmeverluste eines Elektrolyseofens. Zur Steigerung des Wirkungsgrades kann im nächsten Schritt der Abgasstrom über die Oberseite betrachtet werden. Mit geeigneten Rohrklappen können weitere 30-50% der Wärmeverluste (vgl. Kapitel 2.2.1) geregelt werden. Die genannten Änderungen sind in die bestehenden Steuerungs- und Überwachungssysteme sinnvoll zu integrieren. Hier ist ein hohes Maß an Automation gefordert, um die entstehenden Datenmengen zu analysieren und sinnvoll zu nutzen. Im Rahmen weiterer Projekte können geeignete Messverfahren sowie die zugehörigen Analyse-, Modellierungs- und Regelstrategien entwickelt werden, um den durch die Flexibilisierung des Arbeitspunktes bedingten Wirkungsgradverlusten (MWh/t Aluminium) sowie dem erhöhten Verschleiß der Produktionseinheiten entgegenzuwirken. Die zu entwickelnden Systeme können ebenfalls an einer repräsentativen Anzahl von 14 Demonstrationsezellen installiert, getestet und optimiert werden. Besonders Langzeitauswirkungen, wie der Einfluss auf das Lebensalter einer Elektrolysezelle von normal 2200 Tagen, sind noch nicht erforscht. Es gilt die Frage zu klären, in wieweit die Flexibilisierung eine Verkürzung der Lebensdauer beinhaltet und wie dieser Lebensdauerreduzierung durch geeignete, zu erforschende Maßnahmen/Materialien entgegengewirkt werden kann. Auch kann der Aluminium-Materialfluss aus dem Ofen so gestaltet werden, dass er zum einen die Flexibilisierung des Energieeintrages von der Produktion/Weiterverarbeitung des erzeugten Rohaluminiums entkoppelt und zum anderen weiterhin die Kathode vor dem aggressiven Elektrolyten schützt. Nicht nur zur Gewinnsteigerung, auch zum Schutz des Systems, wäre es möglich eine Art Rückmeldeeinheit zu entwickeln. Diese gibt den Zustand des Ofens wieder und meldet an das Handelssystem, welche Kapazitäten noch moduliert werden können. So könnte in einem wirtschaftlichen Rechnungstool genaustens entschieden werden, wann welche Mengen gekauft oder verkauft werden können.

Bislang wurde sich hauptsächlich mit der Aufnahme von Wärmebilanzen, Temperaturen und Spannungen befasst. Im Zeitalter von BigData wäre es möglich, Eingangskontrollen zu Mengen von Aluminiumoxid und Aluminiumfluorid ge-

nauer aufzunehmen, um auch das chemische Gleichgewicht zu bilanzieren. Des Weiteren könnte mithilfe einer (Massen-) datengestützten Erfassung, Überwachung und Steuerung möglichst aller relevanten Prozessparameter, der Betrieb einer Aluminiumelektrolyse unter Flexibilisierungsbedingungen bezüglich Verschleiß und Energieverbrauch verbessert werden. Diese Daten werden seit Jahren erfasst, jedoch zum Teil weder ausgewertet und gespeichert noch zur Regelung oder einfachen Steuerung angewendet. Zur Verringerung der Komplexität wurden bislang die Einflussnahme der in Wechselwirkung stehenden Prozesse nicht berücksichtigt, welche ebenfalls in einer neuartigen Prozessregelung aufgenommen werden sollten. Schlussendlich können in einer neuartigen Prozessregelung der Energycounter, die Echtzeit-Energiebilanz-Regelung sowie die Ofenregelung in einem Mehrgrößensystem miteinander verbunden werden. So kann das Verhalten des Ofens mithilfe des virtuellen Systems schon vorausbestimmt werden und darauf frühzeitig reagiert werden. Dieses sehr umfangreiche Vorhaben muss alle drei Ebenen, von der Messwertaufnahme (Hardware), über die Regelung (Hard+Software), bis zur Visualisierung (Software) beinhalten. Der Grundstein zu diesem Projekt ist hiermit gelegt und die TRIMET ist bereit, diesen Paradigmenwechsel der Aluminiumherstellung zu gehen.

Literaturverzeichnis

- [alu15] alueurope.eu. Verlauf der Verteilung der Weltweiten Primäraluminiumproduktion. Website, 2015. Eingesehen am 27.12.2015 unter: <http://www.proalupack.at/upload/Produktion3.jpg>.
- [Ant16] Jacques Antille. *Aluminium Electrolysis Cell Simulator, A tool for cell operation and control*. TMS, Light Metals, 2016. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [ATJC05] Evan W. Andrews, Marc P. Taylor, Greg L. Johnson, and Ian Coad. *The Impact of Anode Cover Control and Anode Assembly Design on Reduction Cell Performance*, pages 357–362. TMS, Light Metals, 2005. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Bö99] Alfred Böge. *Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 15*. Das Techniker Handbuch, 1999.
- [BCM⁺08] B. Benkahla, Y. Caratini, H. Mezin, S. Renaudier, and S. Fardeau. *Last development in AP50 cell.*, pages 451–455. TMS, Light Metals, 2008. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Ber01] Manfred Berger. *Grundkurs der Regelungstechnik*. Books on Demand, 2001.
- [BFH99] J. Bos, B. Feve, and P. Homsy. Fused bath electrolysis cell for producing aluminium by Hall-Héroult process comprising cooling means, 1999. Patent No WO1999054526 A1.

- [BFH01] J. Bos, B. Feve, and P. Homsı. Electrolytic pot for production of aluminum using the Hall-Hérout process comprising cooling means, 2001. Patent No US 6.251.237 A1.
- [BFQM⁺92] A.C. Brant Filho, A.A.B. Queiroz, E. Macedo, J.E. Pena, and M.A. Mol Santos. *The operation of a smelter with power modulation.*, pages 357–362. TMS, Light Metals, 1992. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Bru98] J. Bruggeman. *Pot Heat Balance Fundamentals*. Queenstown, NewZealand, 1998. Proc. 6th Australasian Aluminium Smelting Conference and Workshop.
- [Con15] NUS Consulting. Strompreise in ausgewählten Ländern 2014 in US-Dollar-Cent pro Kilowattstunde. Website, 2015. Eingesehen am 27.12.2015 unter: <http://de.statista.com/graphic/1/13020/strompreise-in-ausgewaehlten-laendern.jpg>.
- [CPCM10] Laurent Cassayre, Patrice Palau, Pierre Chamelot, and Laurent Massot. *Properties of Low-Temperature Melting Electrolytes for the Aluminum Electrolysis Process: A Review*. Laboratoire de Génie Chimique - LGC and Rio Tinto Alcan, 2010. Journal of Chemical and Engineering Data, vol. 55.
- [CT15] J.J. John Chen and P. Mark Taylor. *Technique for low average potline operation for electricity grid storage*. ASM International, TMS, Light Metals, 2015. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [DBMR14] Roman Düssel, Melanie Boxberg, Oliver Marzin, and Till Reek. *Monatsbericht der Elektrolyse Essen*. TRIMET Aluminium SE, Juni 2014. Werksreport Standort Essen.

- [DI14] 60050-351 DIN IEC. *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik*. International Electrotechnical Commission, 2014.
- [Dre97] T. Drengstig. *On process model representation and AlF₃ dynamics of aluminium electrolysis cells*. PhD thesis, Dept. Of Eng. Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1997.
- [ELJ14] Ron Etzion, Pascal Lavoie, and Tang Jianning. *Energy Balance Regulation and Flexible Production: A New Frontier for Aluminum Smelting*. TMS, Light Metals, 2014. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [EP08] David Eisma and Pretesh Patel. *Challenges of Power Modulation*. TRIMET Aluminium SE, TMS, Light Metals, 2008. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [ESH86] P. Entner and W. Schmidt-Hatting. *Tonerdeelektrolyse in Kryolithschmelzen*. Alusuisse Zürich, 1986. Elektrolyse Alusuisse Seminar 1.
- [FJBV04] L. Fiot, C. Jamey, N. Backhouse, and C. Vanvoren. *Tomago Aluminium AP22 Project*, volume 2, pages 512–517. TMS, Light Metals, 2004. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [FMST93] P. Fellner, S. Midtlyng, A. Sterten, and J. Thonstad. *Electrical conductivity of low melting baths for aluminium electrolysis: the system Na₃AlF₆-Li₃AlF₆- AlF₃ and the influence of additions of Al₂O₃, CaF₂, and MgF₂*. Springer Verlag, 1993. Journal of Applied Electrochemistry Volume 23.
- [For69] Rheinfelden Forschungsgruppe. *Fachschulungskurs Elektrolyse*. Aluminium-Hütte Rheinfelden GmbH 7888 Rheinfelden, 1969.

- [Fou22] Jean Baptiste Joseph Fourier. *Théorie analytique de la chaleur*. Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France, Paris, 1822.
- [Gat15] Tobias Gath. *Messungen der Wölbung des Aluminiums im EPT14 Elektrolyseofen mithilfe von Fe-Stangen*. TRIMET Aluminium SE, 2015.
- [GD15] Tobias Gath and Roman Düssel. *Messungen der Verteilung des Stromeingangs auf den beiden Traverseseiten*. TRIMET Aluminium SE, 2015.
- [GF14] K.-H. Grote and J. Feldhusen. *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer Verlag, 2014.
- [Gil08] Alison Gilbert. South African Power Reduction Impact On BHP Billiton Aluminium. Website, 2008. Eingesehen am 15.12.2015 unter: <http://www.bhpbilliton.com/investors/news/South>
- [GK93] K. Grjotheim and Halvor Kvande. *Introduction to Aluminium Electrolysis, 2nd Edition*. Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- [GKM⁺77] K. Grjotheim, D Krohn, M. Malinovsky, K. Matiaasovsky, and Thonstad J. *Aluminium electrolysis: The chemistry of the Hall-Heroult process, 1st Edition*. Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1977.
- [Hau98] Warren Haupin. *Interpreting the components of cell voltage*. TMS, Light Metals, 1998. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Hau13] Heribert Hauck. *Entwicklung der EEX-Terminmarktpreise (Cal+1) in Relation zu den variablen Kosten der Steinkohleverstromung*. TRIMET Aluminium SE, 2013.

- [Hof97] Josef Hoffmann. *Matlab und Simulink: Beispielorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme*. Addison-Wesley Verlag, 1997.
- [Iff07] Martin Iffert. *Aluminium Smelting Cell Control and Optimisation*. PhD thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2007.
- [JTL88] Hans Joliet, Wilhelm Treue, and von Olof Lindequist. *Aluminium, die ersten Hundert Jahre*, pages 1–114. VDI Verlag, 1988.
- [KAB14] René von Kaenel, Dr. Jacques Antille, and Dr. Louis Bugnion. *Magnetic compensation report*. KAN-NAK Report 03, 2014.
- [KAB15] René von Kaenel, Dr. Jacques Antille, and Dr. Louis Bugnion. *Modulation Simulation Report*. KAN-NAK Report 01, 2015.
- [Kre11] I Kretzschmar, H.-J. und Kraft. *Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik, 4. Auflage*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München, 2011.
- [KSO82] C. Krohn, M. Sorlie, and H. A. Oye. *Penetration of Sodium and Bath Constituents into Cathode Carbon Materials Used in Industrial Cells*. TMS, Light Metals, 1982. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Kva98] Halvor Kvande. *Bath Properties and Cell Operation Performances*. Proc. 6th Australasian Al Smelting Conference, 1998.
- [Lü12] Andreas Lützerath. *Aluminiumproduktion in Deutschland - Chancen und Risiken*. TRIMET Aluminium SE, 2012. AEC Seminar, RWTH Aachen.
- [LND⁺11] Pascal Lavoie, Sankar Namboothiri, Mark Dorreen, John JJ Chen, Donald P Zeigler, and Mark P Taylor. *Increasing the power modulation window of aluminium smelter pots with shell heat exchanger technology*. Light Metals Research Centre, The

- University of Auckland and Alcoa Primary Metals, Aluminerie Deschambault, TMS, Light Metals, 2011. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [LO93] L. P. Lossius and H.A. Oye. *Melt Penetration and Chemical Reactions in Carbon Cathodes During Aluminium Electrolysis*, pages 331–340. TMS, Light Metals, 1993. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [LT91] Xiaoling Liu and Simon Taylor, George. *Crust formation and deterioration in industrial cells*. Comalco Research Centre, Thomastown, Australia, TMS, Light Metals, 1991. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Lun14] J. Lunze. *Regelungstechnik 1*. Heidelberg, Springer Verlag, 2014.
- [Mat16] Community Mathworks. Matlab/Simulink - Produktinformation, Mathworks Deutschland GmbH. Website, 1994-2016. Eingesehen am 07.04.2016 unter: <http://de.mathworks.com/products/simulink/>.
- [Ome98] Omega.com. Emissivity of Common Materials. Website, 1998. Eingesehen am 31.01.2013 unter: <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivitya.html>.
- [Pie15] Udo Pietzsch. *Höhere Regelungstechnik, (Regelungstechnik 2)*. Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Fakultät Maschinenbau, Universität Wuppertal, 2015.
- [Ple08] Markus Plettau. Hedging von Kraftwerken unter Berücksichtigung begrenzter Liquidität. Master's thesis, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Universität Duisburg-Essen, 2008.
- [PLNVdSS98] L.J. Pinheiro Leal Nunes, A. Vianna da Silva, and G. Soutinho. *Powermodulation on Valesul P-19 pots.*, pages 1267–1271. TMS, Light Metals, 1998. The Minerals, Metals and Materials Society.

- [Ree15] Dr. Till C. Reek. *Power Modulation of Aluminium Reduction Cells - Operational Constraints and Process Limits*. PhD thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2015.
- [RIW⁺03] T. Rieck, M. Iffert, P. White, R. Kelchtermans, and R. Rodrigo. *Increased Current Efficiency and Reduced Energy Consumption at the TRIMET Smelter Essen using 9 Box Matrix Control*, pages 449–457. TMS, Light Metals, 2003. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [RS90] A. Rostum and A. Solheim, A. Sterten. *Phase diagram data in the system Na₃AlF₆ - AlF₃ - Al₂O₃*, pages 311–316. TMS, Light Metals, 1990. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [rw15] rn wissen.de. RN-wissen - der Technik und Programmierseite. Website, 2015. Eingesehen am 21.09.2015 unter: <http://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik>.
- [Sch10] Gerd Schulz. *Regelungstechnik 1, Lineare und Nichtlineare Regelung, Rechnergestützter Reglerentwurf, 4. Auflage*. Oldenbourg Verlag München, 2010.
- [Sch11] Wolfgang Schneider. *Praktische Regelungstechnik*. Springer, Vieweg und Teubner Verlag, 2011.
- [Sch13] H. Schuck. *Fördergenehmigung im Rahmen des Programms Rationale Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen, progres.nrw und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), Ziel 2-Programm 2007-2013, Phase VI - Programmbereich Innovation*. Bezirksregierung Arnsberg, 2013. veroeff.
- [SH74] Wolfgang Schmidt-Hatting. *Theoretische Zusammenhänge zwischen Ofenstrom und Ofenspannung bei Energiespannen*. Alusuisse Hüttenlaboratorium, 1974.

- [SHBT75] W. Schmidt-Hatting, H.O. Bohner, and T. Tschopp. *Anleitung für die Überwindung von Energiespannen*. Alusuisse Zürich, 1975.
- [Sol06] Asbjørn Solheim. *Towards a proper understanding of sideladage facing the metal in aluminium cells*. SINTEF Materials and Chemistry, NO-7465 Trondheim, Norway, TMS, Light Metals, 2006. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [SS07] M. Stam and J Schaafsma. *The impact of power modulation on the cell dynamics*. Aluminium Delfzijl, Netherlands, 2007. AASTC.
- [SSS97] Egil Skybakmoen, Asbjorn Solheim, and Asmund Sterten. *Alumina solubility in molten salt systems of interest for aluminium electrolysis and related phase diagram data*, pages 81–86. Metallurgical and Materials Transactions vol. 28, 1997.
- [Ste93] David .B Stewart. *Time-domain transient thermal response of structural elements*, page 87–91. Elsevier Ltd., 1993. Building and Environment, Volume 16, Issue 2.
- [Str15] Strohrmann. Systemtheorie online, Kenngrößen eines PT2-Glieds. Website, 2015. Eingesehen am 12.09.2015 unter: <http://www.eit.hs-karlsruhe.de/mesysto/teil-a-zeitkontinuierliche-signale-und-systeme/uebertragungsglieder-der-regelungstechnik/zusammengesetzte-uebertragungsglieder/pt2-glied.html?type=1>.
- [Tay12] Marc Taylor. *Electrochemistry and Cell Voltage, Postgraduate Certificate in Light Metals Reduction Technology*. The University of Auckland, Faculty of Engineering and TRIMET Essen & Hamburg, 2012.
- [TCFW05] Mark Taylor, John Chen, Mohamed Farid, and Robert Wallace. Heat Exchanger, 2005. Patent No WO2005/111524 A1.

- [TCFW11] Mark Taylor, John Chen, Mohamed Farid, and Robert Wallace. Heat Exchanger, 2011. US Patent No 7,901,617 B2.
- [TCFW14] Mark Taylor, John Chen, Mohamed Farid, and Robert Wallace. Heat Exchanger, 2014. US Patent No 8,778,257 B2.
- [TFH⁺01] J. Thonstad, P. Fellner, G.M. Haarberg, J. Hives, H. Kvande, and Sterten A. *Aluminium Electrolysis – Fundamentals of the Hall-Heroult Process, 3rd Edition*. Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001.
- [THH07] Automated Systems Group THH. *Manual of the Celtrol control system*. TRIMET Internal Dokumentation, 2007.
- [TJ47] Pearson T.G. and Waddington J. *Electrode reactions in the aluminium reduction cell*, pages 307–320. Discussions of the Faraday Society 1, 1947.
- [TRI15] TRIMET. *Interne Kommunikation*. TRIMET Aluminium SE, 2015.
- [TZWS96] M. Taylor, W. Zhang, V Wills, and S Schmid. *A dynamic model for the energy balance of an electrolysis cell*. New Zealand Aluminium Smelters Limited, Invercargill, New Zealand and Comalco Research Centre, Victoria, Australia, 1996. Institution of Chemical Engineers.
- [Unb08] Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik I, Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme*. Vieweg und Teubner Verlag, 2008.
- [Uti99] T.A. Utigard. *Why best pots operate between 955 and 970 °C.*, pages 319–326. TMS, Light Metals, 1999. The Minerals, Metals and Materials Society.

- [VHBB01] C. Vanvoren, P. Homsy, J. Basquin, and T. Beheregaray. *AP50: The Pechiney 500kA cell*. TMS, Light Metals, 2001. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [VW98] P. Verstreken and P. White. *A New Process Control Strategy for Aluminium Electrolysis using Superheat Sensors*. Proc. 6th Australasian Al Smelting Conference, 1998.
- [Wal07] Robert John Wallace. *Enhancement of Heat Transfer Mechanisms at the Exterior Walls of Metallurgical Furnaces Using Heat Exchanger Technology*. PhD thesis, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 2007.
- [Wel98] Barry J. Welch. *The Impact of Changes in Cell Heat Balance and Operations on the Elektrolyte Composition*. Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland, 1998. Proc. 6th Australasian Aluminium Smelting Workshop.
- [Wel01] Barry J. Welch. *Aluminium smelter technology, theory and praxis*. Centre for Electrochemistry and Mineral Processing, University of New South Wales, Sydney Australia, 2001.
- [WT87] Barry J. Welch and M.P. Taylor. *Melt/freeze heat transfer measurements in cryolite-based electrolytes*. Springer Verlag, 1987. Metallurgical and Materials Transactions B.
- [ZCT14] Qinsong Zhang, John Chen, and Mark Taylor. *Computational Modelling of Thermochemical Evolution of Aluminium Smelter Crust*. Light Metals Research Centre, The University of Auckland, TMS, Light Metals, 2014. The Minerals, Metals and Materials Society.
- [ZTC⁺13] Qinsong Zhang, Mark Taylor, John Chen, David Cotton, Tania Groutzo, and Xiaodong Yang. *Composition and thermal analysis of crust formed from industrial anode cover*. Light Metals

Research Centre, The University of Auckland and Shenyang Aluminium and Magnesium Engineering & Research Institute, Shenyang, China, TMS, Light Metals, 2013. The Minerals, Metals and Materials Society.

- [ZWST96] W.D. Zhang, V. Will, S. Schmid, and M.P. Taylor. *A Dynamic Model for the Energy Balance of an Electrolysis Cell*. Chemical Engineering Research and Design - November, 1996.

Veröffentlichungen und eigene Arbeiten

- [Dü08] Roman Düssel. *Untersuchungen zur Reduzierung des Zapfen / Kohle – Widerstands in Elektrolyseanlagen zur Herstellung von Aluminium*. TRIMET Aluminium SE & Hochschule Bochum, 2008.
- [Dü12] Roman Düssel. *Machbarkeitsstudie - Spannungsmodulation mit Wärmetauschern am Ofen 1119*. TRIMET Aluminium SE, Essen, Germany, 2012. TRIMET Intern.
- [Dü15a] Roman Düssel. *9Box leicht gemacht, Eine Erklärung der Steuerung mit Verlinkung der Variablen und Darstellung der Parameter*. TRIMET Aluminium SE, Februar 2015. Prozesssteuerung TRIMET Aluminium SE.
- [Dü15b] Roman Düssel. *Aluminiumelektrolyse als Virtuelle Batterie*. KlimaExpo NRW, 2015. Die KlimaExpo.NRW ist eine neue Initiative der NRW-Landesregierung. <http://www.klimaexpo.nrw/mitmachen/projektvorneiter/vorneitergefunden/trimet/>.
- [Dü16] Roman Düssel. *Die Aluminiumelektrolyse als virtuelle Batterie*. Aluminium Praxis, 2016. Branchenzeitung für die deutschsprachige Aluminiumindustrie, <http://schluetersche.de/aluminium-praxis/150/1373/38359/>.

- [DBAK14] Roman Düssel, Louis Bugnion, Jacques Antille, and René von Kaelnel. *TRIMET Measurement Report*. KAN-NAK Report 3, 2014.
- [DDPR16] Roman Düssel, Nick Depree, Pretesh Patel, and Till Reek. *The VIRTUAL BATTERY – operating an aluminium smelter with flexible energy input*, pages 571–576. Light Metals Research Centre, University of Auckland and TRIMET Aluminium SE, Essen, Germany, 2016.
- [DIJP16] Roman Düssel, Martin Iffert, Stefan Judisch, and Markus Plettau. *Balder Report - Grundlagenreport zur Investitionsentscheidung der Virtuellen Batterie*. TRIMET Aluminium SE, Essen, Germany, 2016. TRIMET Intern.
- [DL16a] Roman Düssel and Rebekka Loschen. *Aluminiumelektrolyse als Stromspeicher*. Energie Spektrum, 2016. Energiemagazin im deutschsprachigen Raum, <http://www.energiespektrum.de/>.
- [DL16b] Roman Düssel and Rebekka Loschen. *Industrielles Last-Management, Die Aluminium-Batterie*. Das Innovationsmagazin von Energate, 2016. Branchentrends und Innovationen der Energiewirtschaft. e21.digital.

Betreute Arbeiten

- [FT16] Dena Farooghi and Dietmar Tutsch. *Abschlussbericht Ziel 2 Projekt, Virtuelle Batterie, Experimentelle Untersuchungen zur Regelung der Kühlung eines Ofens mithilfe von Wärmetauschern*. TRIMET Aluminium SE & Bergische Universität Wuppertal, 2016.
- [Jae14] Bo Jaeger. *Experimentelle Untersuchung bei der Grenze zwischen Fest- und Flüssigphase bei Schmelzvorgängen von Paraffin*. TRIMET Aluminium SE & Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 2014.
- [Kol15] Sabine Koller. *Die 'virtuelle Batterie' als Antwort der Aluminiumindustrie auf die Energiewende*. TRIMET Aluminium SE & Fachhochschule für Oekonomie und Management, 2015.
- [Koy14] Sercan Koyuncuoglu. *Analytische und messtechnische Wärmebilanz an einer Elektrolysezelle*. TRIMET Aluminium SE & Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Mess-, Steuerungs-, Regelungstechnik, 2014.
- [Lin14] Max Lingemann. *Energiemanagement in energieintensiven Industrieunternehmen am Beispiel der Trimet Aluminium SE*. TRIMET Aluminium SE & Europäische Fernhochschule Hamburg, 2014.
- [NJ16] Varchasvi Nandana and Uwe Janoske. *Abschlussbericht Ziel 2 Projekt, Virtuelle Batterie, Erstellung eines thermoelektrischen Modells einer Elektrolysezelle*. TRIMET Aluminium SE & Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 2016.

- [Pur14] Thomas Pursche. *Messdatenerfassung und Korrelationsauswertung von Temperaturen und Wandstärken in Aluminiumöfen*. TRIMET Aluminium SE & Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik / Informatik, 2014.

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere außerdem, dass ich die beigefügte Dissertation nur in diesem und keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht habe und, dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.

Wuppertal, Roman Düssel

Anhang

.1 Elektrolysezelle EPT14

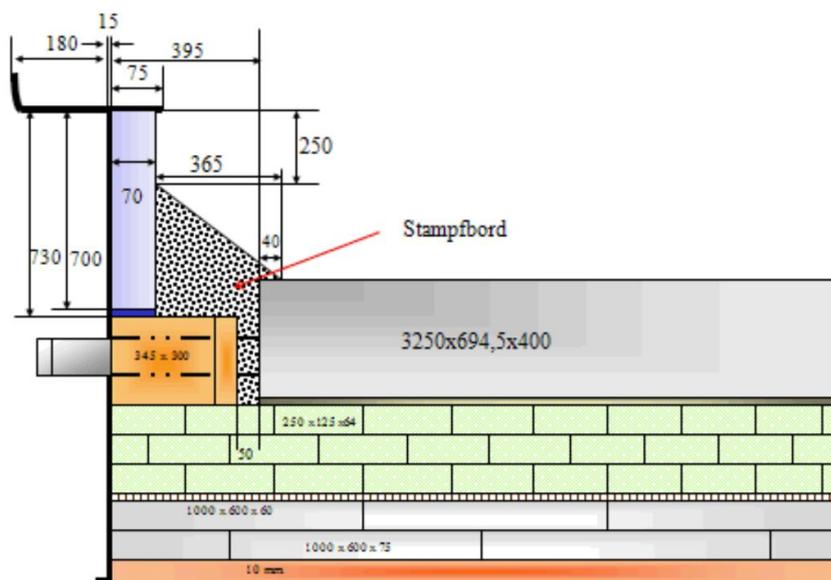


Abbildung .1: Aufbau der Wanne eines EPT14 Elektrolyseofens

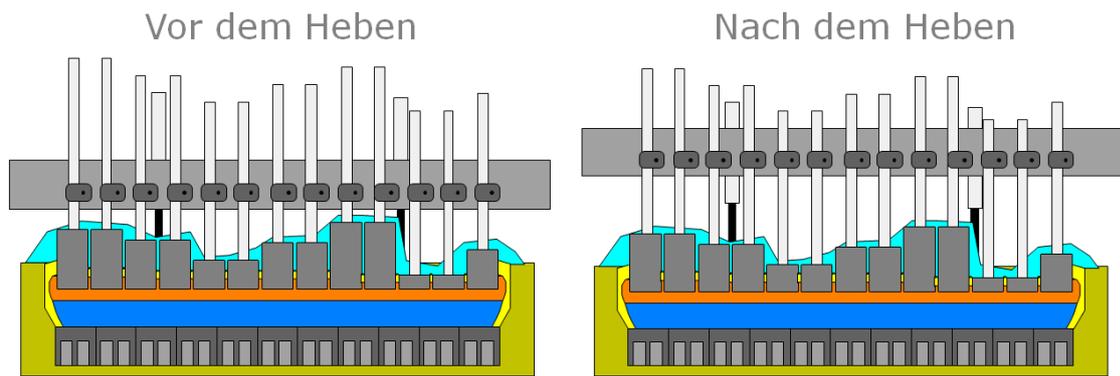


Abbildung .2: Traversheben

.2 Messgeräte



Abbildung .3: Fiberlab Messgerät

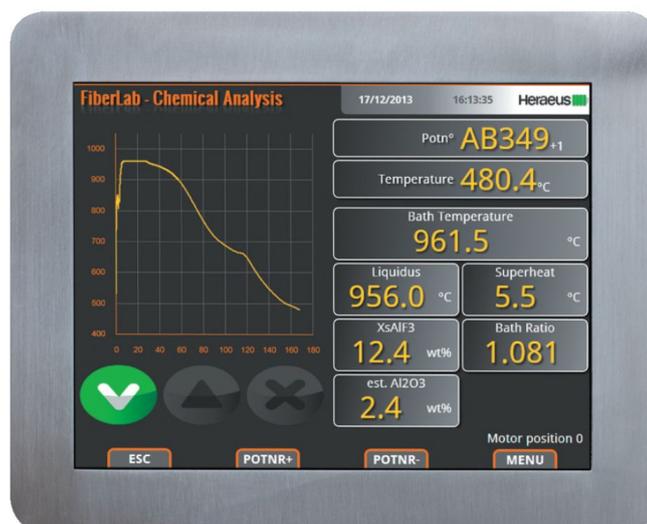


Abbildung .4: Fiberlab GUI

.3 Versuche

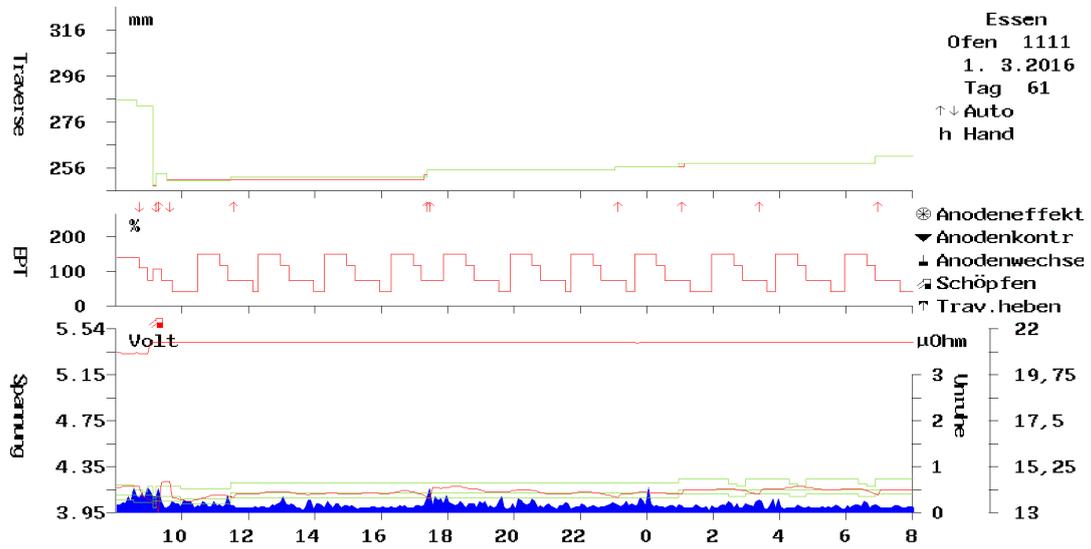


Abbildung .5: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1111

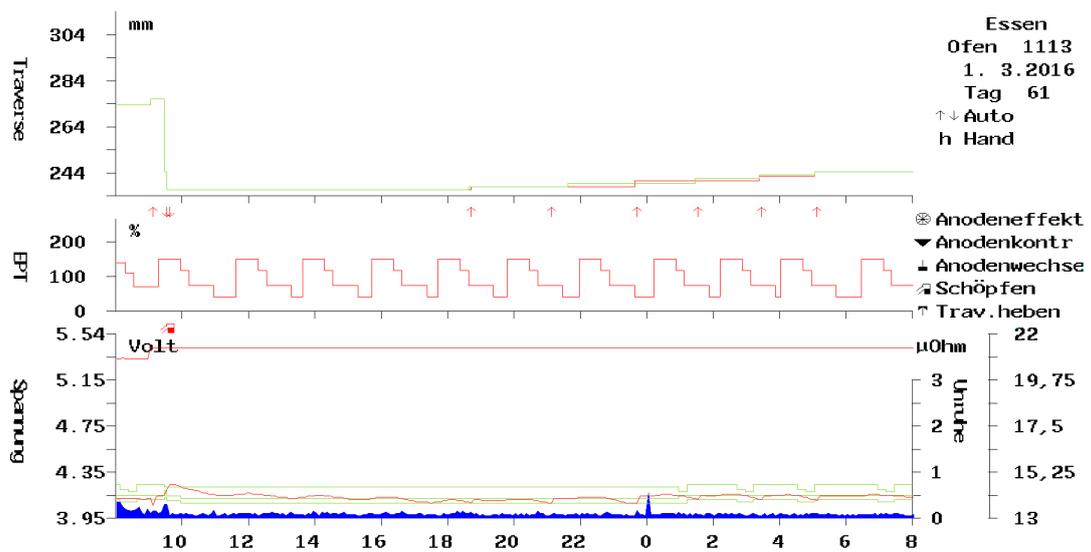


Abbildung .6: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1113

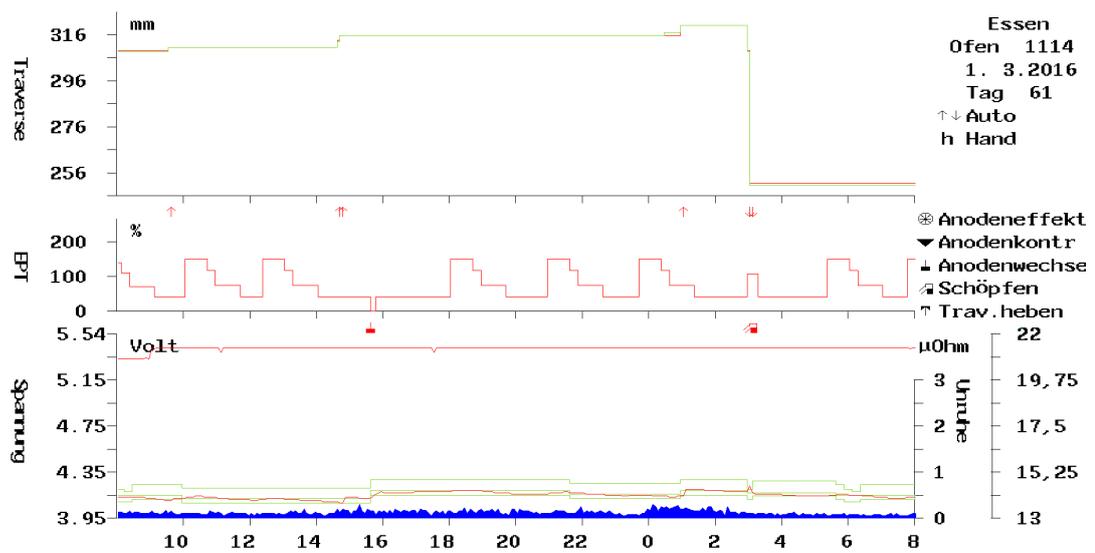


Abbildung .7: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1114

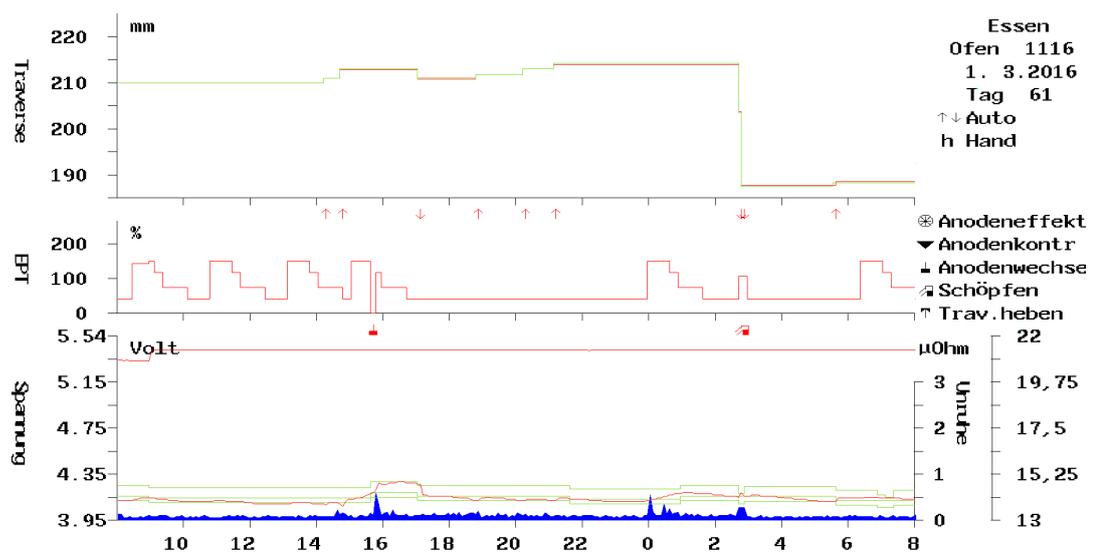


Abbildung .8: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1116

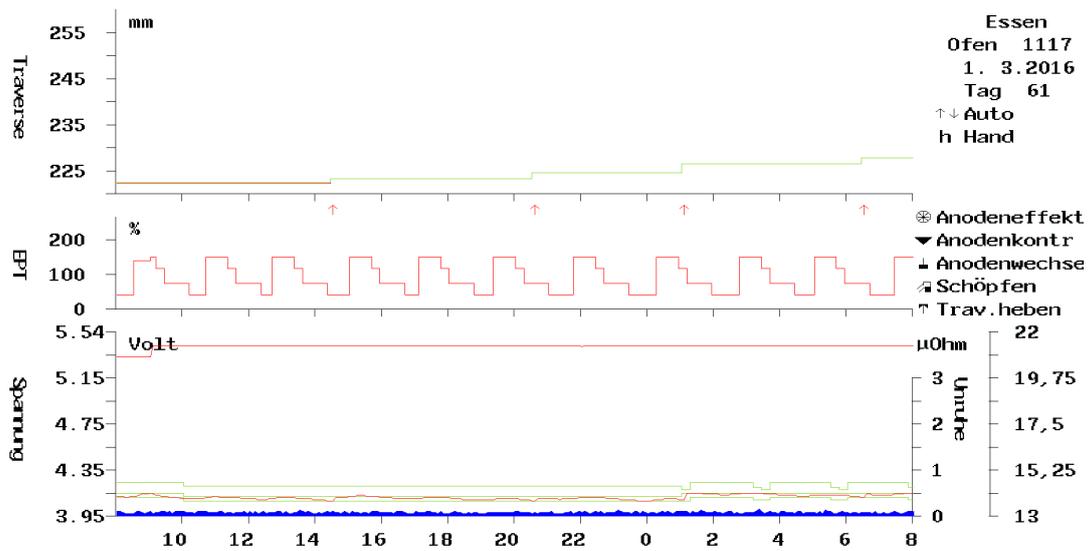


Abbildung .9: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1117

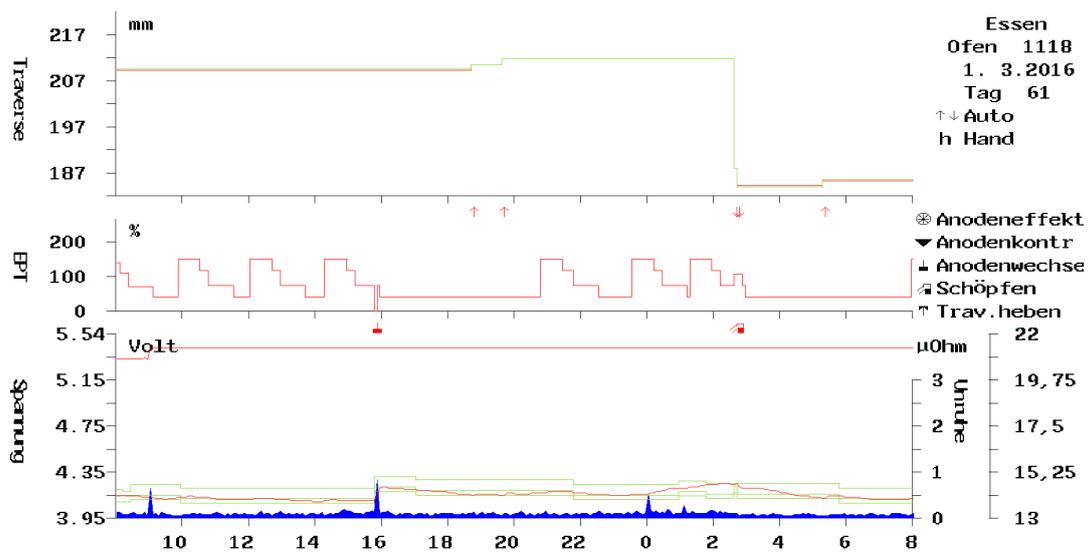


Abbildung .10: 11.500A Versuchsdurchführung am Ofen 1118

Day	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
Wk 45 3-9.11.	Base = 161,5	-6kA H1 12hr	Base	-6kA H1 23hr	Base	Base	Base
Halle		155,5 kA 09:00-21:00		155,5 kA 00:30-23:30			
Booster							
Wk 46 10-16.11.	Base	-12kA H1 12hr	Base	-12kA 24hr	Base	Base	-6kA H1 15hr
Halle		149,5 kA 09:00-21:00		149,5 kA 00:30-23:30			155,5 kA 09:00-24:00
Booster							
Wk 47 17-23.11.	-6kA H1 +18,5kA Booster 8hr	-6kA H1 24h	-6kA H1 +18,5kA Booster 8hr	Base	-12kA H1 8:30hr 18,5kA Booster 8hr	Base	Base
Halle	155,5 kA 00:00-09:00	155,5 kA 00:00-24:00	155,5 kA 00:00-09:00		149,5 kA 00:30-09:00		
	161,5 kA 09:00-17:00				161,5 kA 09:00-24:00		
	155,5 kA 17:00-24:00						
Booster	180,0 kA 09:00-17:00		180,0 kA 09:00-17:00		180,0 kA 09:00-17:00		
Wk 48 24-30.11.	Base	-12kA H1 48hr		Base	Base	Base H1 +18,5kA Booster 23hr	Base
Halle		149,5 kA 00:30-24:00	149,5 kA 00:00-24:00			161,5 kA	
Booster						180,0 kA 00:30-23:30	
Wk 49 1-7.12.	-6kA H1 12hr +18,5kA Booster 12hr	-6kA H1 24hr	-6kA H1 9hr +18,5kA Booster 9hr	Base	Base	Base	Base
Halle	155,5 kA 00:00-09:00	155,5 kA 00:00-24:00	155,5 kA 00:00-09:00				
	161,5 kA 09:00-21:00		161,5 kA 09:00-24:00				
	155,5 kA 21:00-24:00						
Booster	180,0 kA 09:00-21:00		180,0 kA 09:00-18:00				

Abbildung .11: Modulationsplan der negativen Modulation

Start << 01.03.2016 >> Zeitraum 2 Tage nur Änderungen anzeigen Tag kopieren Woche kopieren

Modulationskontrolle setzen/aufheben Halle 1 Rest Halle 1 Boo Halle 2 Halle 3

Datum	T	Halle 1 Rest					Halle 1 Booster					Halle 2					Halle 3						
		Soll Strom in kA	Erwart Strom in kA	V-Änd. mV	TE Fak. in %	H1R. unter Mod.	Sollstrom H1 R in kA	Booster H1 B in kA	Boo Ges in kA	Erwart Strom in kA	V-Änd. mV	TE Fak. in %	H1B. unter Mod.	Soll Strom in kA	Erwart Strom in kA	V-Änd. mV	TE Fak. in %	H2 unter Mod.	Soll Strom in kA	Erwart Strom in kA	V-Änd. mV	TE Fak. in %	H3 unter Mod.
01.03.2016 00:00	Di	161.50	161.50	0	100	<input type="checkbox"/>	161.50	13.50	175.00	175.00	0	100	<input checked="" type="checkbox"/>	162.50	162.50	0	100	<input type="checkbox"/>	167.00	167.00	0	100	<input type="checkbox"/>
01.03.2016 09:00	Di	161.50	161.50	0	100	<input type="checkbox"/>	161.50	13.50	175.00	186.50	-20	107	<input checked="" type="checkbox"/>	162.50	162.50	0	100	<input type="checkbox"/>	167.00	167.00	0	100	<input type="checkbox"/>
01.03.2016 10:00	Di	161.50	161.50	0	100	<input type="checkbox"/>	161.50	13.50	175.00	186.50	-40	107	<input checked="" type="checkbox"/>	162.50	162.50	0	100	<input type="checkbox"/>	167.00	167.00	0	100	<input type="checkbox"/>
02.03.2016 09:00	Mi	161.50	161.50	0	100	<input type="checkbox"/>	161.50	13.50	175.00	175.00	0	100	<input checked="" type="checkbox"/>	162.50	162.50	0	100	<input type="checkbox"/>	167.00	167.00	0	100	<input type="checkbox"/>

Abbildung .12: 11.500A Modulationsplan

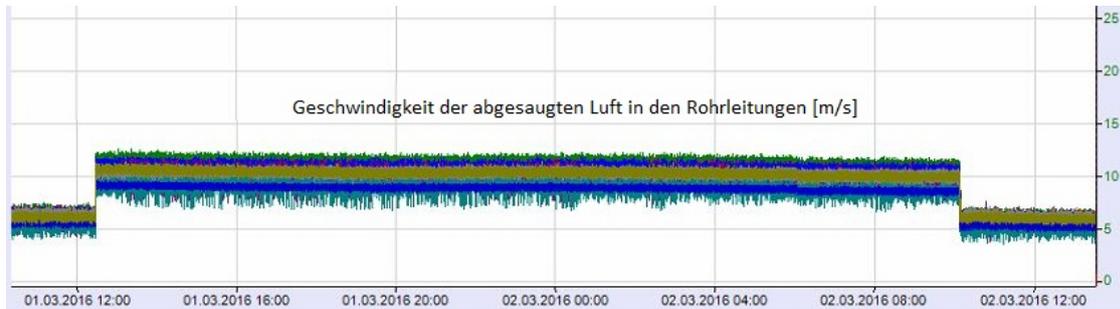


Abbildung .13: Luftmenge der Wärmetauscher

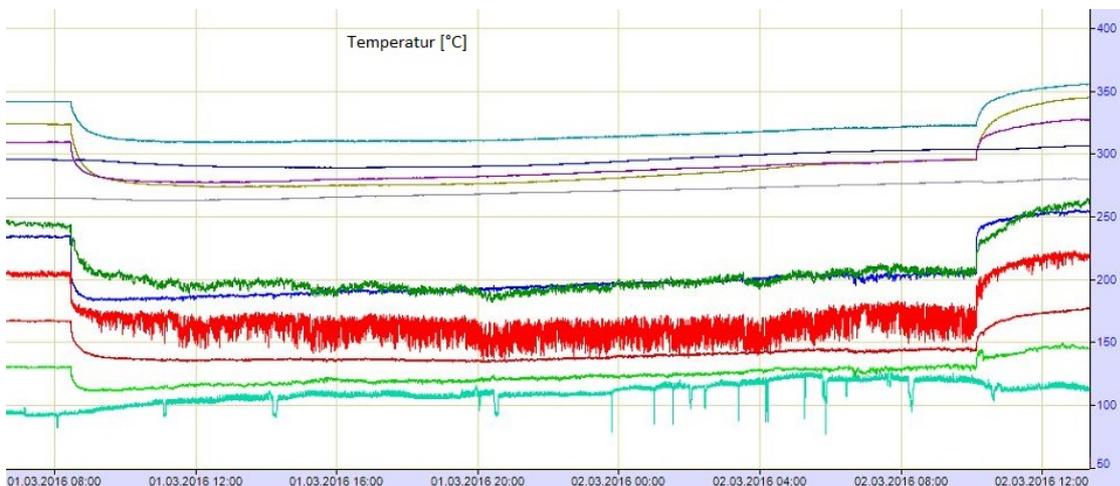


Abbildung .14: Thermoelemente an den Wänden des Ofens 1117

.4 Messungen

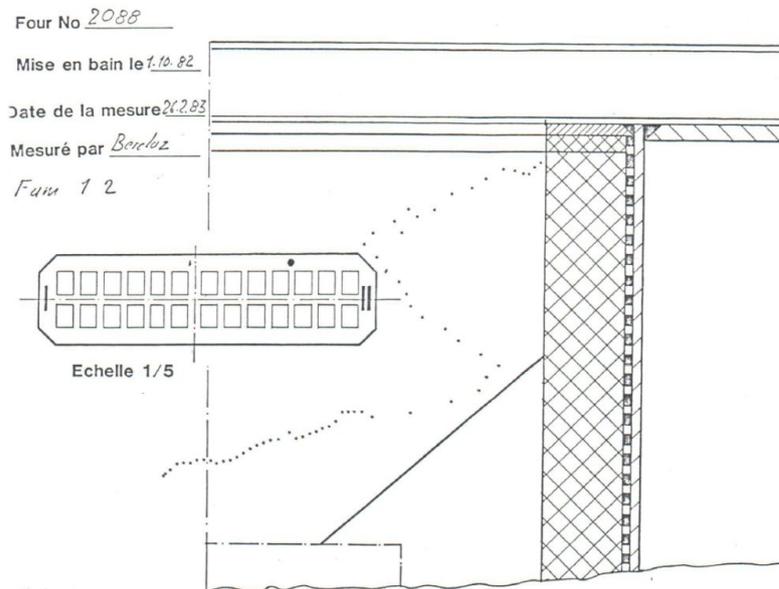


Abbildung .15: Randkrustenmessung von 1983 zwischen Anode 6+26

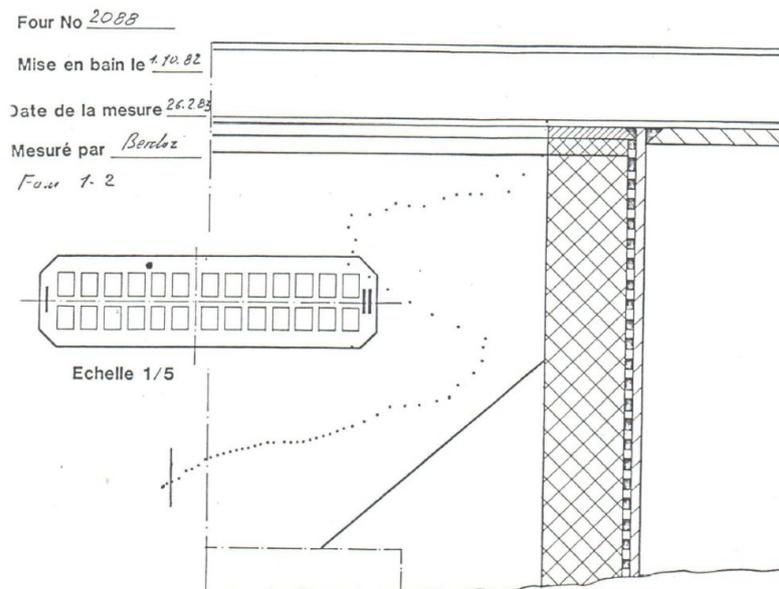


Abbildung .16: Randkrustenmessung von 1983 zwischen Anode 16+8

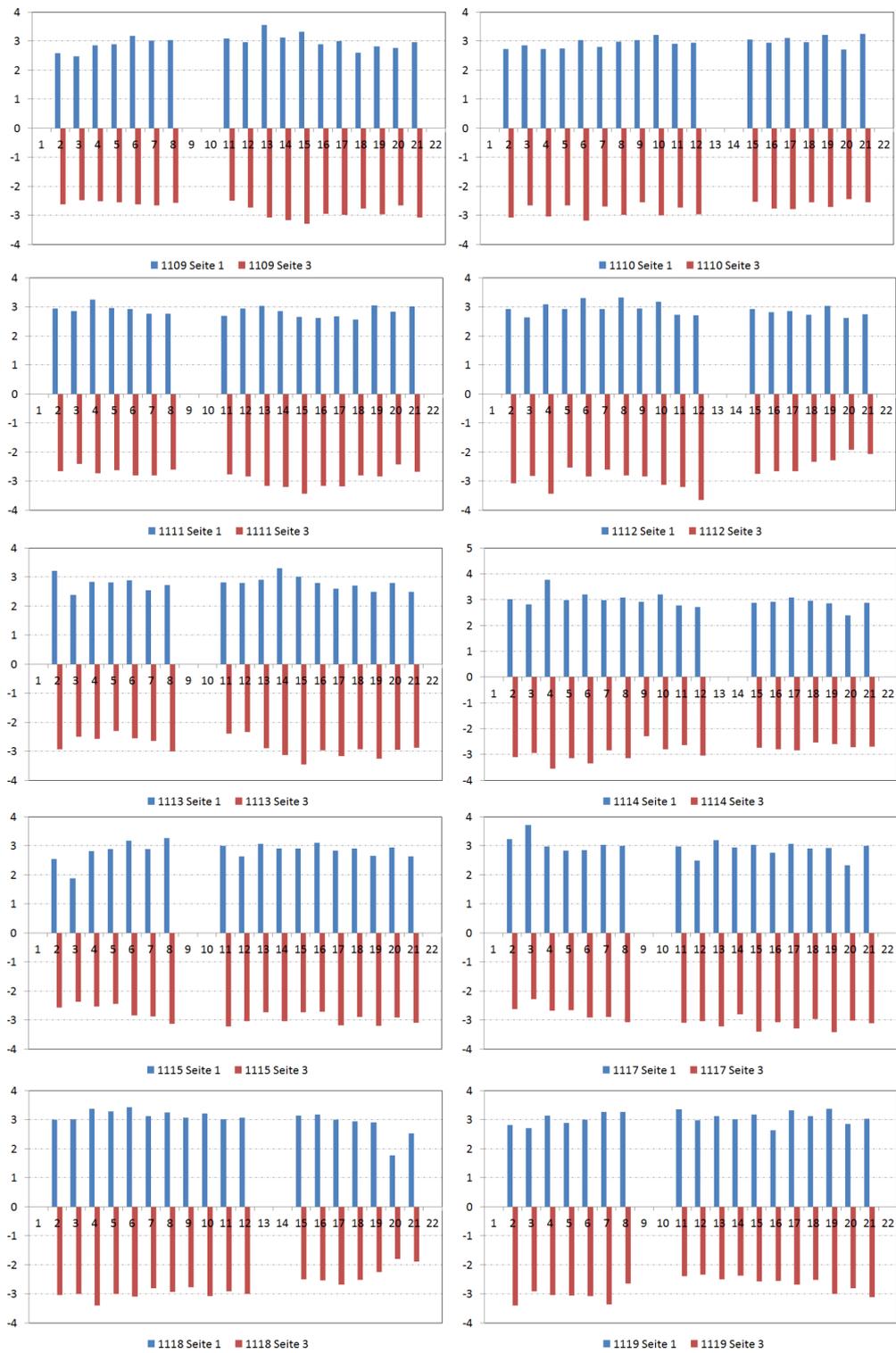


Abbildung .17: Kathodische Stromverteilung der MK-Öfen

.5 Pläne

trimet aluminium
PRIMARY PRODUCTS ESSEN

Anodenwechselprogramm
01.12.2015 - 31.12.2015

Datum	Prod.-Tag	Halle 1		Halle 1		Halle 1		Halle 2		Halle 3	
		Ofen 1001 - 1072	Ofen 1073 - 1108	Ofen 1109 - 1120	Ofen 2001 - 2120	Ofen 3001 - 3120					
01.12.2015	335	5 + 25	u 28	3 + 9	u 28	3 + 9	u 28	7 + 23	u 30	14 + 22	u 30
02.12.2015	336	5 + 25	g 28	3 + 9	g 28	3 + 9	g 28	7 + 23	g 30	14 + 22	g 30
03.12.2015	337	16 + 24	u 28	6 + 26	u 28	6 + 26	u 28	4	u 30	Aussetztag	- 30
04.12.2015	338	16 + 24	g 28	6 + 26	g 28	6 + 26	g 28	4	g 30	Aussetztag	- 30
05.12.2015	339	1 + 11	u 28	7 + 23	u 28	7 + 23	u 28	17	u 30	15 + 21	u 30
06.12.2015	340	1 + 11	g 28	7 + 23	g 28	7 + 23	g 28	17	g 30	15 + 21	g 30
07.12.2015	341	10 + 20	u 28	4	u 28	4	u 28	2 + 8	u 30	12 + 18	u 30
08.12.2015	342	10 + 20	g 28	4	g 28	4	g 28	2 + 8	g 30	12 + 18	g 30
09.12.2015	343	3 + 9	u 28	17	u 28	17	u 28	13 + 19	u 30	1 + 11	u 30
10.12.2015	344	3 + 9	g 28	17	g 28	17	g 28	13 + 19	g 30	1 + 11	g 30
11.12.2015	345	6 + 26	u 28	2 + 8	u 28	2 + 8	u 28	12 + 18	u 30	16 + 24	u 30
12.12.2015	346	6 + 26	g 28	2 + 8	g 28	2 + 8	g 28	12 + 18	g 30	16 + 24	g 30
13.12.2015	347	7 + 23	u 28	13 + 19	u 28	13 + 19	u 28	15 + 21	u 30	5 + 25	u 30
14.12.2015	348	7 + 23	g 28	13 + 19	g 28	13 + 19	g 28	15 + 21	g 30	5 + 25	g 30
15.12.2015	349	4	u 28	12 + 18	u 28	12 + 18	u 28	16 + 24	u 30	10 + 20	u 30
16.12.2015	350	4	g 28	12 + 18	g 28	12 + 18	g 28	16 + 24	g 30	10 + 20	g 30
17.12.2015	351	17	u 28	15 + 21	u 28	15 + 21	u 28	1 + 11	u 30	3 + 9	u 30
18.12.2015	352	17	g 28	15 + 21	g 28	15 + 21	g 28	1 + 11	g 30	3 + 9	g 30
19.12.2015	353	2 + 8	u 28	14 + 22	u 28	14 + 22	u 28	Aussetztag	- 30	6 + 26	u 30
20.12.2015	354	2 + 8	g 28	14 + 22	g 28	14 + 22	g 28	Aussetztag	- 30	6 + 26	g 30
21.12.2015	355	13 + 19	u 28	1 + 11	u 28	1 + 11	u 28	14 + 22	u 30	7 + 23	u 30
22.12.2015	356	13 + 19	g 28	1 + 11	g 28	1 + 11	g 28	14 + 22	g 30	7 + 23	g 30
23.12.2015	357	12 + 18	u 28	16 + 24	u 28	16 + 24	u 28	5 + 25	u 30	4	u 30
24.12.2015	358	12 + 18	g 28	16 + 24	g 28	16 + 24	g 28	5 + 25	g 30	4	g 30
25.12.2015	359	15 + 21	u 28	5 + 25	u 28	5 + 25	u 28	10 + 20	u 30	13 + 19	u 30
26.12.2015	360	15 + 21	g 28	5 + 25	g 28	5 + 25	g 28	10 + 20	g 30	13 + 19	g 30
27.12.2015	361	14 + 22	u 28	10 + 20	u 28	10 + 20	u 28	3 + 9	u 30	2 + 8	u 30
28.12.2015	362	14 + 22	g 28	10 + 20	g 28	10 + 20	g 28	3 + 9	g 30	2 + 8	g 30
29.12.2015	363	5 + 25	u 28	3 + 9	u 28	3 + 9	u 28	6 + 26	u 30	17	u 30
30.12.2015	364	5 + 25	g 28	3 + 9	g 28	3 + 9	g 28	6 + 26	g 30	17	g 30
31.12.2015	365	16 + 24	u 28	6 + 26	u 28	6 + 26	u 28	7 + 23	u 30	14 + 22	u 30

Stand: 28.12.2015 09:02

u = ungerade Seite

g = gerade Seite

Halle 1
Ofen/Schicht
1001 - 1040 : A
1081 - 1120 : B
1041 - 1080 : C

Halle 2
Ofen/Schicht
2041 - 2080 : A
2001 - 2040 : B
2081 - 2120 : C

Halle 3
Ofen/Schicht
3081 - 3120 : A
3041 - 3080 : B
3001 - 3040 : C

Abbildung .18: Anodenwechselplan Dezember 2015

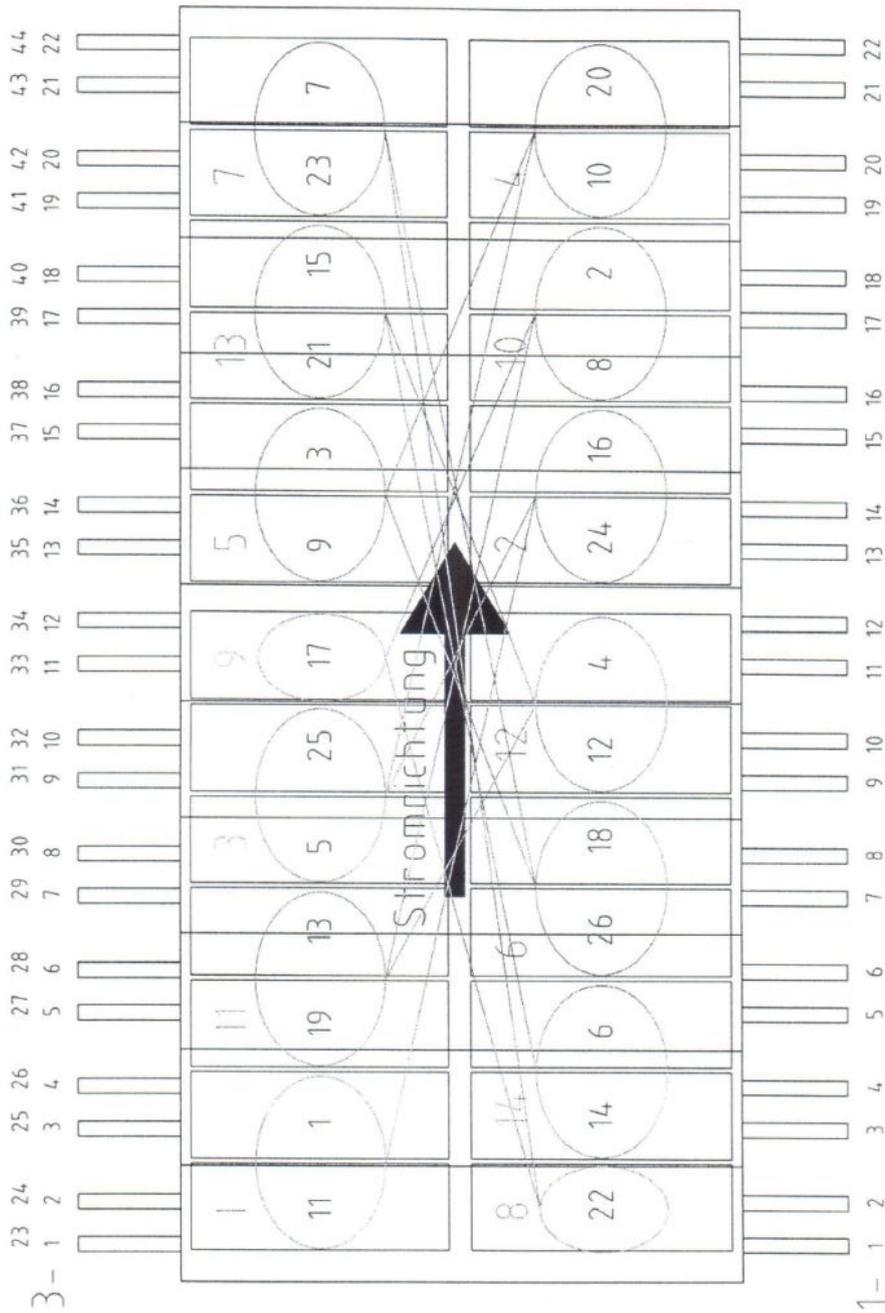


Abbildung .19: Anodensetzplan

Halle	HALLE 1			HALLE 2			HALLE 3			Halle
	1001-1040	1041-1080	1081-1120	2001-2040	2041-2080	2081-2120	3001-3040	3041-3080	3081-3120	
Öfen WANN	22.00	14.00	06.00	06.00	22.00	14.00	14.00	06.00	22.00	Öfen WANN
Seite 1	ungerade	gerade	ungerade	ungerade	ungerade	gerade	ungerade	gerade	ungerade	Seite 1
01.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	01.12.2015
02.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	02.12.2015
03.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	03.12.2015
04.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	04.12.2015
05.12.2015	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	05.12.2015
06.12.2015	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	06.12.2015
07.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	07.12.2015
08.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	08.12.2015
09.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	09.12.2015
10.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	10.12.2015
11.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	11.12.2015
12.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	12.12.2015
13.12.2015	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	13.12.2015
14.12.2015	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	14.12.2015
15.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	15.12.2015
16.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	16.12.2015
17.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	17.12.2015
18.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	18.12.2015
19.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	19.12.2015
20.12.2015	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	20.12.2015
21.12.2015	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	Fib+M	21.12.2015
22.12.2015	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	22.12.2015
23.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	23.12.2015
24.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	24.12.2015
25.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	25.12.2015
26.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	26.12.2015
27.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	27.12.2015
28.12.2015	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	28.12.2015
29.12.2015	CV+M	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	29.12.2015
30.12.2015	FLab	CV+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	30.12.2015
31.12.2015	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	Fib+M	FLab	CV+M	31.12.2015

Abbildung .20: Messplan Dezember 2015

.6 Berechnungstools

Cell Voltage Model									
Voltage Model Input Data									
Bath Chemistry									
AZ03	3.1	wt%							
xSAIF3	10.90	wt%							
MgF2	0.4	wt%							
CaF2	5.7	wt%							
KF	0.4	wt%							
LiF	0	wt%							
Cell Operation									
Bath Temp	963	degC							
Line Current	162000	A							
Cell Meter Voltage	4.34	V							
CVD	0.3	V							
ACD	5.08	cm							
Use goal seek to calculate ACD - to match calculated and meter voltage									
Current Efficiency	93.7	%							
Anode Design									
Number Anodes	26								
Anode Length	1.580	m							
Anode Width	0.52	m							
Bubble Coverage	0.5								
Bubble Depth	0.5	cm							
Gap Distance	69	cm							
(avg gap around anodes)									
Approx. Bubble Coverage Table									
Flat Anode	0.8								
Transverse Slots	0.6								
Longitudinal Slots	0.4								
Cell Voltage Breakdown									
Cell Electrochemical Voltage	1.67								
Decomposition Potential - E_{cath}	1.213								
Anode Overvoltage - η_a	0.516								
Cathode Overvoltage - η_c	0.026								
Total Anode Voltage Drop - IR_a	0.200								
Anode Rod + Yoke + Transition Joint	0.06								
Sub-Carbon Contact	0.12								
Carbon	0.12								
Total Bath Voltage Drop	1.623								
Electrolyte Voltage Drop - IR_e	1.478								
Bubble Voltage Drop - ΔV_{bub}	0.145								
Total Cathode Voltage Drop	0.66								
Cathode + Collector Bar - IR_c	0.3								
External - IR_{ext}	0.36								
Total Model Cell Voltage (V)	4.340								
Meter Avg Voltage (V)	4.340								
$V_{cell} = E_{cath} + \eta_c + \eta_a + IR_a + \Delta V_{bub} + IR_e + IR_c + R_{ext}$									
Liquidus Temperature (degC)	955.0								
Bath Conductivity (1/ohm.cm)	2.144								
Heat Generation									
Cell Internal Voltage	3.980								
Reaction Voltage Vr	2.024								
Heat Generating Voltage	1.956								
Cell Heat Generation (kW)	316.9								
TE Model Inputs									
Effective Cond. (1/ohm.cm)	3.130								
Effective Resist. (ohm.cm)	0.319								
Calculations									
A factor	9.60								
B factor	4.28								
Alumina saturation	8.17	%							
ROS - Relative Saturation	0.980								
Equilibrium Potential	1.213	V							
Anode final bake temp	1100	degC							
Area per Anode	8216	cm2							
Approx Anode CD	0.758	A/cm2							
Critical CD	1.569	A/cm2							
I-r	0.0666								
Anode Surface Polarisation	0.483	V							
Anode Conc Polarisation	0.035	V							
Total Anode Polarisation	0.518	V							
Approx Cathode CD	0.758	A/cm2							
Cathode Polarisation	0.026	V							
Liquidus Temperature	955.0	degC							
Superheat	8.0	degC							
Cryolite Ratio	2.240								
Bath Ratio	1.120								
Bath conductivity	2.144	1/ohm.cm							
Bath Resistivity	0.466	ohm.cm							
T (K)	1236.0	degK							
molAl2O3	0.030402								
molAlF3	0.129794	mf							
molCaF2	0.073005	mf							
molMgF2	0.006420	mf							
molKF	0.006885	mf							
molLiSAF6	0.000000	mf							
molNaAlF6	0.376873	mf							
total moles	0.625180								

Abbildung .21: Ansicht des Spannungs-Berechnungs-Tools

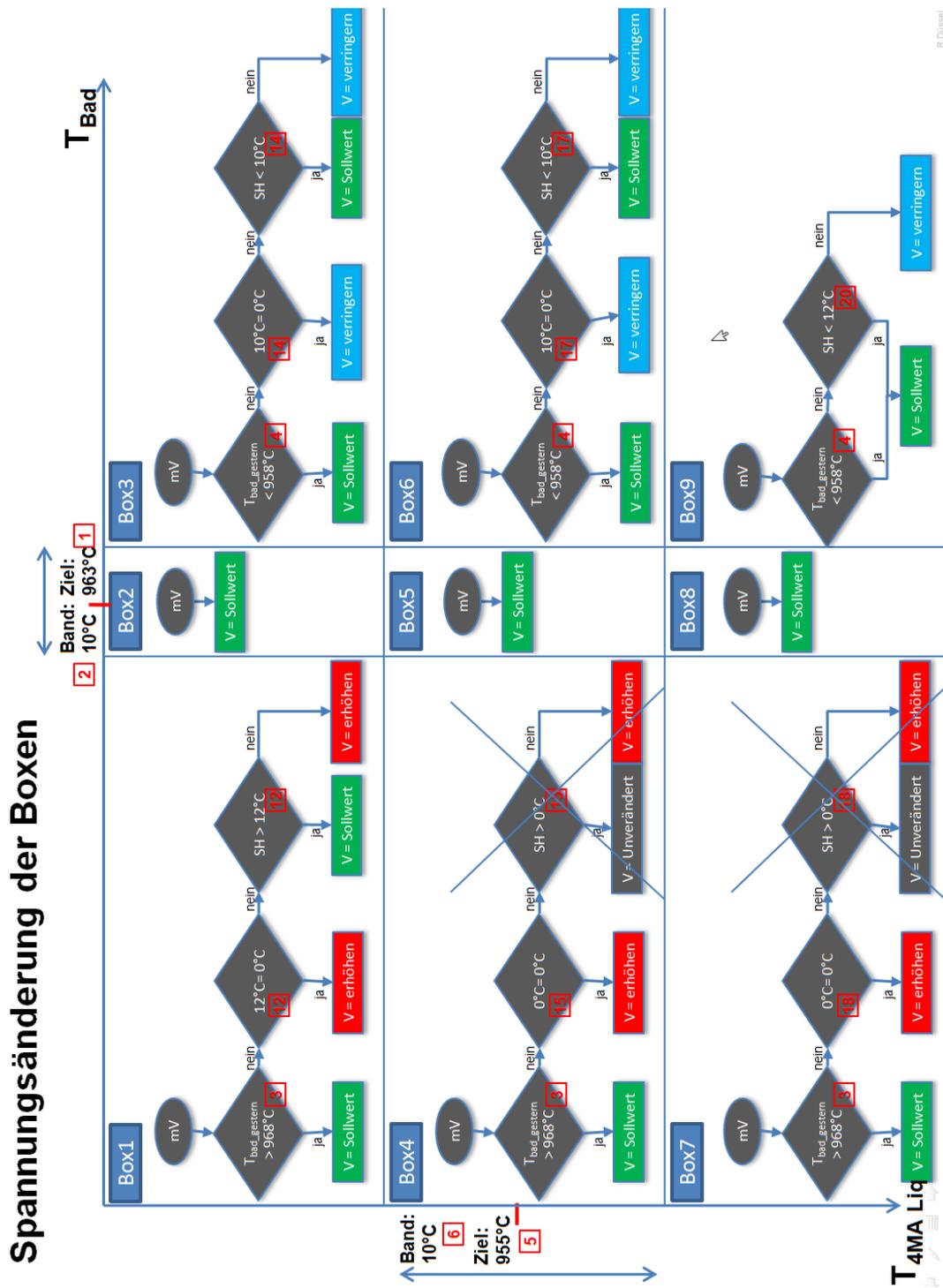


Abbildung .22: Spannungsregelung der 9Box

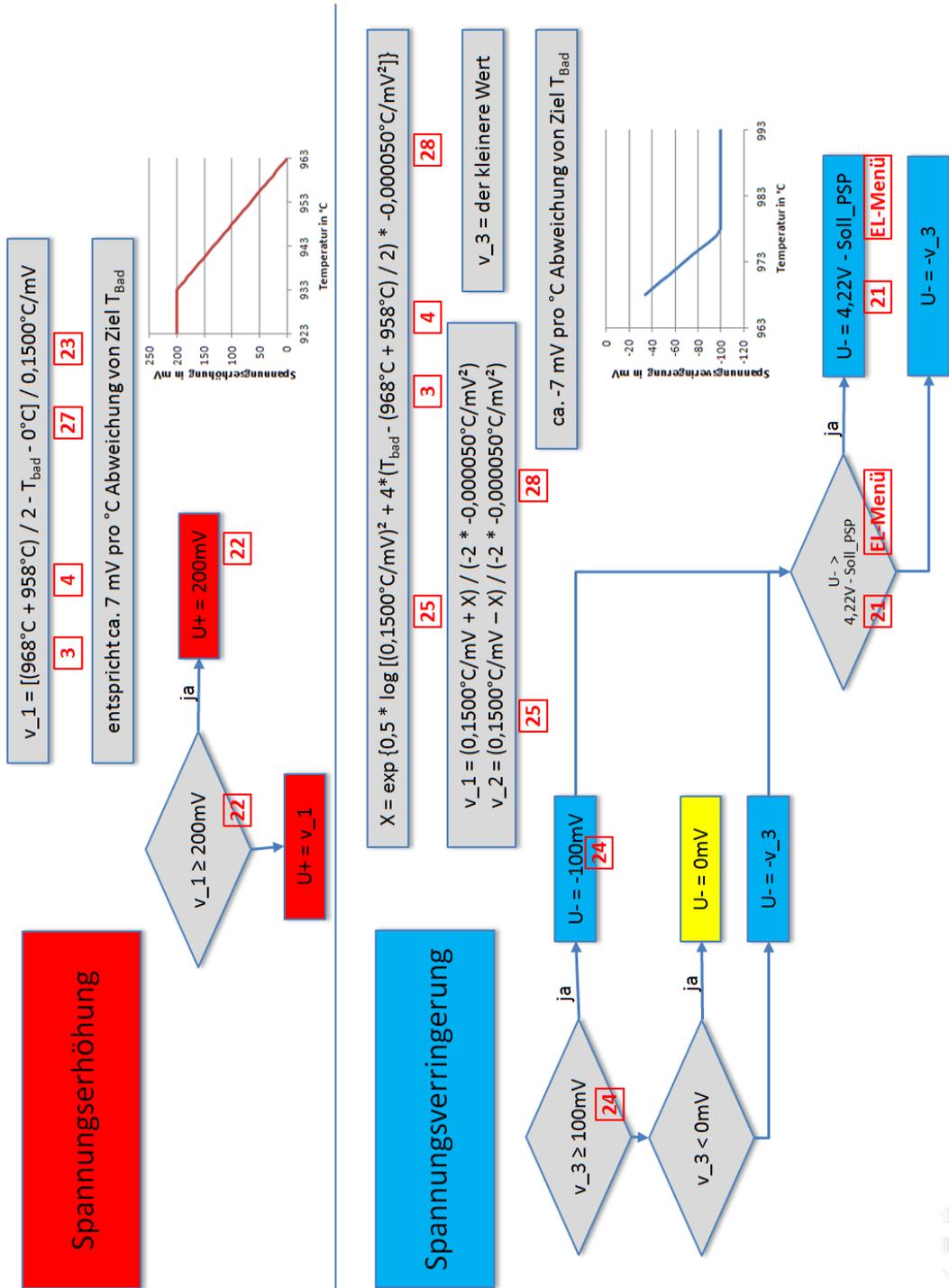


Abbildung .23: Spannungsberechnung der 9Box

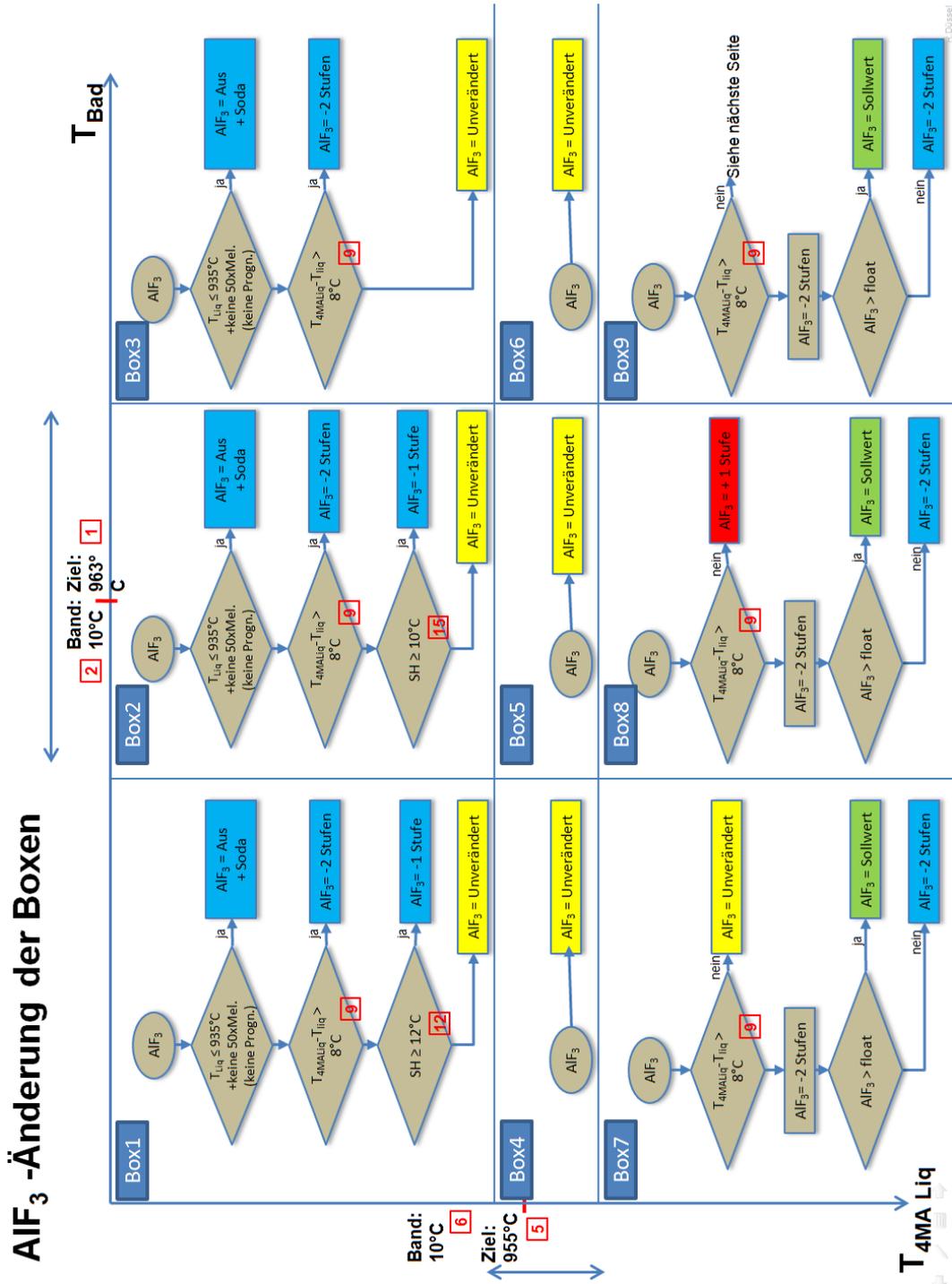


Abbildung .24: AIF₃-Regelung der 9Box, Box1-Box8

AIF₃ -Änderung der Box 9

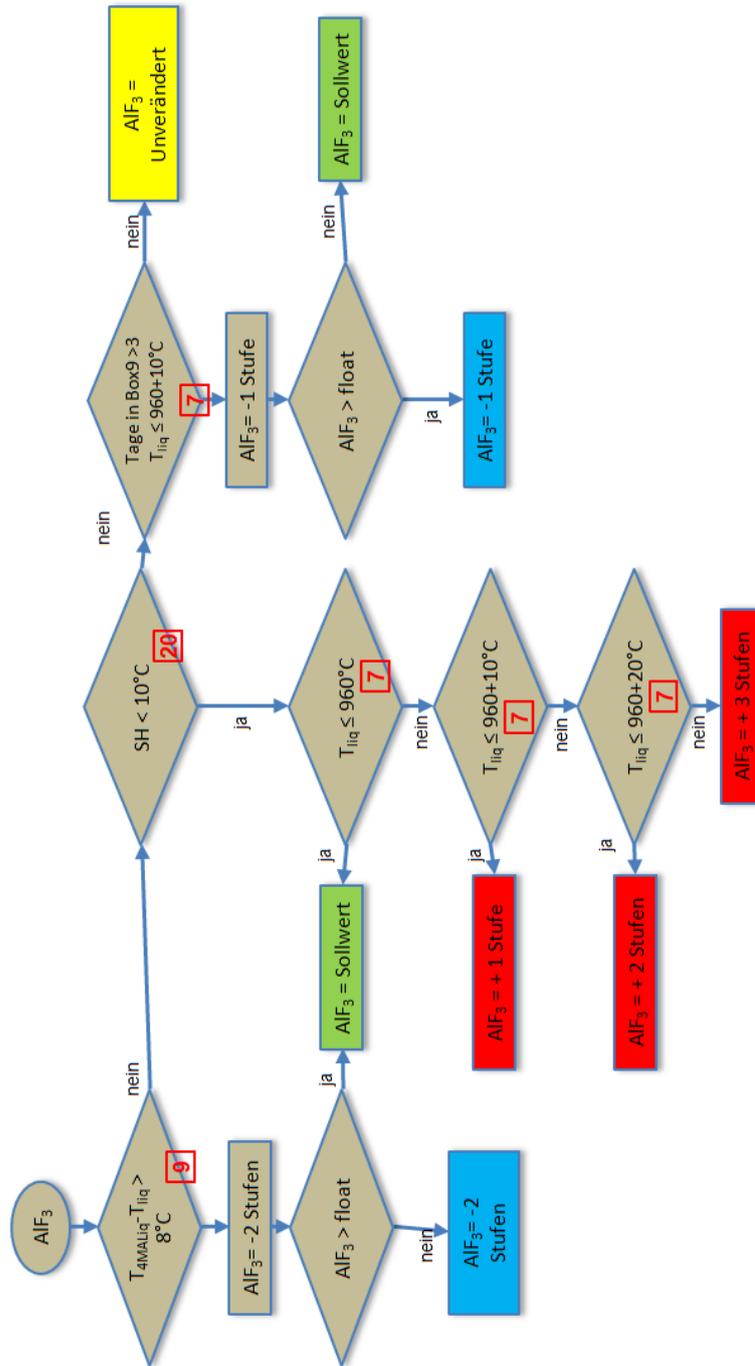
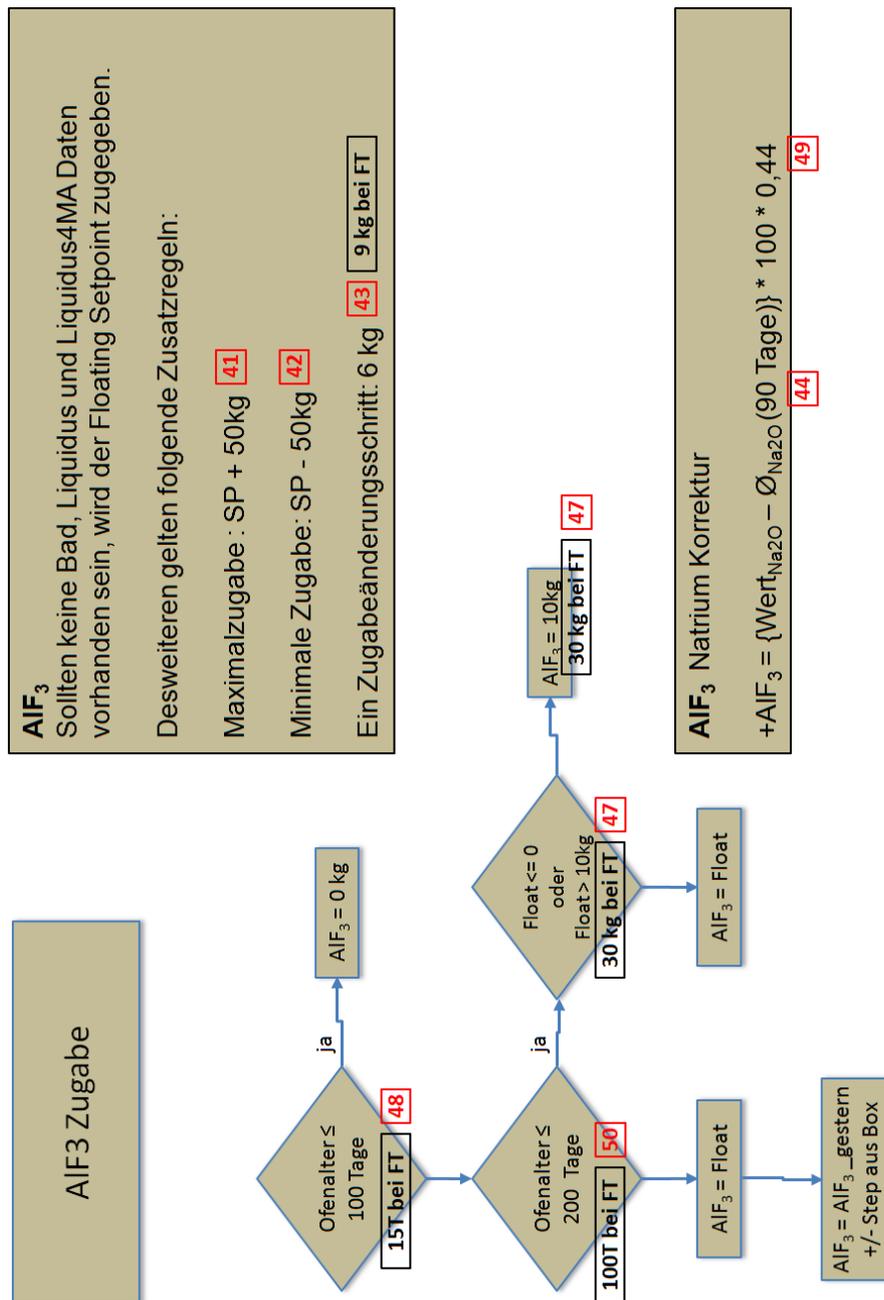


Abbildung .25: AIF3-Regelung der 9Box, Box9



AIF₃
Sollten keine Bad, Liquidus und Liquidus4MA Daten vorhanden sein, wird der Floating Setpoint zugegeben.
Desweiteren gelten folgende Zusatzregeln:
Maximalzugabe : SP + 50kg [41]
Minimale Zugabe: SP - 50kg [42]
Ein Zugabeänderungsschritt: 6 kg [43] 9 kg bei FT

Abbildung .26: AIF3-Berechnung der 9Box bei Ofenstart

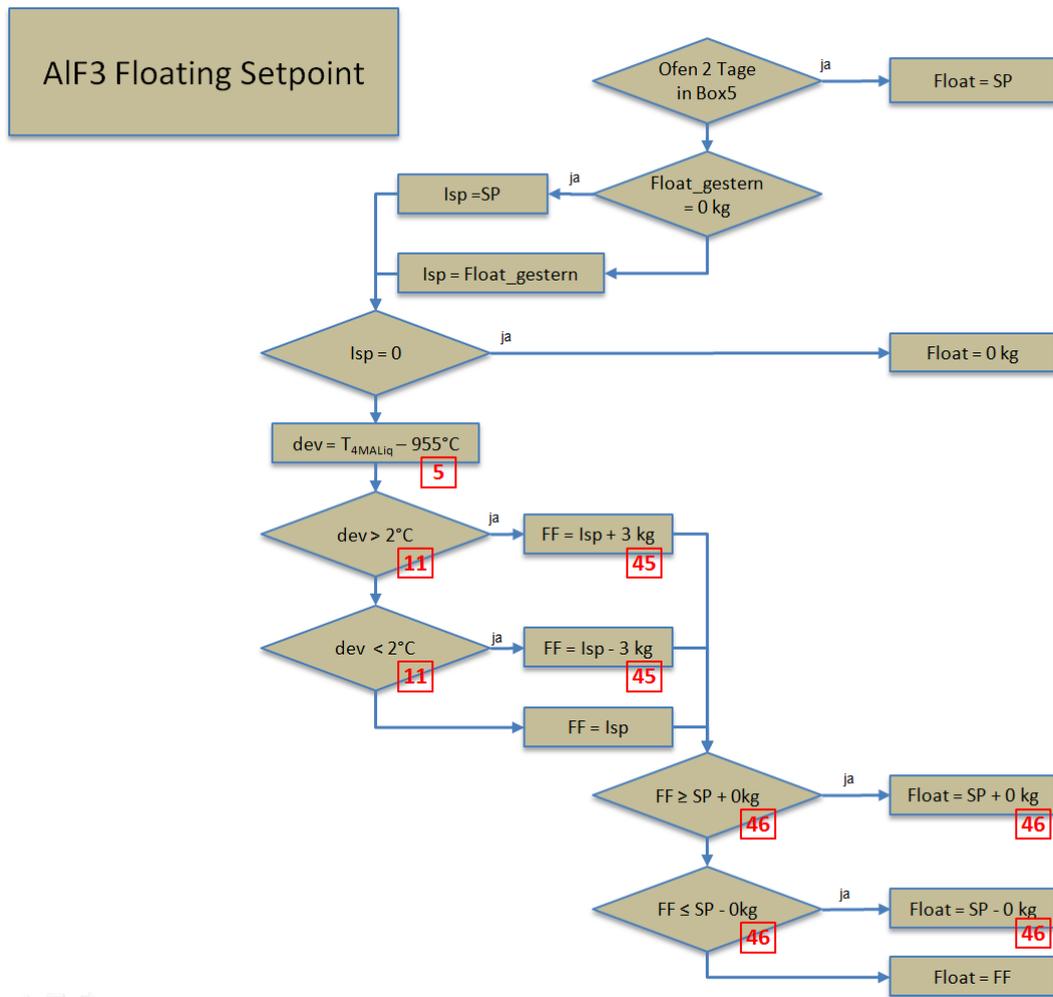


Abbildung .27: AIF3-Berechnung der 9Box, Moving Average

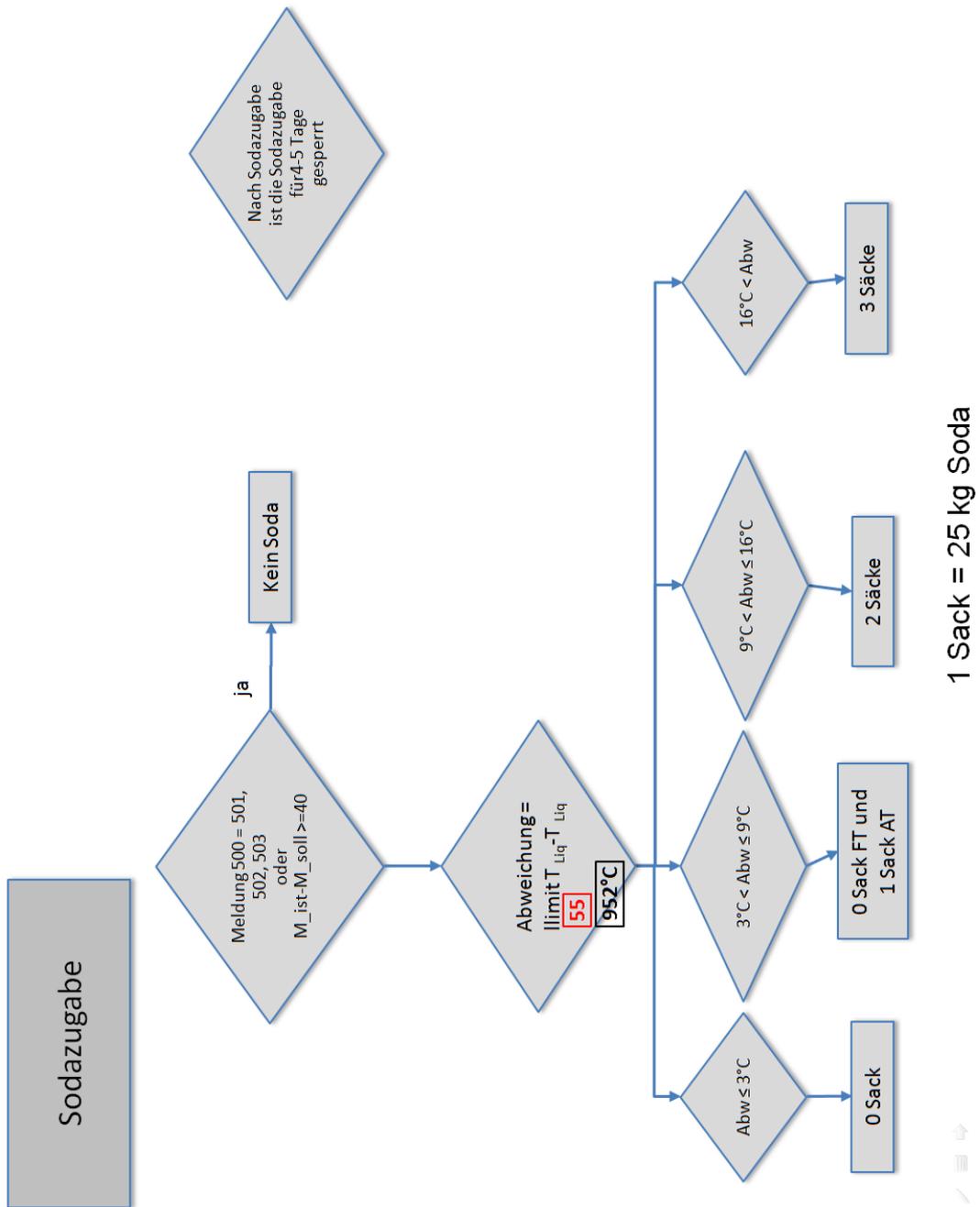


Abbildung .28: Soda-Berechnung der 9Box

AIF₃-Massenbilanz-Berechnung

Die AIF₃-Bilanz ist durch viele Faktoren beeinflusst. Sie lässt sich in die Kategorien Zugabe, Verlust und Generation einteilen. Zur Aufstellung der AIF₃-Bilanz sind folgende Faktoren gegeben:

- 162kA Stromstärke
- $8,054 \frac{\text{kgAl}}{\text{kA} \cdot \text{Tag}}$ Produktionsfaktor
- 93,5% Stromausbeute
- $1,93 \frac{\text{kgAl}_2\text{O}_3}{\text{kgAl}}$
- ungefähre Atommassen der Elemente O = 16u, F = 19u, Na = 23u, Al=27u
- Absaugleistung am Ofen = $4500 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$
- gasförmiges F im Abgas = $140 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$
- F Partikel im Abgas = $100 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$
- Verlust von NaF in die Kathode = $10 \frac{\text{kg}}{\text{Tag}}$
- Anteil von F im Aluminiumoxid = 1,1%

Veränderung aufgrund von Generation

Aufgrund des Fertigungsprozesses des Aluminiumoxids gelangt Natriumoxid in den Aluminiumofen. Das in der Aluminiumindustrie verarbeitete Aluminiumoxid hat einen Na₂O-Gehalt von ca. 0,3-0,5%. In nachfolgender Rechnung wird der Mittelwert von 0,38% verwendet. Dieses verbindet sich mit überschüssigem Aluminiumfluorid und erzeugt Elektrolyt Na₃AlF₆. Der Verlust von AIF₃ aufgrund dieser Generation lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} \text{Tagesproduktion Aluminium} &= 162\text{kA} \cdot 8,054 \frac{\text{kgAl}}{\text{kA} \cdot \text{Tag}} \cdot 0,935 \\ &= 1219,9 \frac{\text{kgAl}}{\text{Tag}} \end{aligned} \quad (.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Tagesbedarf an Aluminiumoxid} &= 1,93 \frac{\text{kgAl}_2\text{O}_3}{\text{kgAl}} \cdot 1220 \frac{\text{kgAl}}{\text{Tag}} \\ &= 2354,5 \frac{\text{kgAl}_2\text{O}_3}{\text{Tag}} \end{aligned} \quad (.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Tageszugabe von Na}_2\text{O} &= 2355 \frac{\text{kgAl}_2\text{O}_3}{\text{Tag}} \cdot 0,38\% \\ &= 8,9 \frac{\text{kgNa}_2\text{O}}{\text{Tag}} \end{aligned} \quad (.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Gleichgewicht von Na} &\Rightarrow \frac{\text{Masse1} \cdot \text{GewichtsanteilNa}}{\text{Na}_2\text{O}} \\ &= \frac{\text{Masse2} \cdot \text{GewichtsanteilNa}}{\text{Na}_3\text{AlF}_6} \end{aligned} \quad (.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Erzeugung von Elektrolyt} &= \frac{8,9\text{kg} \cdot 2 \cdot 23_{\text{Na}}}{2 \cdot 23_{\text{Na}} + 16_{\text{O}}} \cdot \frac{3 \cdot 23_{\text{Na}} + 27_{\text{Al}} + 6 \cdot 19_{\text{F}}}{3 \cdot 23_{\text{Na}}} \\ &= 20,2 \frac{\text{kgNa}_3\text{AlF}_6}{\text{Tag}} \end{aligned} \quad (.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Verbrauch AlF}_3 &= -20,2 \frac{\text{kgNa}_3\text{AlF}_6}{\text{Tag}} + 8,9 \frac{\text{kgNa}_2\text{O}}{\text{Tag}} \cdot \frac{2 \cdot 23_{\text{Na}}}{2 \cdot 23_{\text{Na}} + 16_{\text{O}}} \\ &= -13,6 \frac{\text{kgAlF}_3}{\text{Tag}} \end{aligned} \quad (.6)$$

Zur Aufrechterhaltung des Überschusses von 12% an Aluminiumfluorid muss das erzeugte Elektrolyt wieder verdünnt werden.

$$\text{Einstellen von 12\% Überschuss} = -20,2 \frac{\text{kgNa}_3\text{AlF}_6}{\text{Tag}} \cdot 12\% = -2,4 \frac{\text{kgAlF}_3}{\text{Tag}} \quad (.7)$$

Durch Umwandlung der Stoffe tritt somit ein Verlust von ca. -15,0kg an Aluminiumfluorid pro Tag auf.

Zugabe von Materialien

In der Abgasreinigungsanlage, auch Trockenadsorptionsanlage genannt, wird frisches Aluminiumoxid mit den Abgasen vermischt. So verbinden sich die Fluoride im Abgas mit dem Aluminiumoxid und werden in den Ofen zurück geführt.

$$\text{Zugabe von F} = 2355 \frac{\text{kg}_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\text{Tag}} \cdot 1,1\% = 25,9 \frac{\text{kg}_F}{\text{Tag}} \quad (.8)$$

$$\text{Zunahme von } \text{AlF}_3 (F \rightarrow \text{AlF}_3) = 25,9 \frac{\text{kg}_{\text{F}_3}}{\text{Tag}} \cdot \frac{27_{\text{Al}} + 3 \cdot 19_F}{3 \cdot 19_F} = 38,2 \frac{\text{kg}_{\text{AlF}_3}}{\text{Tag}} \quad (.9)$$

Durch die Zugabe von angereichertem Aluminiumoxid werden täglich $38,2 \frac{\text{kg}_{\text{AlF}_3}}{\text{Tag}}$ erzeugt.

Entnahme von Materialien

Zusammen mit CO_2 entweicht auch HF aus dem Prozess. Dieser wird mit den Abgasen vom Ofen zur Abgasreinigungsanlage gesaugt.

$$\text{Verlust von F} = \left(-140 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} - 100 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 4500 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{Tag}} = -25,9 \frac{\text{kg}_{\text{F}_3}}{\text{Tag}} \quad (.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Verlust von } \text{AlF}_3 (F \rightarrow \text{AlF}_3) &= -25,9 \frac{\text{kg}_{\text{F}_3}}{\text{Tag}} \cdot \frac{27_{\text{Al}} + 3 \cdot 19_F}{3 \cdot 19_F} \\ &= -38,2 \frac{\text{kg}_{\text{AlF}_3}}{\text{Tag}} \end{aligned} \quad (.11)$$

Natriumfluorid diffundiert während des Prozesses in die Kathode und erhöht somit den AlF_3 -Gehalt des Prozesses.

$$\text{Gewinn von } \text{AlF}_3 = 10 \frac{\text{kg}_{\text{NaF}}}{\text{Tag}} \cdot \frac{19_F \cdot (27_{\text{Al}} + 3 \cdot 19_F)}{(19_F + 27_{\text{Al}}) \cdot 19_F} = 6,7 \frac{\text{kg}_{\text{AlF}_3}}{\text{Tag}} \quad (.12)$$

Durch die Entnahme von Materialien, tritt somit ein Verlust von $31,5 \frac{\text{kg}_{\text{AlF}_3}}{\text{Tag}}$ auf.

Zusammenfassung:

In den bisher berechneten Veränderungen der AlF_3 -Bilanz wurden Veränderungen aufgrund von Verlust oder Zunahme an Elektrolyt durch Arbeiten am Ofen aufgrund ihrer Größe nicht berücksichtigt. Dies sind, Saugen von Fluss beim Metallsaugen, Hereinfallen von Eindeckmaterial beim Anodenwechsel oder Messen, Verlust von Elektrolyt beim Ausbaggern während des Anodenwechsels. Die AlF_3 -Bilanz ergibt Zusammenfassend ein **Defizit von $8,3 \frac{kg_{AlF_3}}{Tag}$** . Dieses Ergebnis spiegelt die aktuelle prozessbedingte Zugabe wieder (siehe Abbildung 3.2).

.7 CellSim

Zitiert aus [Ant16]:

„Despite the fact that the Hall-Heroult process is based on a simple theory, there is a wide range of complex physical-chemical phenomena that must be taken into consideration when modeling the overall process. Several dynamic cell simulators have been published with different objectives from increasing the understanding of the process to development and analysis of process control. The objective of this work is to develop a mathematical model of a Hall-Heroult reduction cell as well as develop a better understanding of the reduction process itself. The effects of variations in operational parameters on the dynamical behavior of an aluminum reduction cell are predicted. Various coupling exists between the complex physiochemical phenomena. Compromises have to be made between simplicity and accuracy of the model. The most relevant aspects of the Hall-Heroult process are preserved. The cell simulator is structured in three main modules:

- a material balance model
- a cell voltage model
- a thermal balance model

The three modules are then combined into one overall cell model which can be used for improving control strategies, cell operation as well as developing a predictive tool for the process itself. The model is not limited in the period of prediction. Operations such as anode change, tapping, alumina and aluminum fluoride feeding can be defined easily by the user. A period of 26 days can be simulated in less than 15 minutes. The simulation of one hour operation needs about 1 second computer time. The model can therefore be used online to help at process control strategies.

The cell simulator is based on MatLab-Simulink software. It integrates:

- computation visualization programming of problems which are expressed in familiar mathematical notation
- a graphical user interface (GUI) for building models as block diagrams, allowing you to draw models as you would with pencil and paper.
- a tool for simulating dynamics systems
- block diagram windows, in which models are created and edited by mouse driven command.
- interactive graphical environment simplifying the modeling process, eliminating the need to formulate differential equations
- open modeling system to add new algorithms such as smoothing of cell resistance or anode effect detection,,

Auszüge der 9Box in Simulink

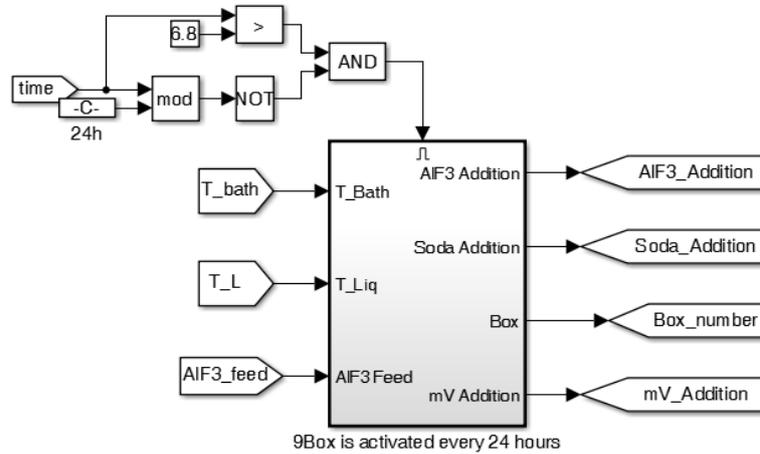


Abbildung .29: 9Box Ein- und Ausgänge

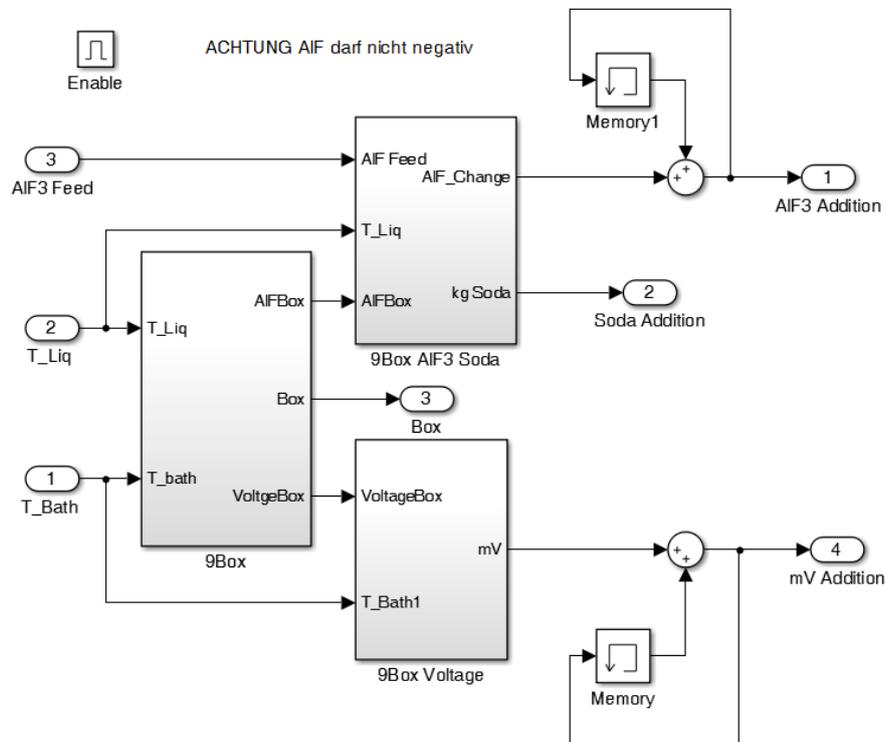


Abbildung .30: 9Box Übersicht

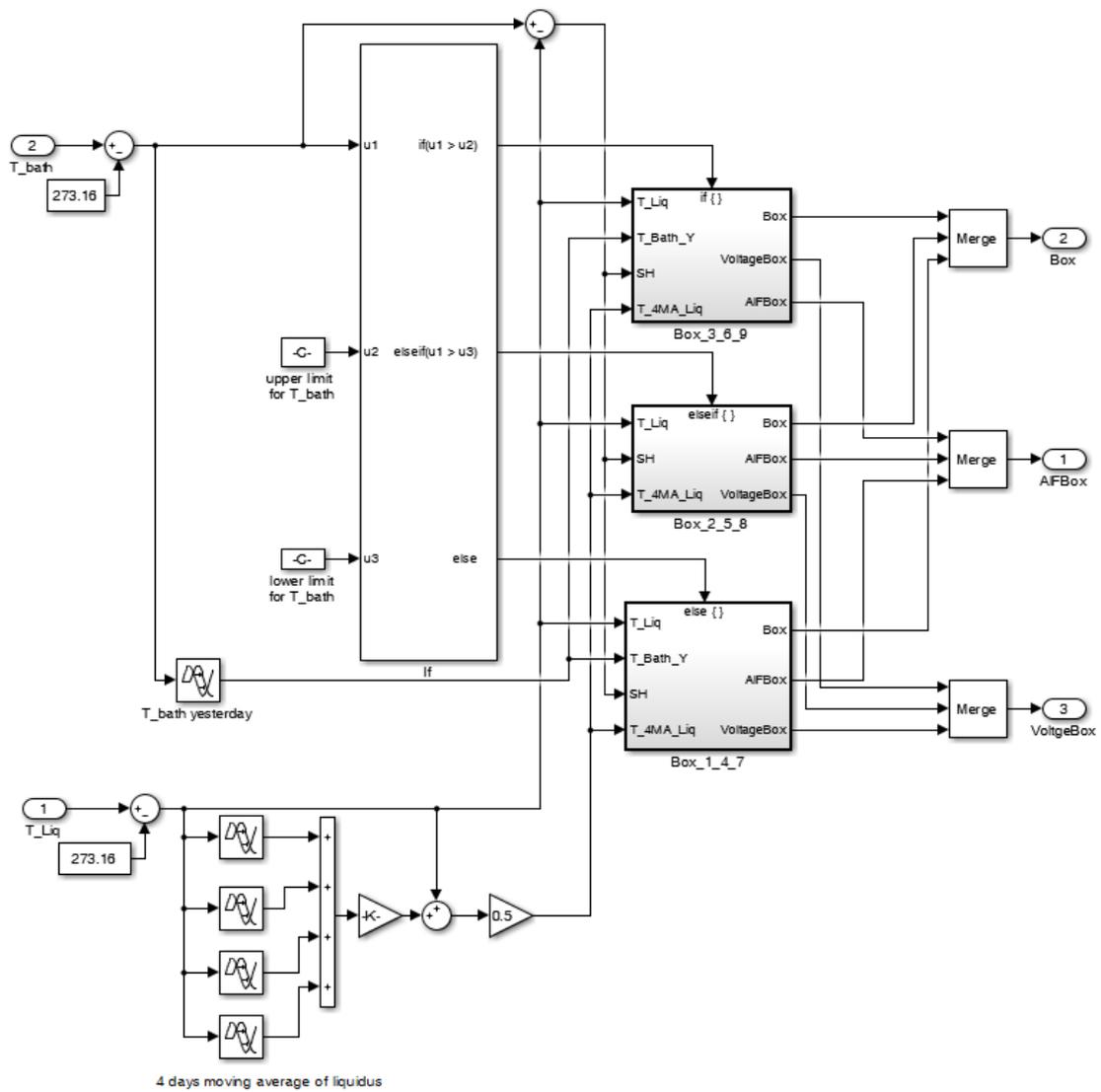


Abbildung .31: 9Box Regelung

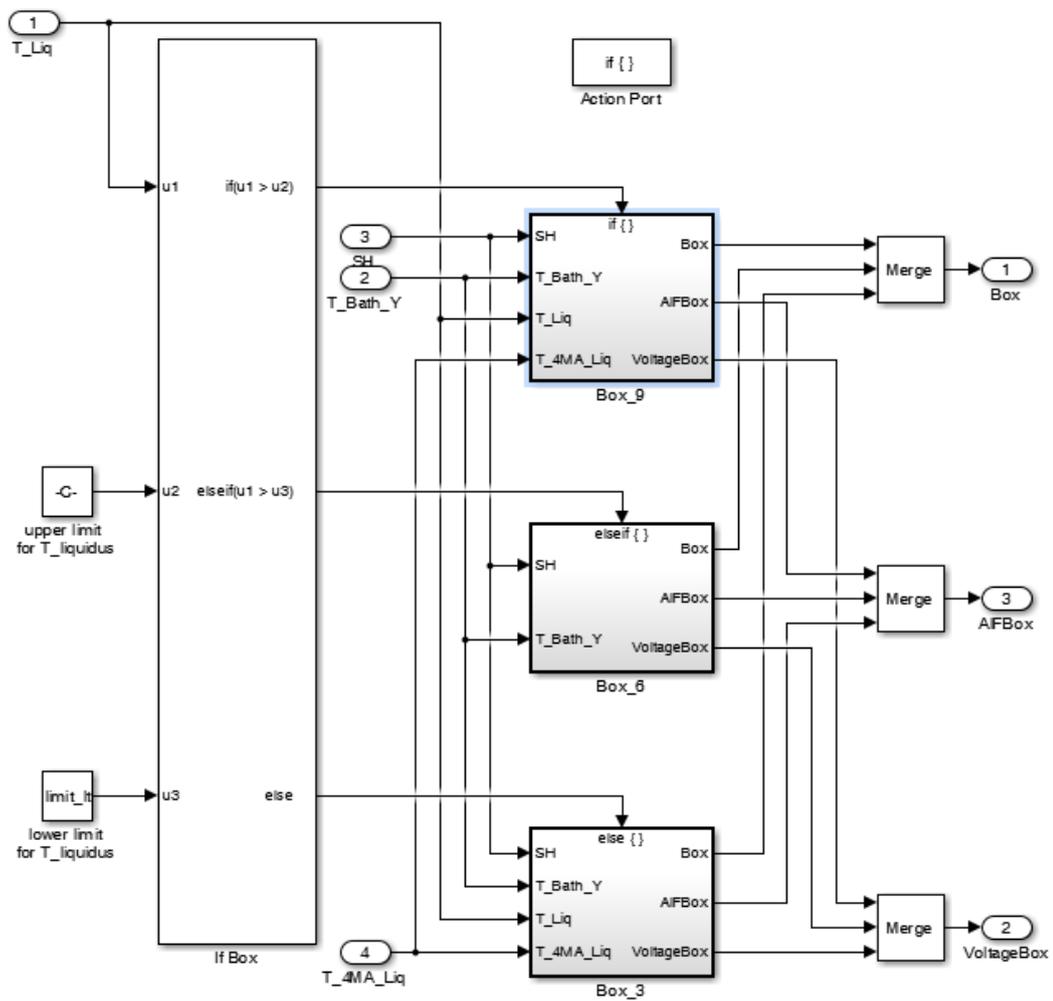


Abbildung .32: 9Box Regelung Box 3, Box 6, Box 9

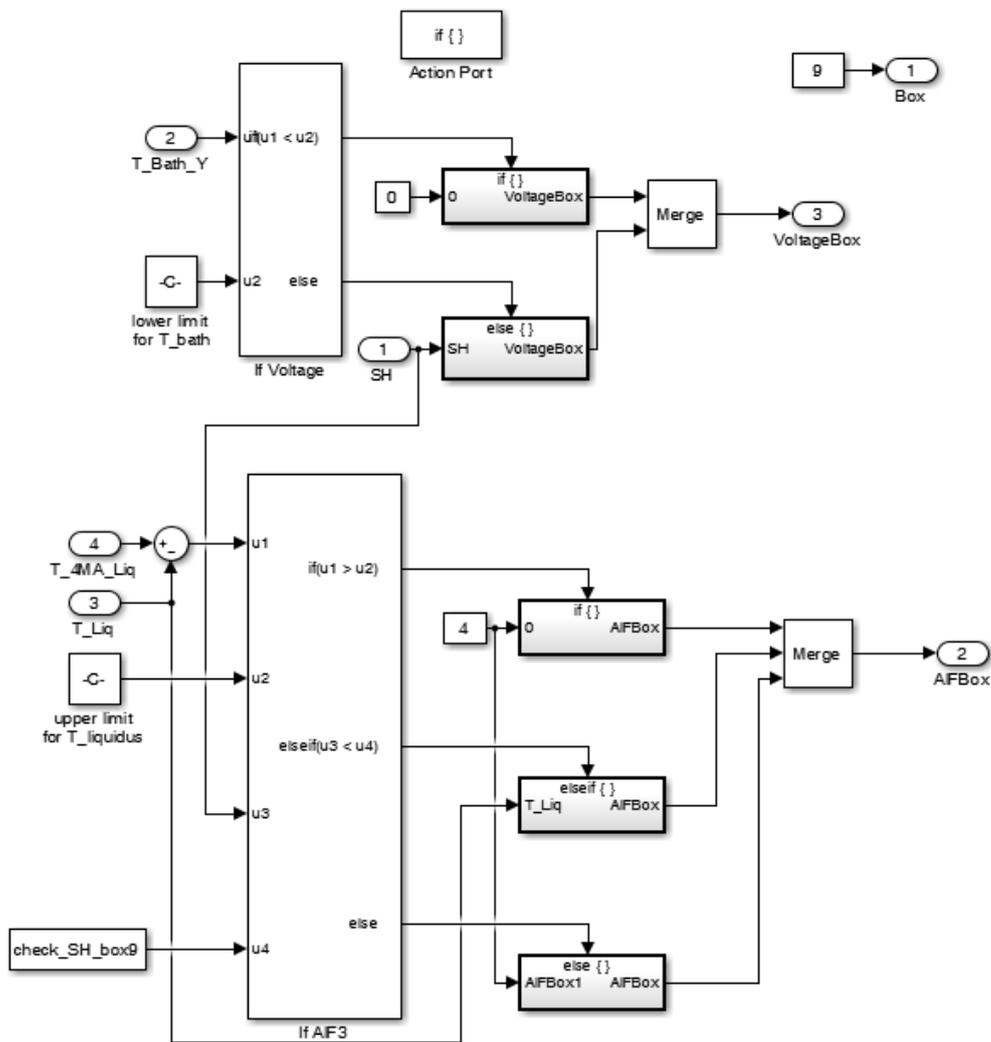


Abbildung .33: 9Box Regelung Box 9

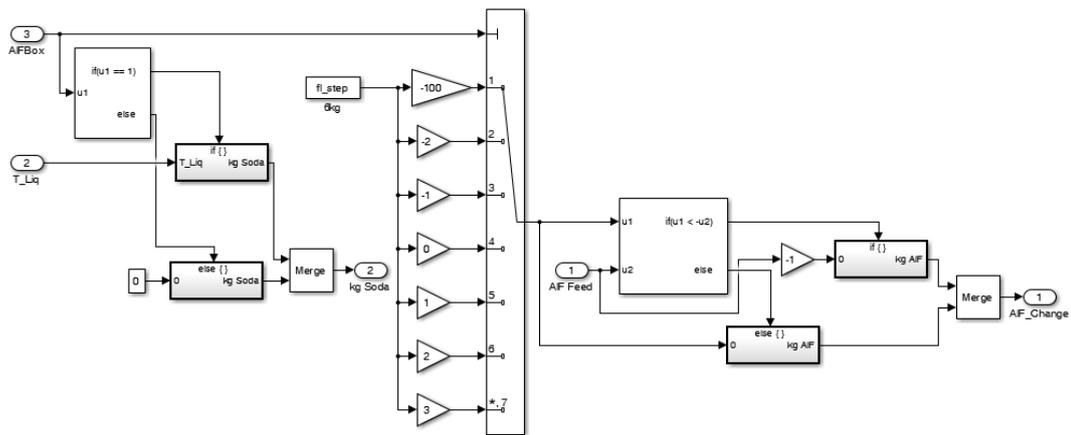


Abbildung .34: 9Box Regelung Soda und AIF3

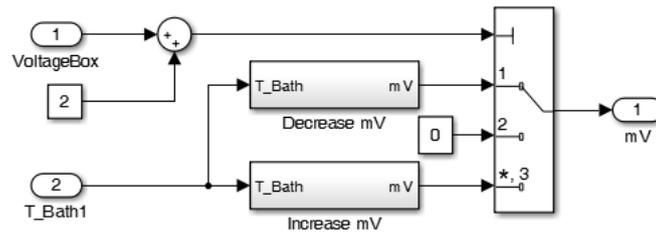


Abbildung .35: 9Box Regelung Spannung

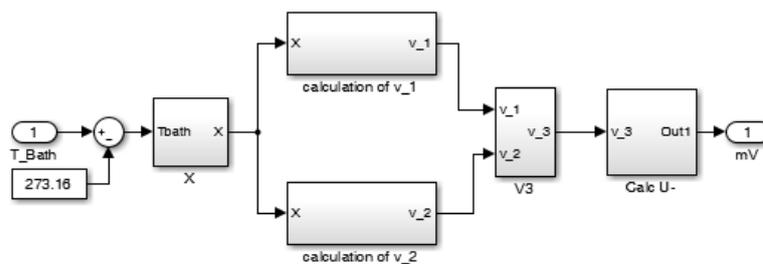


Abbildung .36: 9Box Regelung Spannungsverringering

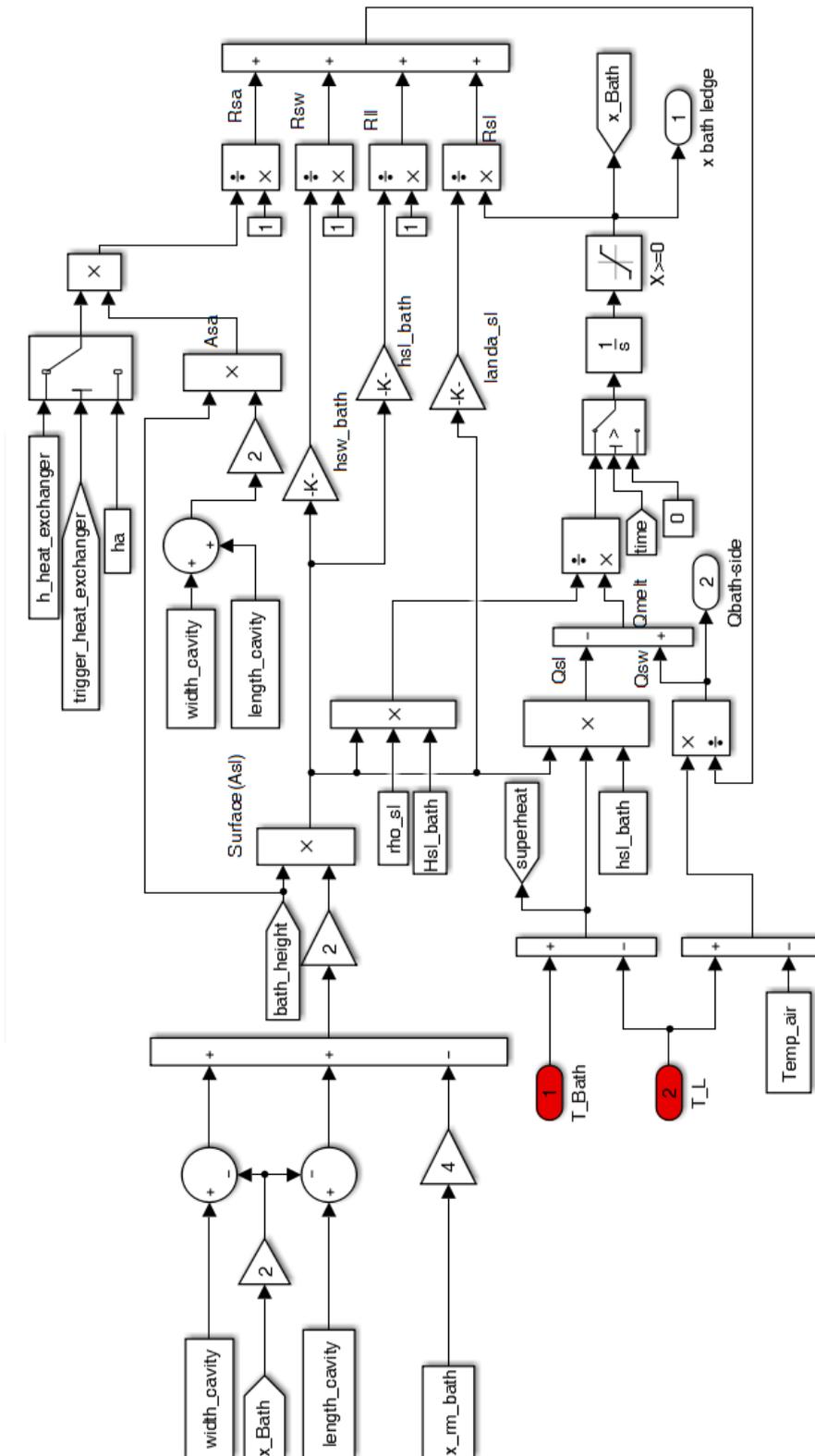


Abbildung .37: Randkrustenmodell im Elektrolyt

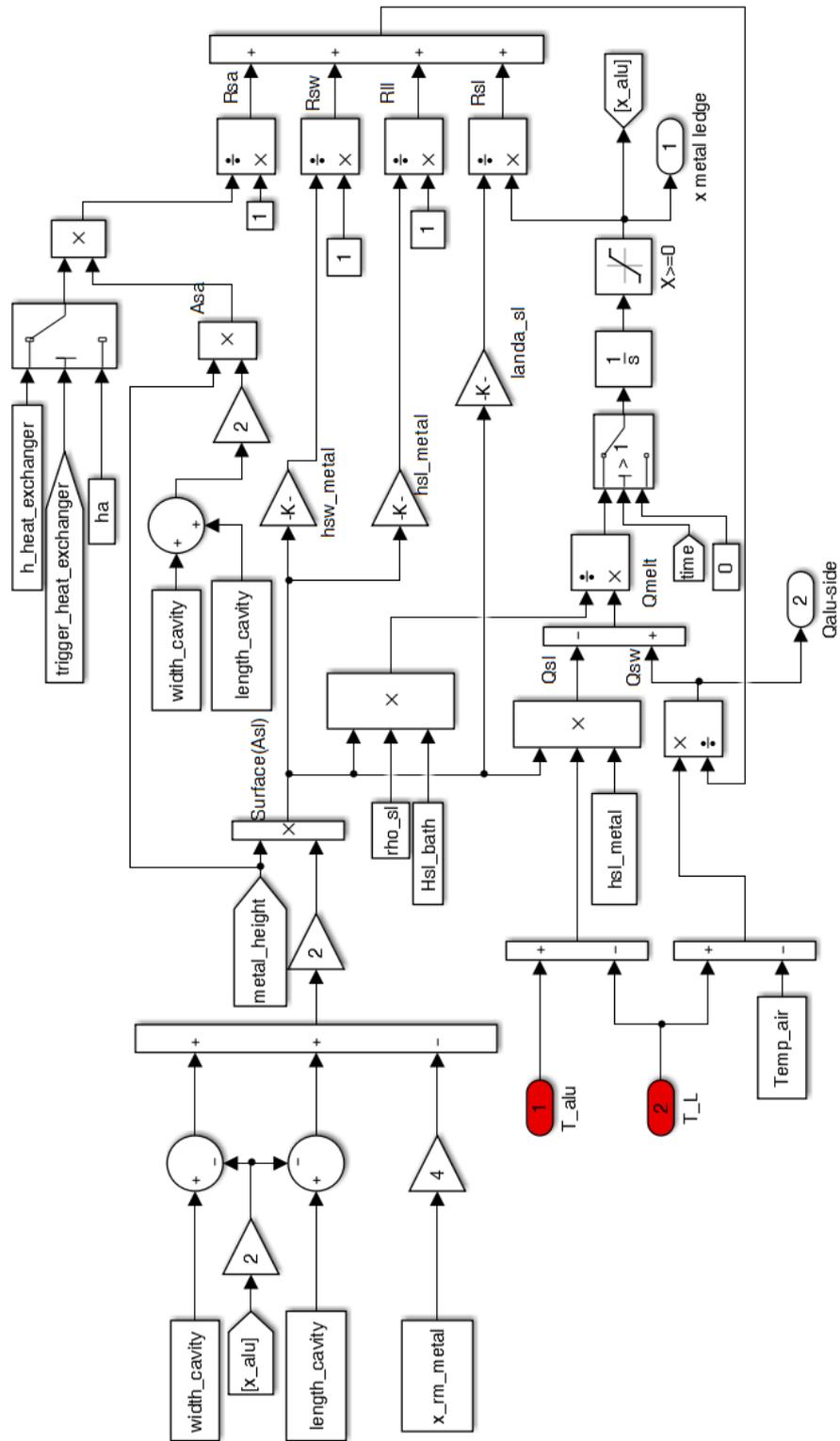


Abbildung .38: Randkrustenmodell im Metall