



Einführung

Die globalen Automobilhersteller sind ein wichtiger Kunde der Aluminiumgießereien, und die steigende Bedeutung von weniger Emissionen und reduziertem Kraftstoffverbrauch lassen den Aluminiumbedarf weiter steigen. Viele Bauteile haben besondere Anforderungen an mechanische Eigenschaften, wie Dehnung oder Bruchfestigkeit, die nicht länger mit herkömmlichen Legierungen zu erfüllen sind. Deswegen kommen zunehmend neue Legierungen und Gießverfahren zum Einsatz. Das gesamte Potential dieser Neuentwicklungen erschließt sich jedoch nur, wenn der Guss komplett frei von Poren und Einschlüssen ist. Sicherheitsrelevante Bauteile beispielsweise müssen eine Dehnung von über 10 Prozent aufweisen, damit liegt dieser Parameter bereits am oberen Limit der meisten Legierungen. Das „Fenster“ für die Eigenschaften der vergießfertigen Schmelze ist oft sehr klein, während die Ausgangsbedingungen wie beispielsweise Masselqualität, Schmelz- oder Halteofentemperatur und Schmelztransport sehr stark variieren. Eine prozesssichere und reproduzierbare Schmelzebehandlung in Verbindung mit einem optimalen Gießprozess werden immer wichtiger.

Insbesondere die Automobilindustrie fordert eine konstante Schmelzequalität vor dem Vergießen, oft in Verbindung mit einer Speicherung der Behandlungsdaten für die Rückverfolgbarkeit der Produktion. Datenerfassung und -speicherung sind schon heute eine verbreitete Forderung.

Ein innovativer Prozess, der automatisiert konstante Schmelzebehandlungsergebnisse garantiert – unabhängig von externen Bedingungen vor und während der Behandlung – wird zukünftig der Schlüssel für qualitativ hochwertige Gussstücke sein.

Die Entgasungssimulation

Das Technikteam der Foseco hat zusammen mit seinem externen Entwicklungspartner tsc - Technology Strategy Consultants (UK) - die internetbasierte Entgasungssimulation entwickelt. Dieses Werkzeug ermöglicht die schnelle Analyse und Verbesserung der Behandlungsparameter in Aluminiumgießereien, ohne zeitaufwändige Versuche vor Ort durchführen zu müssen.

Die Software basiert auf einem mathematischen Modell, welches Forschungsergebnisse zur Kinetik der Entgasung berücksichtigt, beispielsweise zu Wasserstofflöslichkeit, Diffusionskoeffizienten und stabiler Gasblasengröße in der Schmelze. Ein umfangreiches Versuchsprogramm hat diese allgemeinen Gesetzmäßigkeiten auf die von Foseco entwickelten Rotordesigns angewendet und spezifische Daten für unterschiedliche Rotordesigns unter unterschiedlichen Bedingungen erarbeitet.

Folgende Versuche im Wassermodell und unter realen Bedingungen wurden durchgeführt:

- Bestimmung des Drehmomentes der Rotoren
- Effektivität der Durchmischung
- Löslichkeit von Gasen in Wasser
- Entgasungsleistung in verschiedenen Aluminiumlegierungen

Einen kompletten Bericht zu diesen Arbeiten finden Sie in der Foundry Practice 256 (2011).

Was beeinflusst die Entgasung?

Die Effektivität der Entgasung wird von drei Größen beeinflusst: Umgebungsbedingungen, FDU Geräteeinstellungen und Schmelzeigenschaften. Mittels der Entgasungssimulation wurde der Verlauf der Wasserstoffkonzentration über der Zeit für gebräuchliche Ausgangsbedingungen berechnet. Die Variationen der Ausgangsparameter zeigen den Einfluss auf die Entgasung und speziell den erreichbaren Gleichgewichtsgehalt an gelöstem Wasserstoff nach der Behandlung.

ATL 1000 mit 850 kg Schmelze	XSR 220 Rotor
AlSi7Mg	420 1/min
750 °C Schmelzetemperatur	20 l/min Inertgas
50 % Relative Luftfeuchtigkeit	0,30 ml H ₂ / 100 g Al Startkonzentration
25 °C Umgebungstemperatur	

Tabelle 1: Simulationsparameter

1. Umgebungsbedingungen

Die Schmelze steht im Gleichgewicht mit der Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre; ein warmes und feuchtes Klima führt zu höheren Wasserstoffgehalten in der Schmelze als kaltes und trockenes Wetter (Abb. 1).

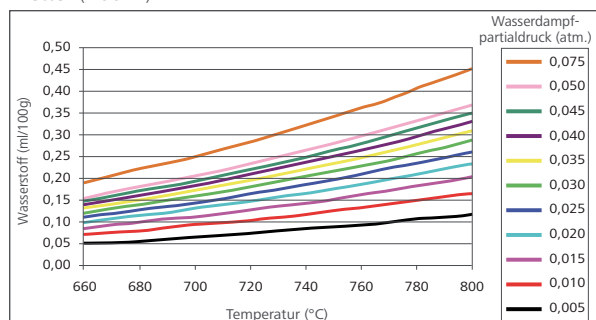


Abb. 1: Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Wasserstofflöslichkeit (0,005 atm = 5 °C / 50 % rH; 0,050 atm = 35 °C / 90 % rH)

Während der Rotorentgasung ist die Schmelze ebenfalls in Wechselwirkung mit der Atmosphäre und nimmt über die Oberfläche erneut Wasserstoff auf. Die Simulation in Diagramm 1 zeigt den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Entgasungsergebnisse.

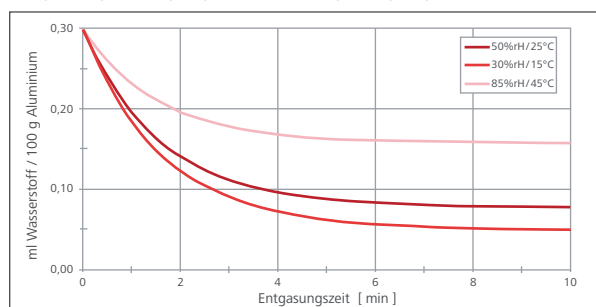


Diagramm 1: Entgasungsverlauf für unterschiedliche Umgebungsbedingungen

2. FDU Geräteeinstellungen

Das FDU Gerät kann die Entgasungsbehandlung mit unterschiedlichen Rotordrehzahlen und Inertgasmengen durchführen. Jedes Rotordesign hat spezifische Minimum- und Maximum-Werte – den Arbeitsbereich – für Umdrehungsgeschwindigkeit und Inertgasmenge. Beide Parameter müssen innerhalb dieses Arbeitsbereiches eingestellt sein; ein Überschreiten führt zu starker Turbulenz an der Oberfläche oder in Extremfällen bis hin zum Lufteinzug durch einen unkontrollierten Strudel und daraus resultierenden Verlust des Kontaktes zwischen Rotor und Schmelze.

Die Diagramme 2 und 3 zeigen das Entgasungsverhalten für typische Einstellungen für einen XSR 220 Rotor unter verschiedenen Bedingungen:

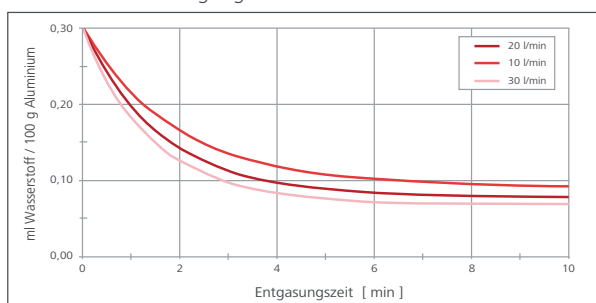


Diagramm 2: Entgasungsverlauf für unterschiedliche Inertgasmengen

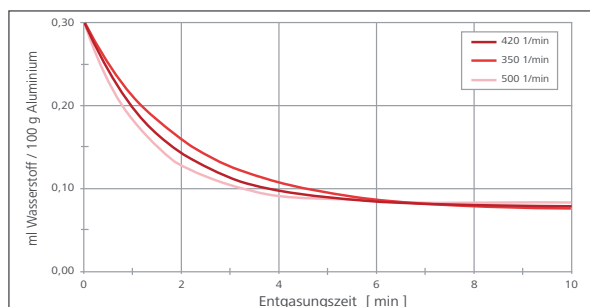


Diagramm 3: Entgasungsverlauf für unterschiedliche Rotorgeschwindigkeiten

3. Schmelzeigenschaften vor der Behandlung

Die Zusammensetzung der Legierung hat wesentlichen Einfluss auf das Behandlungsergebnis. Elemente wie Magnesium erhöhen die Löslichkeit an Wasserstoff, während Silizium oder Kupfer diese sogar leicht verringern (Diagramm 4). Die Schmelztemperatur beeinflusst das Gleichgewicht, bei höheren Temperaturen wird mehr Wasserstoff gelöst (Diagramm 5).

Der Ausgangswasserstoffgehalt ist in der Regel nicht bekannt. Diagramm 6 zeigt jedoch, dass unterschiedliche Startkonzentrationen keinen Einfluss auf den Endgehalt haben.

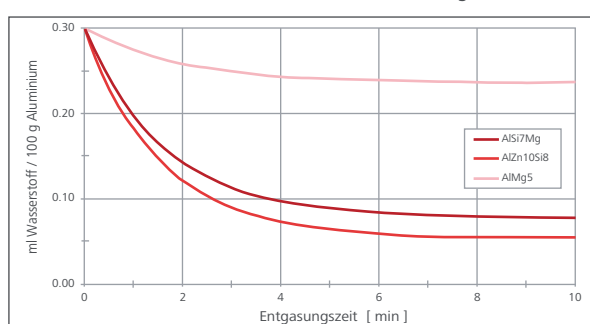


Diagramm 4: Entgasungsverlauf für unterschiedliche Legierungen

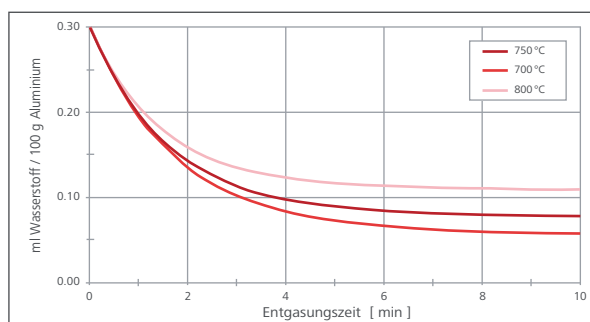


Diagramm 5: Entgasungsverlauf für unterschiedliche Schmelztemperaturen

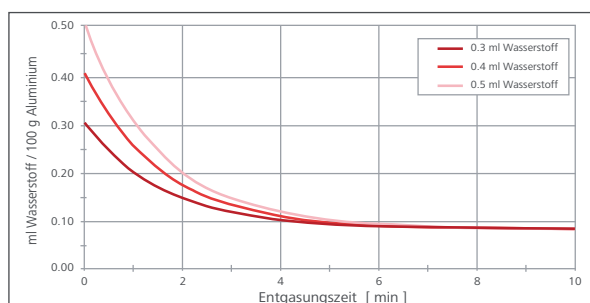


Diagramm 6: Entgasungsverlauf für unterschiedliche Startgehalte an Wasserstoff

SMARTT – die innovative Prozesssteuerung

SMARTT ist die Abkürzung für self-monitoring adaptive recalculation treatment – die innovative Lösung analysiert die für eine Rotorentgasung notwendigen Ausgangsparameter unmittelbar vor jeder Schmelzebehandlung. Ziel ist eine konstante Schmelzequalität am Ende einer jeden Behandlung. SMARTT ist auf einem Windows-PC installiert; die Ein- und Ausgabe erfolgt über einen Touchscreen. Der PC ist über LAN mit der Siemens SPS, welche das Entgasungsgerät steuert, verbunden.

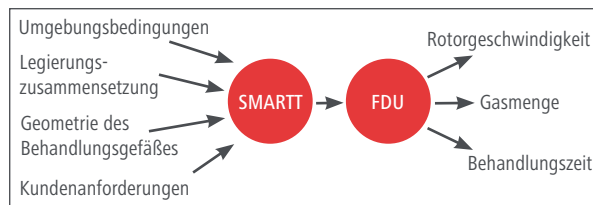


Abbildung 2: Schematischer Aufbau von SMARTT

Die Software basiert auf einer SQL Datenbank. Diese offene Schnittstelle ermöglicht die Speicherung einer nahezu unbegrenzten Anzahl von Tiegel- oder Pfannenabmessungen, Legierungen und Behandlungsprogrammen. Das Ziel für die Optimierung durch die Software ist immer ein Wasserstoffgehalt in der Aluminiumschmelze; dies gilt sowohl für die Entgasung als auch ein gezieltes Begasen.

1. Umgebungsbedingungen

Ein handelsüblicher Sensor misst relative Luftfeuchtigkeit und -temperatur und ist in der Nähe des Schaltschranks angebracht. Der Sensor erfasst dabei die Bedingungen, in denen die FDU Behandlung stattfindet; er überträgt diese Daten in Echtzeit an SMARTT, wo sie gespeichert und als Basis für die Optimierung genutzt werden.

2. Legierung und Behandlungsgefäß

SMARTT wird mit einer Anzahl vordefinierter Legierungen sowie Tiegel- und Transportpfannenabmessungen ausgeliefert. Der Benutzer kann zusätzliche Geometrien oder Legierungen hinzufügen sowie bestehende Datensätze ändern oder löschen. Die definierten Legierungen und Behandlungsgefäße sind zusammen mit Rotordesign und -durchmesser ein fester Bestandteil jedes Programms (Abbildung 4).



Abbildung 3: Touchscreen im Schaltschrank eines FDU Gerätes

3. Optimierungsmethoden

SMARTT bietet vier unterschiedliche Optimierungsmethoden an. Die Berechnung basiert auf einer minimalen und maximalen Inertgasmenge und Rotordrehzahl; diese Grenzen hängen von Rotordesign und -durchmesser und dem Behandlungsgefäß ab. Die Mindestbehandlungszeit stellt die gewünschte Oxidentfernung sicher, auch wenn der Zielgehalt an Wasserstoff eher erreicht wird.

High-speed – Es wird die kürzeste Behandlungszeit errechnet, die bei jeweils maximaler Drehzahl und Inertgasmenge erreicht wird. Die minimale Behandlungszeit wird berücksichtigt, um ausreichende Homogenisierung und Oxidentfernung zu erreichen.

Geringe Gasmenge – Das Ziel wird erreicht unter Ausnutzung der maximalen Behandlungszeit bei niedrigster möglicher Inertgasmenge und entsprechender Rotordrehzahl.

Geringer Verschleiß – Die Behandlung erfolgt bei niedrigster möglicher Rotordrehzahl, um den Verschleiß an Schaft und Rotor zu reduzieren. Die entsprechende Inertgasmenge ergibt sich dann aus der Behandlungszeit.

Standard – Diese Methode ist der Mittelwert aus den beiden Extremen *Geringe Gasmenge* und *Geringer Verschleiß*, sie stellt eine ausgewogene Balance dar.

Die *High-speed* Methode kann genutzt werden, wenn die Entgasung der Engpass in der Produktion ist oder auch nur kurzfristig große Mengen an behandelter Schmelze benötigt werden. Es ist eine gute Möglichkeit, Produktionsspitzen beispielsweise während der Tagschicht oder bei Gussteilen mit hohem Stückgewicht zu überbrücken. Die anderen Methoden sind kundenspezifisch zu wählen, beispielsweise kann *Geringe Gasmenge* bei hohen Preisen für Inertgas eine kostensparende Option sein.

4. Eingabe der MTS Parameter

SMARTT kann auch zur Parametrierung von MTS 1500 Schmelzebehandlungsstationen verwendet werden. Die Parametervorgabe erfolgt für die bekannten Behandlungsschritte am Touchscreen; MTS Parameter sind nicht Bestandteil der Optimierung. Trotzdem ist jeder Parametersatz für MTS 1500 auch Bestandteil eines Programmes, zusammen mit der gewählten Optimierungsmethode und dem Zielgehalt an Wasserstoff (Abbildung 5).

Das Bild zeigt ein Screenshot des Legierungs-Menüs in der SMARTT-Software. Es enthält eine Tabelle mit den Spalten: Name, Mg %, Cu %, Si %, Fe %, Mn %, Zn %. Die Tabelle listet verschiedene Legierungen wie AlMg5, AlSi10Mg, AlSi12(Cu), AlSi7Mg, AlSi9Cu3 und AlZn10Si8 auf. Darunter befindet sich ein Formular zur Eingabe neuer Parameter für die Legierung AlMg5.

Name	Mg %	Cu %	Si %	Fe %	Mn %	Zn %
AlMg5	5	0	0	0,3	0,3	0,1
AlSi10Mg	0,3	0,1	10	0,8	0,3	0,1
AlSi12(Cu)	0,3	1	12	1	0,3	0,3
AlSi7Mg	0,5	0,1	7	0,3	0,5	0,1
AlSi9Cu3	0,3	3	9	1	0,3	1
AlZn10Si8	0,4	0	8	0,1	0	0

Abbildung 4: Legierungs-Menü

Das Bild zeigt ein Screenshot des MTS Parametereingabemenüs. Es enthält eine Tabelle mit den Spalten: MTS Name, Gas Flow (l/min), Vortex Speed, Treatment Speed, Predegas Time, Flux Time 1, Flux Time 2, React Time 1, Inert. Deg. Time, Vortex Time 1, Vortex Time 2, Flux Time 1, Flux Time 2, React Time 2. Darunter befindet sich ein Formular zur Eingabe neuer Parameter für die MTS-Station.

MTS Name	Gas Flow (l/min)	Vortex Speed	Treatment Speed	Predegas Time [s]	Flux Time 1 [s]	Flux Time 2 [s]	React Time 1 [s]	Inert. Deg. Time [s]	Vortex Time 1 [s]	Vortex Time 2 [s]	Flux Time 1 [s]	Flux Time 2 [s]	React Time 2 [s]
Hooper 1	20	650	350	5	20	15	20	0	0	0	0	0	0
Hooper 1 and 2	20	600	300	5	15	10	20	20	15	5	10	5	10
Hooper 2	20	750	420	4	0	0	0	0	0	15	20	15	15
No MTS	20	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 5: Menü für die MTS Parametereingabe

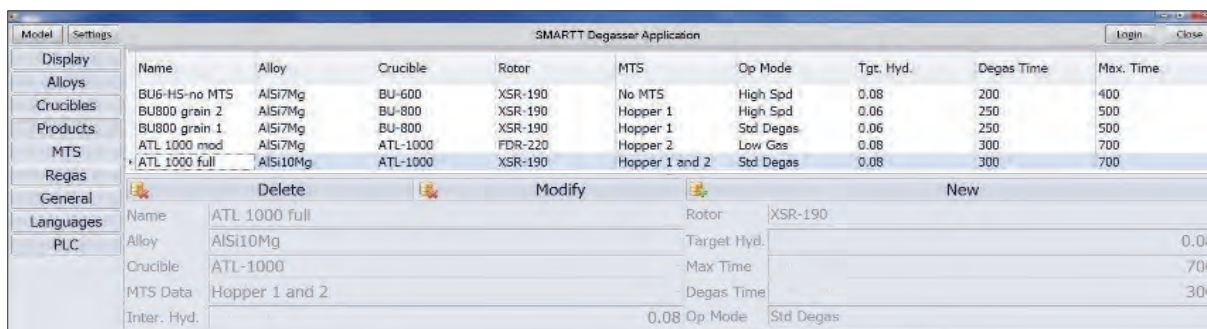


Abbildung 6: Programm-Menü

5. Programm-Menü

Das Programm-Menü vereinigt alle vordefinierten Daten: Legierung, Abmessung des Gefäßes und MTS 1500. Zusätzlich werden die Minimum- und Maximumbehandlungszeit festgelegt. Der gewünschte Wasserstoffgehalt am Ende der Behandlung ist der Zielwert für die Optimierung (Abbildung 6). Abschließend wird die Optimierungsmethode definiert, welche maßgeblich von den Erfordernissen des Kunden abhängt. Die unterschiedlichen Methoden bieten die Möglichkeit, das Ziel auf unterschiedlichen Wegen zu erreichen. Die *Geringe Gasmenge* kann in Regionen mit hohen Kosten für Inertgas gewählt werden. *High-speed* ist ein Weg, um zeitweise oder dauerhafte Engpässe in der Schmelzbehandlung zu überbrücken.

6. Bediener-Bildschirm

Alle bisher beschriebenen Eingabemenüs sind nur für den Administrator zugänglich und mit einem Passwort geschützt. Der Bediener vor Ort sieht eine speziell gestaltete graphische Oberfläche mit einer Auswahl von bis zu 10 Programmen. Zusätzlich werden die Umgebungsbedingungen und die verbleibende Behandlungszeit angezeigt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Bediener-Bildschirm

Ergebnisse von Gießerei-Versuchen

Die SMARTT Software ist an einem FDU Mark 10 MTS 1500 - einem mobilen Entgasungsgerät mit einer Dosiereinheit für Granulat - im Einsatz. Die ersten Versuche hatten das Ziel, einen Wasserstoffgehalt von 0,08 ml Wasserstoff pro 100 g Aluminium zu erreichen, was einer durchschnittlich guten Qualität entspricht. Die Versuchsparameter für die Optimierung in Tabelle 2 entsprechen dabei den für die Entgasungssimulation am Beginn des Artikels genutzten Werten (Tabelle 1).

ATL 1000 mit 850 kg Schmelze	XSR 220 Rotor
AlSi7Mg	0,30 ml H ₂ / 100 g Al zu Startkonzentration
750 °C Schmelzetemperatur (*)	300 s Mindestbehandlungszeit (*)
50 % Relative Luftfeuchtigkeit (*)	25 °C Umgebungstemperatur (*)

(*) – Werte können in einigen Beispielen abweichen

Tabelle 2: SMARTT Ausgangsparameter

Die folgenden Übersichten vergleichen unter variierenden Anfangsbedingungen oder Kundenvorgaben die von SMARTT vorgeschlagenen Behandlungsparameter, mit denen das Ziel erreicht wird.

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse für unterschiedliche Optimierungsmethoden, Tabelle 4 vergleicht Werte für verschiedene Umgebungsbedingungen während Tabelle 5 den Einfluss der Schmelzetemperatur betrachtet.

1. Optimierungsmethoden

Für die Methoden *Geringe Gasmenge*, *Standard* und *Geringer Verschleiß* sucht SMARTT eine mögliche Lösung in der gewünschten Behandlungszeit. Die Methode *Geringe Gasmenge* wählt die maximal mögliche Rotorgeschwindigkeit im Arbeitsbereich und berechnet die dazugehörige Gasmenge, um das Wasserstoffziel zu erreichen. *Geringer Verschleiß* arbeitet umgekehrt bei höchster Gasmenge und korrespondierender Drehzahl. *Standard* ist der Mittelwert von beiden Extremen. *High-speed* findet die kürzeste Behandlungszeit, wobei Gasmenge und Rotorgeschwindigkeit nahe ihrer Maxima des Arbeitsbereichs gesetzt sind.

Optimised	Rotor Speed (RPM) 500	500
	Gas Flow (std. l/m) 29	29
Melt: 750	Process Time (s) 300	300
<i>Geringe Gasmenge</i>		
Optimised	Rotor Speed (RPM) 426	426
	Gas Flow (std. l/m) 32	32
Melt: 750	Process Time (s) 300	300
<i>Standard</i>		
Optimised	Rotor Speed (RPM) 353	353
	Gas Flow (std. l/m) 40	40
Melt: 750	Process Time (s) 300	300
<i>Geringer Verschleiß</i>		
Optimised	Rotor Speed (RPM) 500	500
	Gas Flow (std. l/m) 45	45
Melt: 750	Process Time (s) 155	155
<i>High-speed</i>		

Tabelle 3: Behandlungsparameter für unterschiedliche Entgasungsmethoden

Die Methode *Geringe Gasmenge* verbraucht 55 Liter Inertgas pro Behandlung weniger im Vergleich zu *Geringer Verschleiß*. Schmelzereien mit vier Behandlungen pro Stunde sparen 1.500 Nm³ pro Jahr, was etwa 150 Gasflaschen entspricht.

Bei *Geringer Verschleiß* reduziert sich der Abrieb an Grafitschaft und Rotor. Anwender berichten von 25 % längerer Standzeit bei einer Reduzierung um 150 1/min Rotorgeschwindigkeit. Je nach den Bedingungen in der Schmelzerei können bei vier Behandlungen pro Stunde bis zu 15 Satz Verschleißteile, bestehend aus Rotor und Schaft, pro Jahr eingespart werden.

2. Umgebungsbedingungen

SMARTT übernimmt die Messwerte für Luftfeuchtigkeit und -temperatur unmittelbar vor jeder Behandlung und optimiert mit diesen Messwerten. Bei höherer Luftfeuchtigkeit steigen Rotordrehzahl sowie Inertgasmenge und umgekehrt. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da über die Oberfläche der Schmelze mehr Wasserstoff erneut in Lösung gehen kann. Unter den gewählten Bedingungen findet SMARTT mögliche Lösungen für Umgebungsbedingungen bis 75 % relative Luftfeuchtigkeit und 28 °C Lufttemperatur. Für höhere Luftfeuchtigkeit kann das Ziel von 0,08 ml Wasserstoff pro 100 g Aluminium nicht erreicht werden, da die Wiederaufnahme an der turbulenten Oberfläche überwiegt.

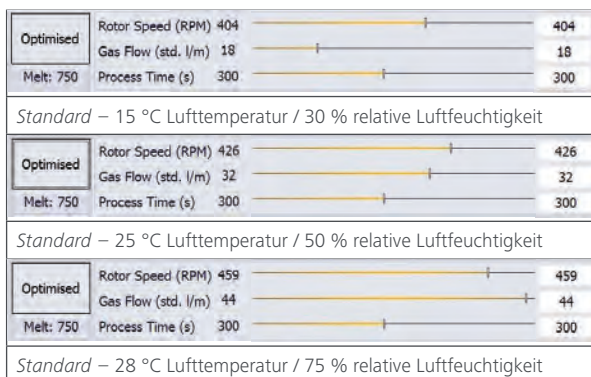


Tabelle 4: Behandlungsparameter für unterschiedliche Umgebungsbedingungen

3. Schmelztemperatur

Aluminium löst bei höheren Schmelztemperaturen mehr Wasserstoff, und die Wiederaufnahme über die Oberfläche während einer Entgasung geht zusätzlich schneller vonstatten. Die Entgasung findet mit höheren Drehzahlen und Inertgasmengen statt, um bei steigenden Temperaturen das Ziel zu erreichen. SMARTT findet zum Beispiel geeignete Parameter im Arbeitsbereich des Rotors für eine Temperatur bis 780 °C; bei 800 °C dominiert die Wiederaufnahme an der Oberfläche und es kann keine logische Lösung vorgeschlagen werden (Tabelle 5).

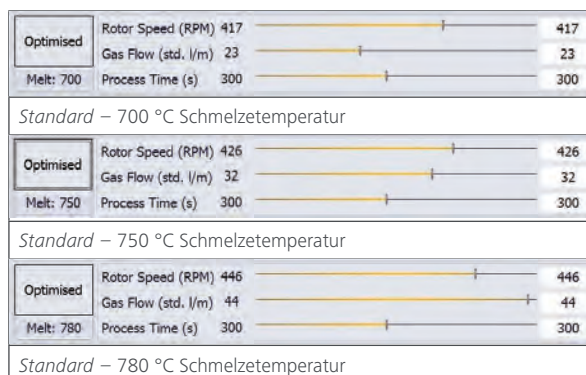


Tabelle 5: Behandlungsparameter für unterschiedliche Schmelztemperaturen

4. Datenaufzeichnung

SMARTT beinhaltet ein Modul, das alle Behandlungsparameter als Funktion der Zeit protokolliert. Dabei werden sowohl die vordefinierten als auch die durch SMARTT optimierten Soll- und Ist-Werte gespeichert. Diese sehr komfortable Methode ersetzt externe Softwarelösungen, welche auf separaten Computern mit externen Softwarepaketen laufen. Die Daten können problemlos in ein Officeformat transferiert und dann wie gewohnt ausgewertet werden.

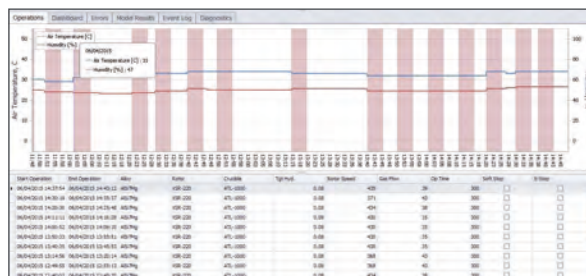


Abbildung 8: Datenaufzeichnung

Zusammenfassung

- Gussteile benötigen Schmelze mit konstantem Wasserstoffgehalt.
- Schwankende Ausgangswerte bei der Schmelzequalität machen es oft unmöglich, das Ziel auf kostengünstige Art und Weise zu erreichen.
- Schmelzereien kompensieren diesen Effekt durch deutlich zu lange Behandlungszeiten, was sowohl Behandlungsgas als auch Grafitverschleißteile vergeudet.
- SMARTT bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche zur Eingabe und Verwaltung von Behandlungsparametern.
- Die innovative Steuerungssoftware schlägt die besten Parameter vor unter Beachtung von Umgebungsbedingungen und Kundenvorgaben.
- SMARTT spart Inertgas oder verlängert die Lebensdauer der Schäfte und Rotoren.
- SMARTT protokolliert alle Behandlungsparameter.
- Diese innovative Software ist bestens geeignet für Gießereien mit großen Schmelzemengen und unterschiedlichen Gussteilen mit gleichen oder ähnlichen Qualitätsanforderungen.