



**Gemeinsamer Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben
Werkstoffliche Grundlagenuntersuchungen für den Einsatz von regenerati-
vem Wasserstoff bei der Herstellung von Sekundäraluminium
(Akronym: H2-Alu)**

Projektlaufzeit: 01.10.2022 – 30.06.2024

Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes des GWI:
Reaktionskinetische Berechnungen und Durchführung der Schmelzversuche
01LJ2106A

Titel des Teilprojektes von HMT:
**Grundlagen und Randbedingungen für H2-Anreicherung in einem Alu-
Schmelzofen**
01LJ2106B

Titel des Teilprojektes von OVGU:
Gießtechnologische Laboruntersuchungen und Entwicklung
eines Simulations-Moduls
01LJ2106C

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**



DLR Projektträger

Stand der aktuellen Version: 25.02.2025

Autoren:

Eugen Koslowski, Anne Giese

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

...

HMT Höfer Metall Technik GmbH & Co KG

Chris Michelis, Prof. Matthias Hackert-Oschätzchen

Otto-von-Guericke Universität

Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **01LJ2106 A - C** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen/bei den Autoren.

Projektpartner

1. Projektpartner (Koordinierende Forschungsstelle)

Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)

Hafenstraße 101

45356 Essen

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Anne Giese

T: +49 (0) 201 3618 - 257

E: anne.giese@gwi-essen.de

2. Projektpartner

HMT Höfer Metall Technik GmbH & Co KG

Gewerbering 32

06333 Hettstedt

Ansprechpartner:

Christian Schwarz

T: +49 34 76 86 96 146

E: C.Schwarz@hmt-alu.de

3. Projektpartner

Otto-von-Guericke Universität

Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung

Bereich Ur- und Umformtechnik

Universitätsplatz 2

39112 Magdeburg

Ansprechpartner:

Univ.-Prof. Matthias Hackert-Oschätzchen

T: +49 (0) 391 67-58568

E: matthias.hackert-oschaetzchen@ovgu.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Ausgangssituation und Hintergründe	6
3	Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse	11
3.1	Zusammenarbeit im Verbund	12
3.2	Reaktionskinetische Berechnungen	14
3.3	Numerische Abbildung des Gießprozesses	18
3.3.1	Industrielle Randbedingungen (Fa. HMT)	19
3.3.2	Basismodell für die CFD-Simulation	23
3.3.3	Ansätze zur Abbildung des Wasserstoffeinflusses	25
3.4	Anlagentechnik und Analytik	26
3.4.1	Wasserstoffmessung	26
3.4.2	Messmittel zur Abgasanalyse	27
3.4.3	Ermittlung der Porosität.....	31
3.4.4	Mechanische Kennwerte.....	34
3.4.5	Chemische Analyse.....	35
3.5	Experimente im Labormaßstab	35
3.5.1	Experimente Laborofen und Tiegel	35
3.5.2	Experimente mit entwickelter Schmelzwanne	42
3.5.3	Langzeitexperimente	49
3.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	55
3.6	Abbildung des Wasserstoffeinflusses mittels Simulationsmodul	55
3.7	Gegenmaßnahmen der Wasserstoffaufnahme.....	56
3.8	CO ₂ Einsparpotentiale	60
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit in Hinsicht auf den zahlenmäßigen Nachweis.....	64
5	Fortschreibung des Verwertungsplans	65
6	Ergebnisse von dritter Seite (Literatur etc.)	66
7	Literatur	67

1 Zusammenfassung

Der Erfolg der Energiewende ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Lang- und mittelfristige Ansätze zur Dekarbonisierung verschiedener energieintensiver Sektoren wie z. B. der Thermoprozessindustrie sehen den vermehrten Einsatz regenerativer Energieträger wie grünen Strom und Wasserstoff vor. Zur Erreichung der Klimaziele bedarf es jedoch auch kurzfristiger und direkt verfügbarer Lösungsansätze, um den Umgang mit derzeitig und zukünftig bereitgestellten Ressourcen möglichst effizient zu gestalten.

Die Verwendung von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoffgemischen als Brenngas in der Aluminiumverarbeitung stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Effizienz und Nachhaltigkeit dieses Prozesses zu verbessern. Der Prozess des Aluminiumschmelzens ist jedoch bekanntlich energieintensiv, da er hohe Temperaturen erfordert, um das Metall in seinen flüssigen Zustand zu überführen. Traditionelle Schmelzmethoden, die auf fossilen Brennstoffen basieren, tragen zur Emission von Treibhausgasen und anderen Umweltbelastungen bei. In diesem Kontext gewinnt Wasserstoff als alternatives Brenngas, speziell wenn der Wasserstoff mittels erneuerbarer Energieträger hergestellt und als „grüner“ Wasserstoff bezeichnet wird, zunehmend an Bedeutung. Der entscheidende Vorteil von Wasserstoff liegt in seinem hohen massebezogenen Energiegehalt und seiner sauberen Verbrennung, die im Vergleich zu fossilen Brennstoffen weniger schädliche Emissionen erzeugt. Darüber hinaus bietet Wasserstoff die Möglichkeit, erneuerbare Energiequellen (Wind und Sonne) effizient zu speichern und in industriellen Prozessen einzusetzen, was ihn zu einem Schlüsselement in der Energiewende macht.

Unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen und Forschungsprojekte zum Einsatz von Wasserstoff beim Schmelzen von Aluminiumlegierungen wurden Experimente im Labormaßstab durchgeführt. Welche ergründen sollten, wie Wasserstoff bzw. Brenngasprodukte mit Wasserstoff- bzw. erhöhten Wasserdampfanteil sich auf schmelzflüssiges Aluminium auswirken, um letztendlich ein umfassendes Verständnis über den Mechanismus zu erhalten und allgemeingültige Aussagen ableiten zu können, welche zur Entwicklung eines Softwaretools herangezogen werden können.

Wasserstoff als Brenngas hat laut Dichteindexmessung und direkter Wasserstoffmessung **keinen nachweisbaren Einfluss** auf den Wasserstoffgehalt **in der Schmelze**. Selbst längere Haltezeiten führen nicht zu einer Veränderung der Schmelzequalität. Sowohl die Porosität in 2D als auch in 3D wird nicht vom Wasserstoff beeinflusst. Des Weiteren zeigen die Festigkeitskennwerte keine Änderung, was darauf hinweist, dass Wasserstoff als Brenngas keine signifikanten Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Aluminiumlegierung (EN-AW 6060) hat. Durchgeführte Langzeitversuche bei wasserstoffhaltiger Atmosphäre durch Verbrennung von bis zu 100 % Wasserstoff und Haltezeiten von mehreren Stunden zeigen gleiche Ergebnisse bzw. keine Zunahme des Wasserstoffgehaltes in der Aluminiumschmelze.

2 Ausgangssituation und Hintergründe

Die Aluminiumnachfrage weltweit ist weiterhin steigend und erreichte im Jahr 2018 69,3 Millionen Tonnen [1]. Das ist ein Plus von gut 3 % gegenüber dem Vorjahr. Die aktuelle Abnahme der Nachfrage in Deutschland spiegelt nicht die weltweiten Entwicklungen wider. Die ausgesprochen guten Materialeigenschaften (wie gute elektrische Leitfähigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, geringes Gewicht, Witterungsbeständigkeit und eine auf das Gewicht bezogene hervorragende Festigkeit) machen Aluminium zu einem unverzichtbaren und zukunftsorientierten Material mit zahllosen Einsatzgebieten, wie der Verkehrs- (Automobil, Zug, Flugzeug, ...) und der Verpackungsindustrie (Lebensmittel, Medizin, Kosmetik, ...) sowie dem Bauwesen und dem klassischen Maschinenbau. Aluminium besitzt gegenüber vielen anderen Produkten den Vorteil, dass es beliebig oft recycelt werden kann, ohne einen nennenswerten Qualitätsverlust zu verzeichnen. Mehr als die Hälfte des benötigten Aluminiumbedarfs wird durch das Recycling von sogenanntem Sekundäraluminium (Schrott) gedeckt. Das Einschmelzen und Wiederaufbereiten von recyceltem Aluminium benötigt nur rund 5 % des Energieeinsatzes, den die Herstellung von Primäraluminium aus Bauxit erfordert **Abbildung 2-1** [2], [3].

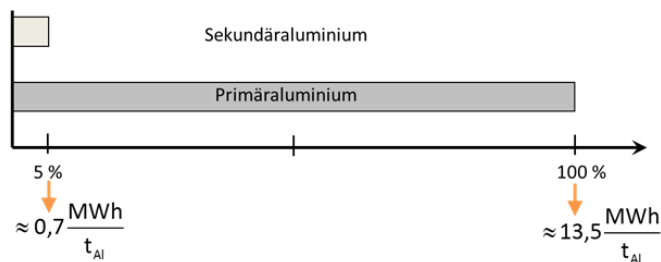


Abbildung 2-1: Energiebedarf bei der Herstellung von Primär- und Sekundäraluminium [2, 3]

Die Herstellung von Sekundäraluminium ist trotz der schon umgesetzten Maßnahmen (Luftvorwärmung, Oxy-Fuel, moderne MSR-Technik, usw.) ein energieintensiver Prozess. Im Jahr 2015 wurden in Deutschland beispielsweise etwa 1,9 TWh für die Herstellung aufgewendet, wobei hiervon 83 % des Energiebedarfs aus fossilen Brennstoffen mit einem Erdgasanteil von gut 93 % gedeckt wurden (siehe **Abbildung 2-2**). Dies führte zu einer Emission von 0,93 t CO₂Äq/t_{Al} und damit bei einer Produktionsmenge von 620 kt Sekundäraluminium zu 0,58 Mio. t CO₂ Äquivalent pro Jahr [3].

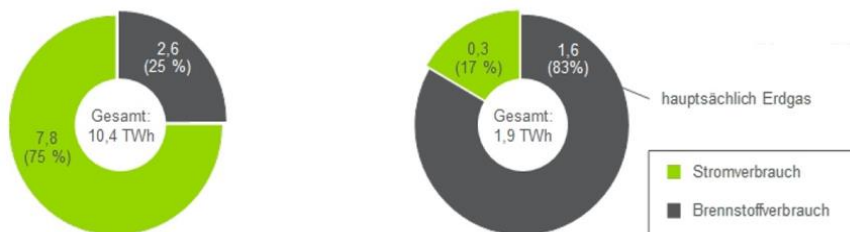


Abbildung 2-2: Absoluter Energieverbrauch der Primär- (links) und Sekundäraluminiumherstellung (rechts) aufgeteilt nach Strom- und Brennstoffverbrauch für das Jahr 2015 [3]

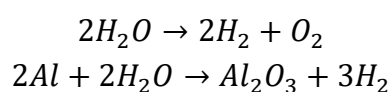
Die CO₂-Reduktion soll bis zum Jahr 2050 95 % betragen. Dies sind die Ziele der Bundesregierung und der EU und können durch verschiedene Maßnahmen z. B. dem Einsatz von grünem

Strom, Steigerung der Energieeffizienz oder den Einsatz von regenerativen, CO₂-neutralen Brennstoffen (z. B. durch die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung [11]) erreicht werden. Vollelektrische Aluminiumschmelzwannen, die sogenannten Induktionsöfen in Sekundärschmelzwerken, werden jedoch aufgrund der hohen Investitionskosten, insbesondere für die elektrischen Nebenausrüstungen sowie den Anforderungen nach sauberen, praktisch oxidfreien Schrotten (die eigentlich nur als Produktionsabfälle anfallen) nur vereinzelt eingesetzt.

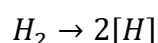
Aktuell wird recyceltes Aluminium in verschiedenen Arten von Schmelzöfen meist in Gießereien behandelt. Hierbei werden diskontinuierlich arbeitende Tiegel- und Wannen-/Herdöfen sowie Drehtrommelöfen, oder kontinuierlich arbeitende Doppelkammer- oder Schachtofen unterschieden. Die höchsten Schmelzleistungen (von bis zu 25 t_{Al}/h) werden mit Herdöfen erreicht. Die Drehtrommel- und Schachtofen sind üblicherweise mit sogenannten Kaltluftbrennern ausgestattet. In den Herdöfen werden neben Kaltluftbrennern auch Brenner mit rekuperativer (max. 650 °C) oder regenerativer Luftvorwärmung (max. 1.000 °C) eingesetzt, um Energie einzusparen. Weitere Informationen sind in [4] – [8] enthalten.

Das Schmelzen von Aluminium hat eine Besonderheit, die während der Fahrweise der Anlagen berücksichtigt werden muss. Die Schmelztemperatur von Aluminium liegt bei ca. 660 °C, was relativ niedrig ist. Kommt es zu einer Überhitzung von festem oder flüssigem Aluminium bei gleichzeitigem Vorliegen von Sauerstoff (z. B. wenn die Flamme mit hoher Geschwindigkeit auf das Aluminiumbad trifft), bildet sich die sogenannte „Krätze“. Krätze ist eine Mischung aus den vor und während des Schmelzprozesses gebildeten Metall-Oxiden sowie Aluminium. Das Aluminium liegt in Form feiner Tropfen vor, die vollständig von Oxidhäuten umhüllt sind. Da Oxidhäute durch eine relativ große Zerreißfestigkeit gekennzeichnet sind, können sie mehr als das 20-fache ihres Gewichts an Aluminium zurückhalten. Damit ist Erstens ein sehr hoher Verlust an Aluminium verbunden, der durch sehr aufwändige und teure Nachbehandlungsschritte nur teilweise (ca. 68 % des enthaltenen Aluminiums) wiedergewonnen werden kann [4]. Zweitens behindert die Krätzeschicht auf dem Aluminiumbad die Wärmeübertragung von der Flamme bzw. dem Ofenraum in die Schmelze. Allgemein kann festgehalten werden: Eine Reduktion der Umschmelzverluste z. B. durch Krätzebildung um 1 % entspricht dem finanziellen Gegenwert des gesamten Energieeintrages zum Schmelzen des entsprechenden Sekundäraluminiums [2].

Aluminiumschmelzen weisen eine sehr hohe Affinität zu Wasserstoff auf. Die Aluminiumschmelze absorbiert den Wasserstoff bspw. aus der Atmosphäre nachstehender Reaktionsgleichung folgend, bei der zudem als Nebenprodukt Aluminiumoxid entsteht, das letztlich als qualitätsmindernder Fremdstoff in der Schmelze vorliegt:



Der zweiatomige Wasserstoff löst sich in Aluminium in Form von:



Die Problematik des in der Schmelze gelösten Wasserstoffes offenbart sich während der Erstarrung der Aluminiumschmelze. Wie **Abbildung 2-3** zu entnehmen ist, sinkt mit Unterschreiten der Schmelztemperatur die Löslichkeit des Wasserstoffes in der Al-Schmelze schlagartig, sodass der Wasserstoff sich im Gussteil als gemeinhin festigkeitsbeeinträchtigend erachtete Gasporosität niederschlägt. Feuchte Schrotte begünstigen diesen Prozess.

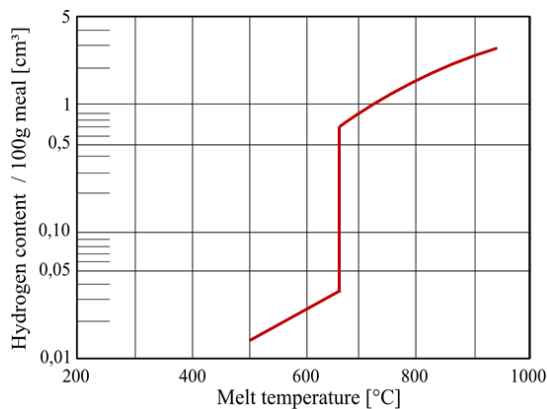


Abbildung 2-3: Löslichkeitssprung von in der Schmelze enthaltenem Wasserstoff während der Erstarrung von Aluminium

Deshalb werden die eingesetzten Schrotte optimalerweise im Vorfeld getrocknet, mindestens aber möglichst trocken gelagert oder vor dem Einschmelzprozess so lange als möglich in Ofen-nähe abgetrocknet. Wasser in Kombination mit flüssigem Aluminium führt zu einer fast explosionsartigen Reaktion, daher wird das Vorhandensein von wasserdampfhaltigen Atmosphären im Schrott nach Möglichkeit vermieden.

Auch bei der Verbrennung von Erdgas entsteht Wasserdampf als Reaktionsprodukt. Der Unterschied zum zugemischten bis hin zum vollständigen Einsatz von Wasserstoff besteht zum einen in der Reduzierung des zweiten Reaktionsproduktes CO_2 , was ein Ziel des Vorhabens ist. An die Stelle des CO_2 's tritt nun noch mehr Wasserdampf.

Konkret heißt das, dass der Einsatz von Wasserstoff als Brenngas mit einem neuen Mengenausmaß an Wasserdampf als Verbrennungsprodukt einhergeht, das durch die etablierten Prozesse so nicht vorgesehen ist. Aluminium neigt zu Aufnahme von Wasserstoff aus der Atmosphäre. Der in der Schmelze enthaltene Wasserstoff bedingt während der Erstarrung die Bildung von Wasserstoff-/Gasporosität (**Abbildung 2-4**), die die Gussteilqualität sowohl mechanisch wie auch in Hinblick auf Dichtheit und Optik beeinträchtigt.

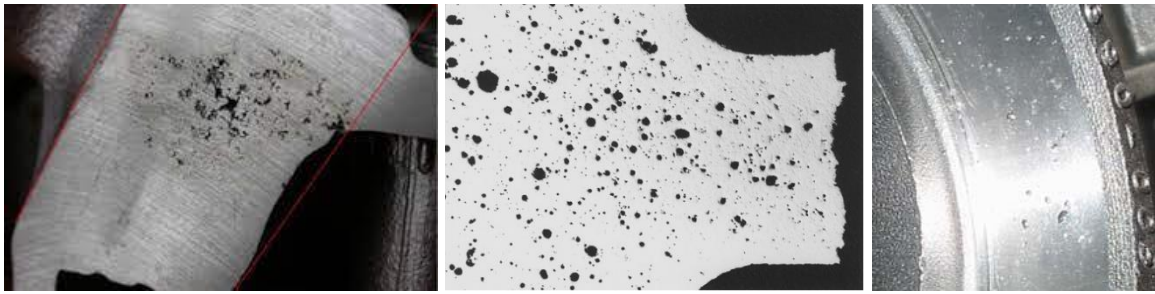


Abbildung 2-4: Festgestellte Wasserstoffporosität als Qualitätsmängel an und in Aluminiumgussteilen. Links und Mitte: Schliffbild; Rechts: wasserstoffporositätsbedingte Oberflächendefekte

Zudem entsteht bei der Absorption von Wasserstoff durch die Aluminiumschmelze als weiteres Produkt Aluminiumoxid (Krätze), das sich auf der Schmelzbadoberfläche bildet. Höhere Mengen Wasserdampf in der Atmosphäre gehen somit nicht nur mit der realen Gefahr einer höheren Wasserstoffabsorption einher, sondern auch mit der Gefahr höherer Oxidbildung, die wiederum mit Material- und Energieverlusten der reinen Schmelze verbunden ist, da die Krätze vor dem Abgießen von der Oberfläche abgezogen werden muss. Zudem handelt es sich bei Aluminiumoxid, besser bekannt als Korund, um im Vergleich zu Aluminium sehr feste und kantige Phasen (**Abbildung 2-5**), die im Gefüge Kerbwirkungen hervorrufen und somit ein frühzeitiges Werkstoffversagen verursachen können, was insbesondere bei sicherheitsrelevanten Gussteilen problematisch ist. Die Bildung von Oxiden im Aluminium sind daher nach Möglichkeit zu vermeiden.

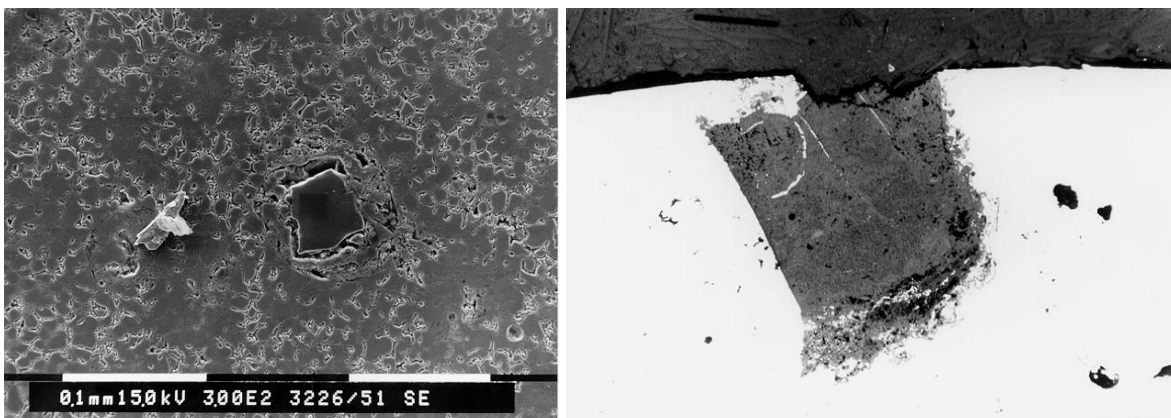


Abbildung 2-5: Unerwünschte Oxidphasen als Produkt der Reaktion zwischen Aluminium und in der Atmosphäre enthaltenen Wasser

Auf Basis bisheriger Recherche gibt es derzeit noch keine verbindlichen Aussagen über die Auswirkungen von Wasserstoff angereicherten Brennstoffen bei Verwendung zum Einschmelzen von Aluminium. Ebenso gibt es bisher keine Aussagen, wie sich eine Sauerstoffanreicherung auf die Luftvorwärmung auswirkt bzw. welche energetischen Vorteile sich aus der Kombination H_2 -Zumischung und O_2 -Anreicherung ergeben, oder welche Nachteile es bewirkt. Ferner sind, soweit bisher bekannt, auch noch keine Untersuchungen mit unterschiedlichen An-

reicherungsgraden gemacht worden, erst recht gibt es keine Erfahrungen mit Daueranwendungen/Langzeitauswirkungen (z. B. auf feuerfeste Auskleidung etc.). Es soll der optimale Einsatzbereich herausgefunden werden, daher sind im ersten Schritt die theoretischen Grundlagen mittels Feldmessungen und Simulation erforderlich, um eine Definition von ersten Randbedingungen zu ermitteln, bevor eine Umsetzung in der realen Produktionsanwendung erfolgt. Auf Grund der vielen Unbekannten ist eine grundlegende Untersuchung, theoretisch und praktisch, erforderlich.

3 Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse

Die Aluminiumproduktion ist mit einem hohen Energieaufwand und erheblichen CO₂-Emissionen verbunden, die einen bedeutenden Beitrag zum anthropogenen Klimawandel leisten. In diesem Zusammenhang gewinnt der Einsatz von Wasserstoff entlang der Aluminiumprozesskette (siehe **Abbildung 3-1**) zunehmend an Bedeutung als vielversprechende Strategie zur Dekarbonisierung der Industrie. Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger und Reduktionsmittel bietet nicht nur die Möglichkeit, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen zu reduzieren, sondern verspricht auch eine Steigerung der Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit der Aluminiumproduktion.

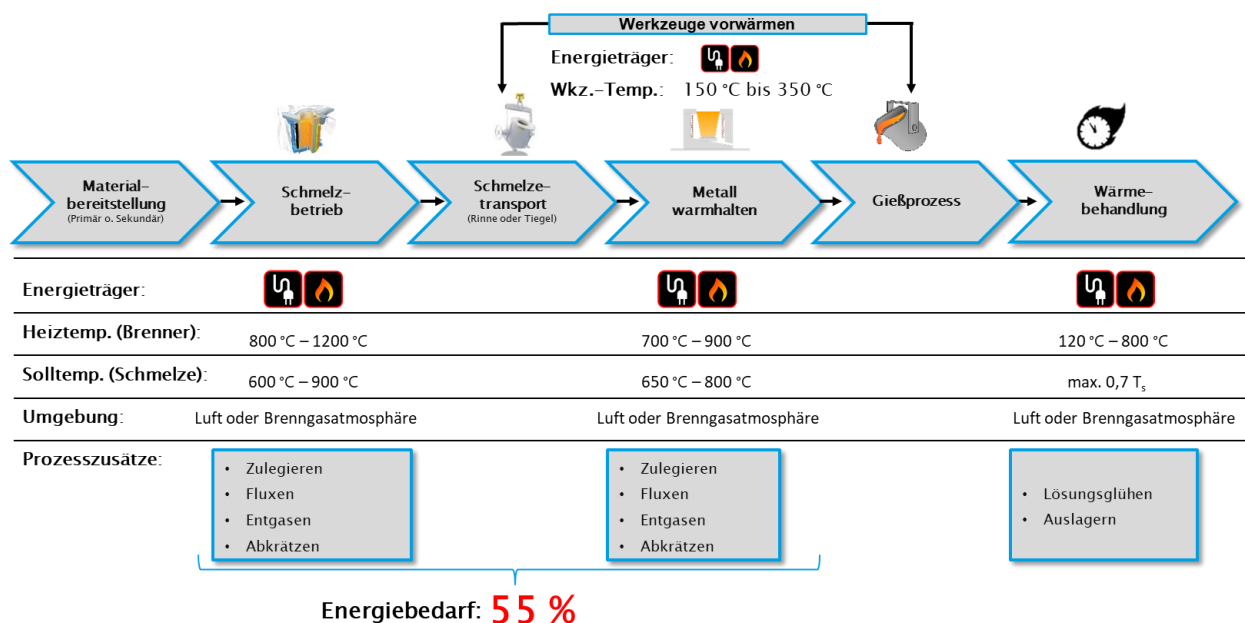


Abbildung 3-1: schematische Darstellung der Fertigungskette in einer Aluminiumgießerei

Die Verbrennung von Wasserstoff, insbesondere bei der Zumischung von Sauerstoff, führt zu einer erhöhten Wasserdampfkonzentration im Abgas im Vergleich zur Verbrennung von Erdgas, vgl. **Abbildung 3-2**. Dies liegt daran, dass Wasserstoff als sauberer Brennstoff eine vollständige Verbrennung zu Wasser ermöglicht, was zu einer hohen Freisetzung von Wasserdampf führt. Bei der Zugabe von Sauerstoff als Oxidationsmittel zur Verbrennung von Wasserstoff wird der Verbrennungsprozess weiter intensiviert, wodurch die Wasserdampfkonzentration im Abgas zusätzlich erhöht wird. Diese erhöhte Wasserdampfkonzentration kann potenziell Auswirkungen auf die Umwelt haben und muss daher bei der Planung und Optimierung von Verbrennungsprozessen berücksichtigt werden, um eine nachhaltige und umweltverträgliche Energieerzeugung zu gewährleisten. Da Aluminium im schmelzflüssigen Zustand eine Affinität aufweist, den in der Brenngasatmosphäre enthaltenen Wasserstoff in sich zu lösen, und bei der Erstarrung wieder auszuscheiden, ist bisher unklar inwieweit das Aluminiumerzeugnis dadurch beeinflusst wird. Insbesondere gasbedingte Porosität könnte vermehrt entstehen und die Gussqualität signifikant beeinflussen.

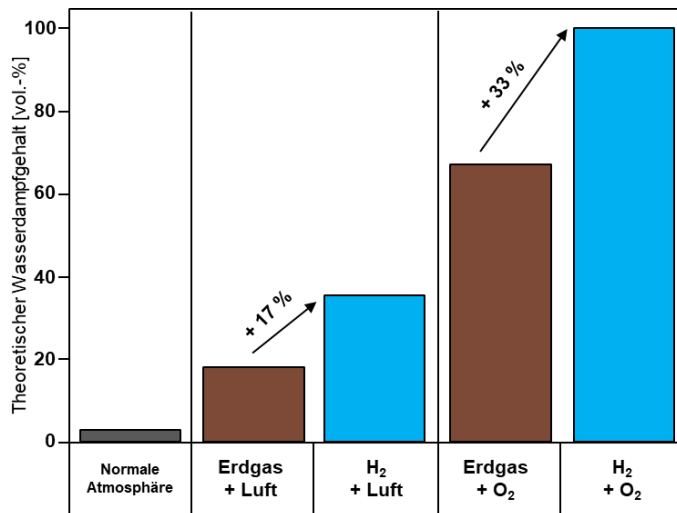


Abbildung 3-2: theoretischer Wasserdampfgehalt im Abgas in Abhängigkeit der Brenngaszusammensetzung nach [13]

Zur Charakterisierung der resultierenden Schmelzmechanismen bei der Zugabe von Wasserstoff zum Brenngas (Erdgas) bzw. bei der gänzlichen Substitution von Erdgas durch Wasserstoff spielen Grundlagenversuche eine entscheidende Rolle, siehe **Abbildung 3-3**. Insbesondere der Unterscheid zwischen dem Schmelzen von Aluminium mittels Erdgas- oder Wasserstoffeinsatzes und die sich ergebenden Nebeneffekte sind bisher gänzlich ungeklärt.

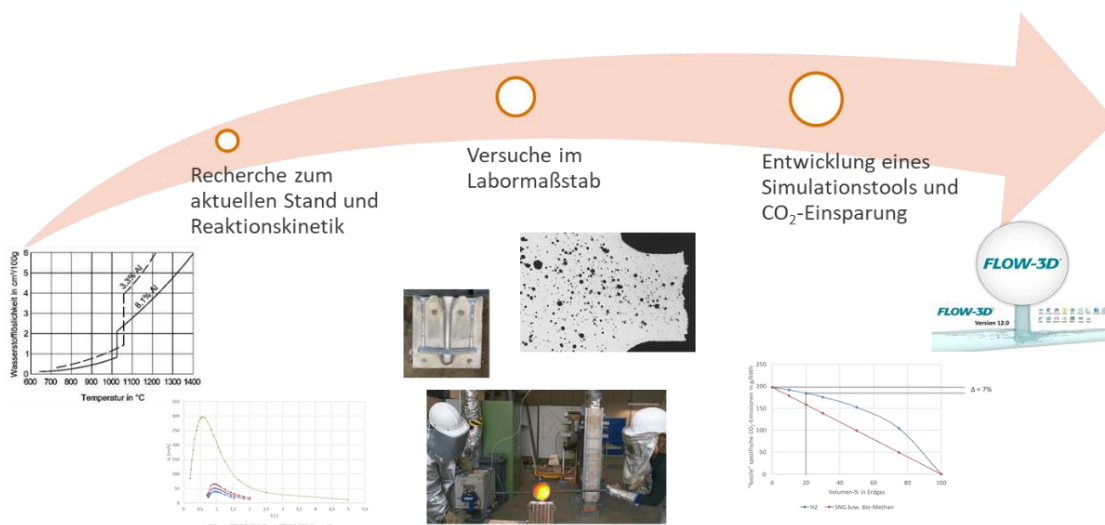


Abbildung 3-3: Vorgehensweise zur Untersuchung des H₂-Einflusses beim Schmelzen von Sekundäraluminium

3.1 Zusammenarbeit im Verbund

Im Rahmen des Projektes haben die Verbundpartner GWI, HMT und OvGU die nachfolgenden Arbeiten mit den jeweiligen Schwerpunkten gemeinschaftlich bearbeitet:

GWI:

- Koordination des Projektes und Zusammenführung der Arbeiten, Überwachung des Zeit- und Arbeitsplans

- Reaktionskinetische Berechnungen verschiedener Erdgas-Wasserstoff-Gemische mit den Oxidatoren Luft und Sauerstoff (0 - 100 % Zumischung) auf Basis der Daten aus Essen und Magdeburg
- Durchführung verschiedener Schmelz- und Wärmebehandlungsversuche unter definierten, unterschiedlichen Randbedingungen
- Analyse der H₂- und O₂-Nutzung entlang der Aluminium-Prozesskette (allgemein)
- theoretisches CO₂-Einsparpotenzial für die gesamte Aluminiumindustrie, Wirkungsgrade verschiedener H₂-Bereitstellungsmöglichkeiten

HMT:

- theoretische Potentiale der H₂- und O₂-Zumischung entlang der Prozesskette der Sekundäraluminiumherstellung
- theoretische Vorbetrachtungen der zu erwartenden Auswirkungen der H₂- und O₂-Zumischung auf die Aluminiumschmelze, Definition von konkreten und typischen Qualitätsanforderungen und -kriterien
- Unterstützung bei den geplanten Untersuchungen (Material für Schmelzversuche bei OvGU und GWI)
- Optimierung des Schmelzprozesses (Ableitung aus den Tiegelversuchen) und damit Design und Engineering der neuen Schmelzwanne in Anlehnung an reale Ofenverhältnisse (insbesondere für die Abgasführung über der Schmelze, Kontaktbereich von Flamme/Abgas mit der Schmelze)
- Probengestellung und Zugriff auf die Prozesskette bis zum Endprodukt, Versuchsproben zur Analyse
- Mitwirkung bei der Festlegung typischer Versuchs- und Betriebsparameter
- Begleitung der Versuche
- Untersuchung einer potenziell notwendigen metallurgischen Behandlung an Hand einer Machbarkeitsstudie für die Integration einer Behandlungsbox (Entgaser) in das System bei HMT
- Bestimmung der theoretischen CO₂-Minderung in der Sekundäraluminiumindustrie und Dokumentation der Ergebnisse

Der **OvGU** oblag im Rahmen des Projektes konkret die labortechnische Untersuchung und Auswertung der Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen, in der Atmosphäre vorhandenen Wasserstoffgehalten (meist gebunden in Form von Wasserdampf) und der Schmelzqualität.

Weitere Arbeitsschwerpunkte:

- Durchführung verschiedener detaillierter Schmelz- und Wärmebehandlungsversuche unter definierten, unterschiedlichen Randbedingungen sowohl am GWI als auch an der OvGU
- Analyse der H₂- und O₂-Nutzung entlang der gesamten Aluminium-Prozesskette

- Analyse und Bewertung hinsichtlich Auswirkungen auf die Produktqualität von der Schmelze bis hin zu den fertigen Produkten (einschließlich Wärmebehandlung)
- Aufbau einer Basissimulation des Gießverfahrens „direct chill casting“ unter Berücksichtigung der industriellen Randbedingungen beim Forschungspartner HMT
- Untersuchung zur simulativen Abbildbarkeit des ermittelten Wasserstoffeinflusses auf die Aluminiumschmelze, insbesondere deren gießtechnologische, metallographische sowie die sich ergebenden mechanischen Eigenschaften

Die Zusammenarbeit und Aufgabenteilung der beteiligten Partner ist in der **Abbildung 3-4** dargestellt.

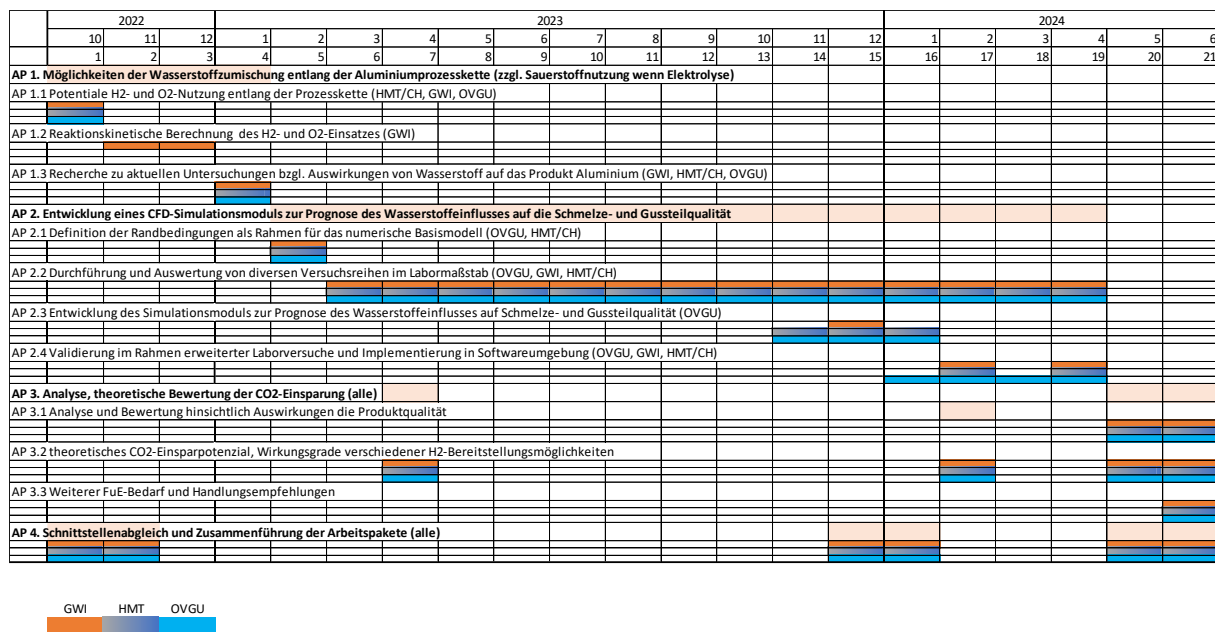


Abbildung 3-4: Arbeitsplan zum Forschungsvorhaben

3.2 Reaktionskinetische Berechnungen

Die Wasserstoffzumischung zum Erdgas hat insbesondere bei hohen H₂-Anteilen einen beachtlichen Einfluss auf die Beschaffenheit der Verbrennungsabgase. Durch den Ersatz von Kohlenwasserstoffen des Erdgases mit reinem Wasserstoff kommt es bei technischen Feuerungen unter ansonsten gleichen Bedingungen zwangsläufig zu einem Rückgang der kohlenstoffhaltigen Abgasbestandteile. Gleichzeitig steigt der Wasserdampfanteil. **Abbildung 3-5** zeigt die Zusammenhänge für einen allgemeinen Verbrennungsprozess mit einer Luftzahl von 1 ohne Anlagenbezug.

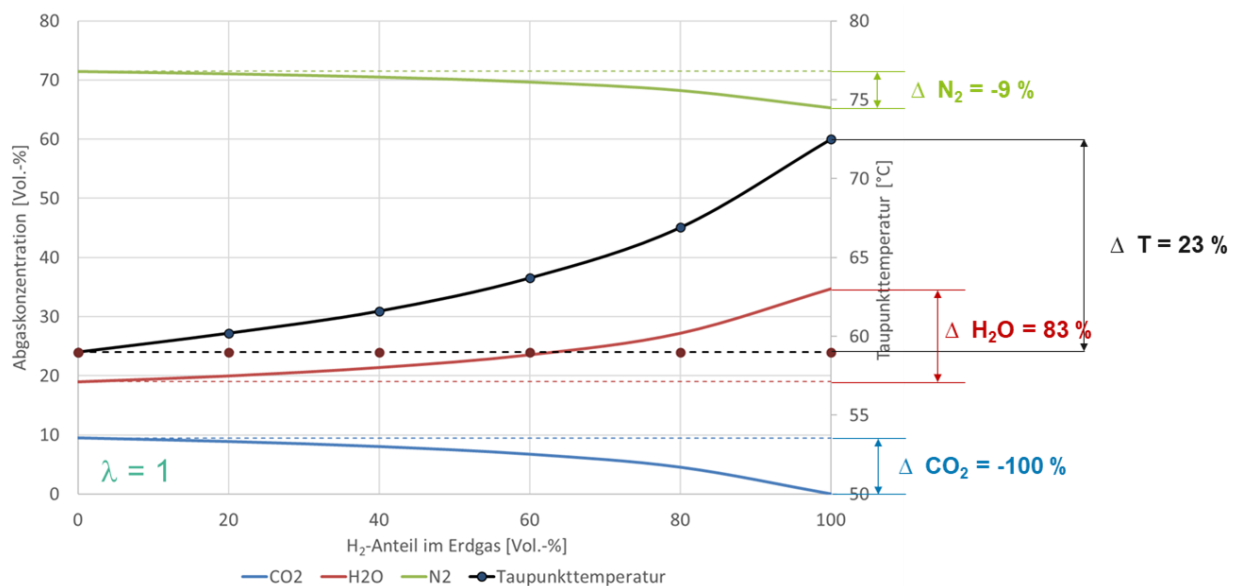


Abbildung 3-5: Abgaskonzentration und Taupunkttemperatur von Erdgas/Wasserstoff-Gemischen für $\lambda=1$ (Quelle: GWI)

Ausgehend von der Feuerung von reinem Erdgas verringert sich der Stickstoffgehalt bei Verwendung von reinem Wasserstoff als Brenngas um etwa 9 %. Dies ist auf den geringeren Verbrennungsluftbedarf des Wasserstoffs zurückzuführen. CO₂ ist in Folge fehlender Kohlenstoffverbindungen nicht mehr vorhanden. Der Wasserdampfanteil erhöht sich um ca. 83 %, wobei dies eine Absenkung der Taupunkttemperatur um ungefähr 23 % verursacht. Dieser Umstand ist vor allem für die Auslegung von Kaminanlagen und anderen abgasführenden Bauteilen von Bedeutung.

Für die Stickoxidemissionen können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden, da die NO_x-Bildung bei industriellen Feuerungen stark abhängig von den Prozessbedingungen und der verwendeten Brennertechnik ist.

Nach einer initialen Analyse der Auswirkungen einer Wasserstoffbeimischung auf die Abgaskonzentration und die Emissionen soll in den folgenden Untersuchungen auch die O₂-Anreicherung berücksichtigt werden. Nach einer ersten Analyse der Auswirkungen einer Wasserstoffbeimischung auf die Abgaskonzentration und Emissionen wird in den weiteren Untersuchungen auch die O₂-Anreicherung einbezogen. Für die reaktionskinetischen Berechnungen der Modellszenarien zur O₂-Anreicherung im Oxidator sowie zur Wasserstoffanreicherung wurden unterschiedliche Szenarien untersucht. **Abbildung 3-6** zeigt den Zusammenhang zwischen der äquivalenten Wasserstoffzumischung und der prozentualen CO₂-Einsparung. Für die Modellrechnungen wurden Szenarien mit einer Wasserstoffbeimischung von 50 Vol.-% und 80 Vol.-% betrachtet. Die Wahl des 50 %-Szenarios basiert darauf, dass diese Konzentration den volumetrischen Mittelwert repräsentiert. Bei dieser Zusammensetzung wird eine Sauerstoffanreicherung von 25 Vol.-% erreicht, was theoretisch zu einer CO₂-Reduktion von etwa 20 % führt. Zusätzlich wurde das Szenario mit 80 Vol.-% Wasserstoffbeimischung untersucht,

da hier eine CO₂-Reduktion um 50 % ab einem bestimmten Zeitpunkt realisiert wird. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die angegebenen CO₂-Einsparungen rein volumetrisch berechnet wurden und keine Berücksichtigung der potenziellen Effizienzsteigerungen finden, die durch die zusätzliche Sauerstoffanreicherung erreicht werden könnten.

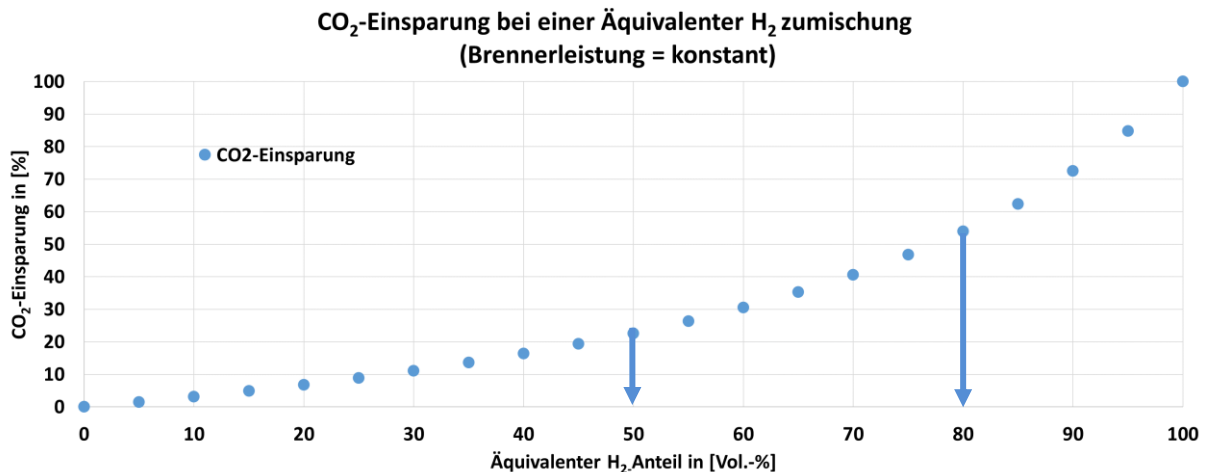


Abbildung 3-6 Einsparung durch H₂-Substitution bei konstanter Brennerleistung (Quelle GWI)

Für eine theoretische Analyse des Einflusses von Wasserstoffbeimischungen und O₂-Anreicherung auf den Verbrennungsprozess, erweist sich die Untersuchung der adiabaten Verbrennungstemperaturen als hilfreich. Die adiabate Verbrennungstemperatur stellt die theoretisch maximale Temperatur dar, die in einem Verbrennungsprozess ohne Verluste erreicht werden kann [14]. In **Abbildung 3-7** sind die adiabaten Flammentemperaturen für drei Modellfälle dargestellt.

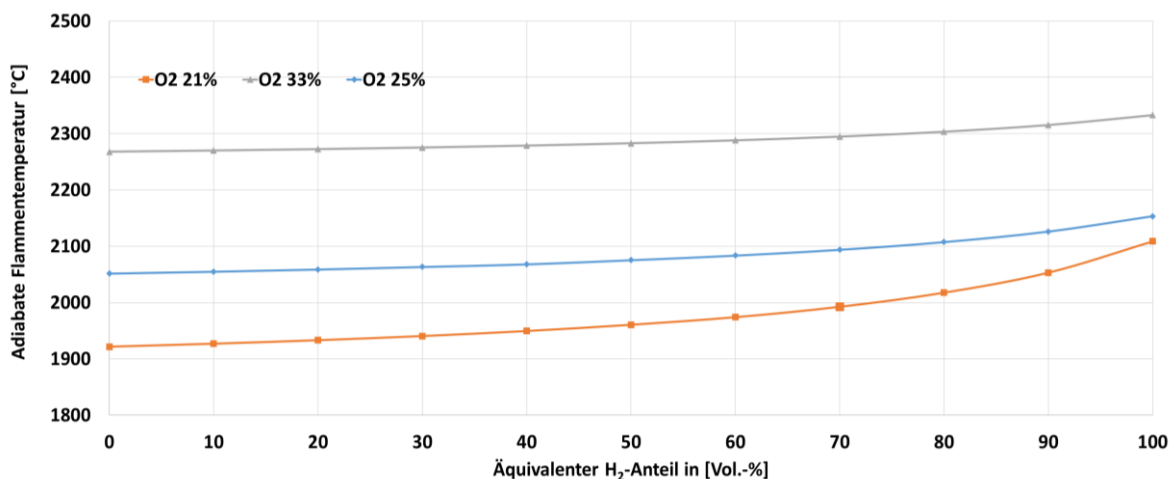


Abbildung 3-7: Einfluss H₂-Substitution, in Kombination mit einer O₂-Anreicherung adiabate Flammentemperatur (Quelle. GWI)

Durch die Substitution von Erdgas durch Wasserstoff und die simultane Anreicherung mit Sauerstoff kommt es im Szenario (50 Vol.-% H₂, 25Vol.-% O₂) zu einer Erhöhung der adiabaten Flammentemperatur um 153 K und im zweiten Modellfall zu einer Steigerung um 385 K. Diese

Zunahme der Temperatur kann potenziell zur Zunahme von thermischen NO_x -Emissionen führen, was bei der Konstruktion berücksichtigt werden sollte. Zudem ist die erhöhte adiabate Flammentemperatur bei der Auswahl und Auslegung des feuerfesten Materials für Ofen und Brenner von Bedeutung.

Die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit s_L ein entscheidender Faktor für die Stabilität und die Morphologie der Flamme. Diese Geschwindigkeit beschreibt, wie schnell sich die Flammenfront durch das unverbrannte Brennstoff-Oxidationsmittel-Gemisch bewegt. Sie wird beeinflusst von der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs und des Oxidationsmittels, der vorherrschenden Temperatur und dem Druck sowie dem Verhältnis von Luftüberschuss[14]. Die **Abbildung 3-8** zeigt, dass es durch die Substitution von Wasserstoff in Kombination mit einer O_2 -Anreicherung einige Herausforderungen für ein bestehendes erdgasbeheiztes System beinhaltet. Die Flammengeschwindigkeit ist im ersten Fall um 50 % höher. Und im zweiten sind es ca. 150 %. Daraus lässt sich schließen, dass man in beiden Fällen eingreifen muss.

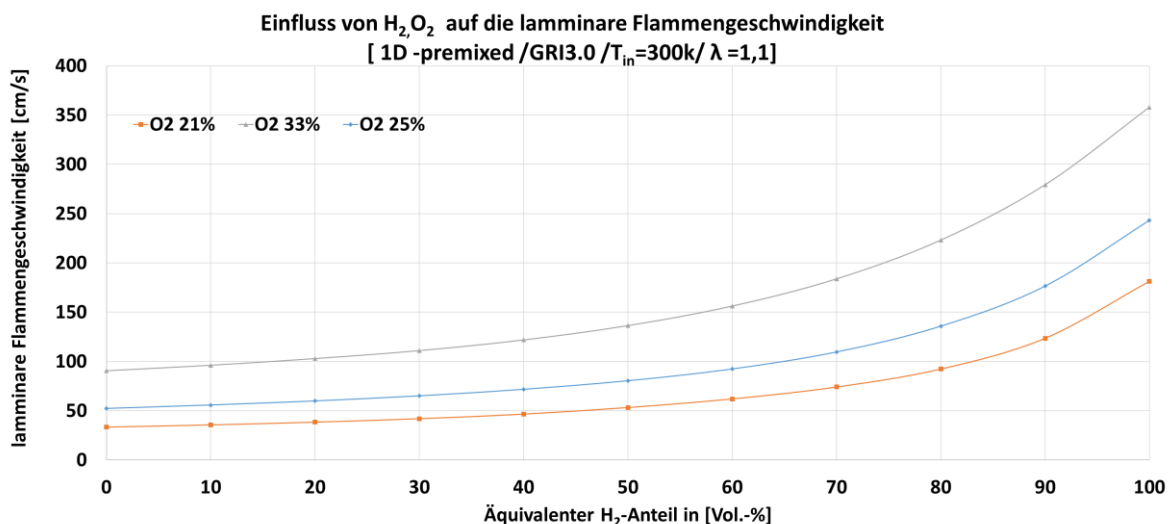


Abbildung 3-8: Einfluss H_2 -Substitution in Kombination mit einer O_2 -Anreicherung auf die laminare Flammengeschwindigkeit (Quelle: GWI)

Die Tendenz, dass sich die Flammenwurzel zu nah am Brennermund stabilisiert, wodurch potenziell Schäden am Brenner entstehen könnten, ist wahrscheinlich und sollte daher sowohl in der Konstruktion als auch im Betrieb berücksichtigt werden.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie und der nutzbaren Wärmeenergie, wobei in diesen Fall nur die Verluste durch Abgase berücksichtigt werden. Die O_2 -Anreicherung verbessert den feuerungstechnischen Wirkungsgrad, da sie die Flammentemperatur erhöht, wie in **Abbildung 3-7** dargestellt, die chemische Reaktionskinetik beschleunigt und Verluste durch überschüssigen Stickstoff reduziert.

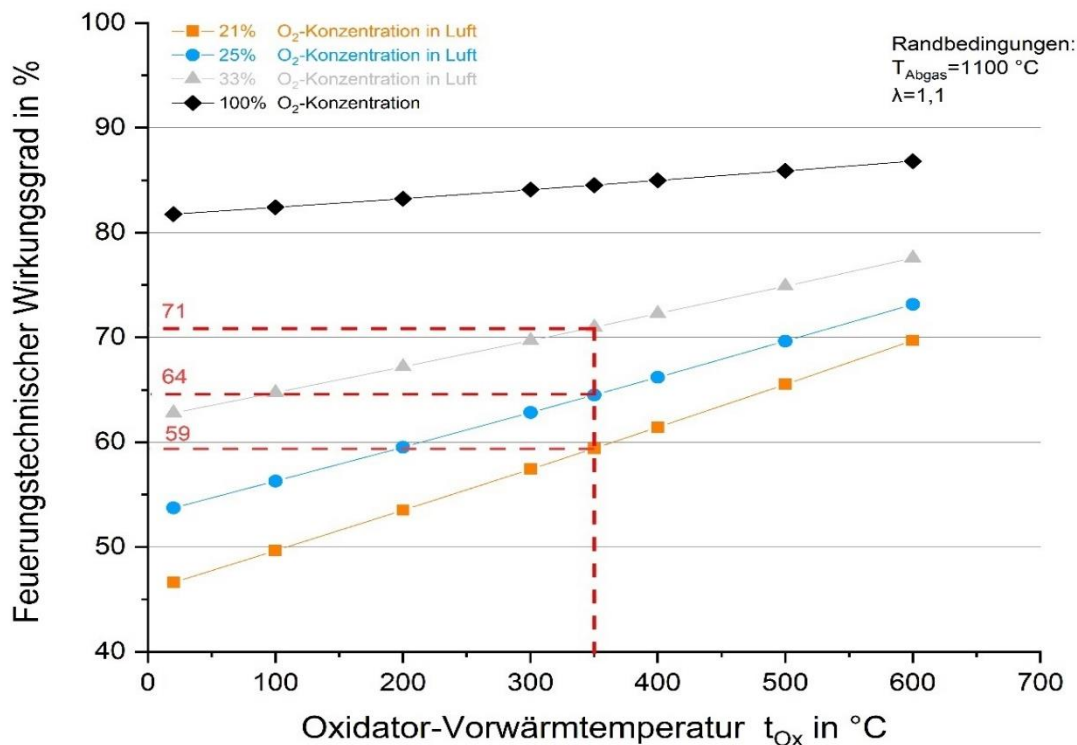


Abbildung 3-9: Einfluss der O₂-Anreicherung der untersuchten Szenarien (25 Vol.-% und 33 Vol.-%) auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad (Quelle GWI)

In **Abbildung 3-9** sind die zuvor beschriebenen Szenarien dargestellt, einschließlich der damit verbundenen Verbesserungen des feuerungstechnischen Wirkungsgrads. Als oberer Referenzwert wurde das Szenario mit 100 % O₂ in das Diagramm aufgenommen. Die höchste Wirkungsgradsteigerung zeigt sich im Szenario mit 33 Vol.-% O₂-Anreicherung. Dabei wird deutlich, dass bei einer zusätzlichen Luftvorwärmung von 350 °C eine Wirkungsgradsteigerung von 12 % erreicht werden kann. Dieser Wert ist vergleichbar mit der Wirkungsgradverbesserung, die durch eine Erhöhung der Luftvorwärmung auf 630 °C erzielt werden könnte.

Die Wasserstoffbeimischung und O₂-Anreicherung beeinflussen Verbrennungsprozesse erheblich. Sie reduzieren CO₂- und Stickstoffanteile im Abgas, erhöhen den Wasserdampfgehalt und senken die Taupunkttemperatur, was Anpassungen an Abgassystemen erfordert. Die Erhöhung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades führt zu einer deutlichen Effizienzverbesserung. Die erhöhte adiabate Flammentemperatur und die höhere laminare Flammgeschwindigkeit führen zu Herausforderungen wie potenziell höhere NO_x-Emissionen und Belastungen des Feuerfestmaterials. Insgesamt bieten die Maßnahmen signifikante CO₂-Einsparungen und Wirkungsgradsteigerungen, erfordern jedoch eine gezielte Prozessoptimierung.

3.3 Numerische Abbildung des Gießprozesses

Die numerische Simulation von Gießprozessen hat sich als unverzichtbares Werkzeug in der metallurgischen Industrie etabliert, um komplexe physikalische Phänomene zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Insbesondere die Abbildung des Direct Chill

Casting (DC Casting) Prozesses bietet die Möglichkeit, entscheidende Parameter wie die Wärmeübertragung, die Strömungsdynamik und die Erstarrung präzise zu modellieren. Dieser Prozess, der häufig zur Herstellung von Aluminiumhalbzeugen wie Barren oder wie im vorliegenden Fall Bolzen verwendet wird, erfordert eine präzise Steuerung der thermischen und mechanischen Bedingungen, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten.

Ein besonderer Fokus liegt in dieser Untersuchung auf dem Einsatz von Wasserstoff als Brenngas im Schmelzprozess, der dem DC Casting vorgelagert ist. Der Einsatz von Wasserstoff bringt sowohl ökologische als auch technologische Herausforderungen und Potenziale mit sich. Wasserstoff, der im Vergleich zu fossilen Brennstoffen wie Erdgas eine emissionsärmere Verbrennung ermöglicht, führt zu einer erhöhten Wasserdampfkonzentration im Abgas, die den Schmelz- und Erstarrungsprozess beeinflussen kann. Diese Faktoren, wie etwa eine mögliche Veränderung der Fließ- und Erstarrungsbedingungen oder der chemischen Zusammensetzung der Schmelze, sollen in der numerischen Abbildung berücksichtigt werden, um den Einfluss von Wasserstoff auf die Gießbedingungen und die Qualität des Endprodukts realistisch zu bewerten.

Im Folgenden wird das für die spätere Ableitung des Wasserstoffeinflusses zugrundeliegende Basismodell des Gießprozesses mit den zugehörigen industriellen Randbedingungen des Projektpartners HMT erläutert und dargestellt.

3.3.1 Industrielle Randbedingungen (Fa. HMT)

Die Erfassung von Geometrie- und Temperaturdaten ist ein zentraler Schritt, um den relevanten Gießprozess präzise zu analysieren und zu optimieren. Diese Daten bilden die Grundlage für ein fundiertes Verständnis der thermischen Vorgänge in der Schmelze und der Kokille während des Gießprozesses sowie für die Entwicklung numerischer Modelle, die den Prozess virtuell abbilden können. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HMT wurde der Gießprozess stichprobenartig an relevanten Messpositionen aufgenommen, um die spezifischen Bedingungen und Einflussfaktoren vor Ort zu erfassen.

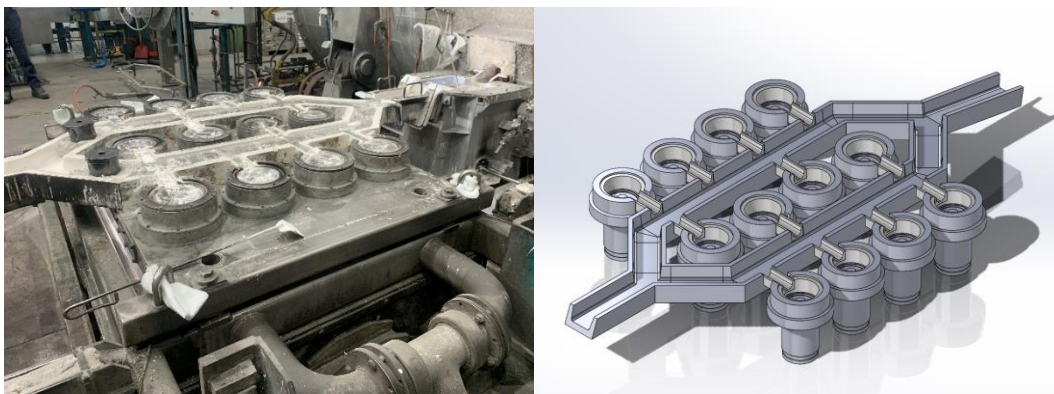


Abbildung 3-10: Darstellung des Gießverteilers Fa. HMT (links) und CAD (rechts)

Die Geometrieaufnahme umfasst die Ableitung von für die Simulation angepassten, vereinfachten Geometrien der Kokillen, keramischen Einlegebauteile und des Gießverteilers (vgl. **Abbildung 3-10**), um eine realitätsgetreue Modellierung der Gießanordnung zu ermöglichen. Gleichzeitig wurden Temperaturdaten entlang des gesamten Gießprozesses erhoben, einschließlich der Schmelze, der Verteilerwand und des Kühlwasserstroms.

Die Vorwärmung des Gießverteilers erfolgt über einen gasbefeueren, geometrisch angepassten Rahmen (siehe **Abbildung 3-11**), der eine gleichmäßige Erwärmung der keramischen Rinnenauskleidung auf ca. 240 - 250 °C ermöglicht, vgl. **Tabelle 3-1**. Dies minimiert thermische Spannungen, schützt die Auskleidung und gewährleistet eine optimale Gießqualität.



Abbildung 3-11: Vorwärmung des Gießverteilers mittels Gasbrenner (HMT)

Tabelle 3-1: ermittelte Oberflächentemperaturen im Gießverteiler vor dem Gießen (HMT)

Zeit [Min]	MS-3 [°C]	MS-5 [°C]	MS-6 [°C]	MS-8 [°C]	Anmerkung
Nach Befüllung Gießofen	50	50	50	50	vor Gasbrenner
Bei Gießprozessstart	250	240	240	180	nach Gasbrenner kurz vor Abguss

Die Temperaturmessung im Gießverteiler umfasste sowohl die Oberflächentemperatur des Verteilers als auch die Schmelztemperatur an verschiedenen Positionen im spiegelsymmetrischen Aufbau (siehe **Abbildung 3-12**). Während des gesamten Gießprozesses wurden die Temperaturen in einem 10-Minuten-Takt erfasst, beginnend an der Filterbox, über den Gießverteiler bis hin zum Einguss bzw. dem formgebenden Werkzeug (Kokille) der Bolzen.

Der Gießprozess der Halbzeuge (Bolzen) beginnt, sobald eine Füllhöhe von 90 % im gesamten Gießverteiler erreicht ist (vgl. **Abbildung 3-13**). Nach einer anschließenden Wartezeit von etwa einer Minute, ist der sogenannte "Bolzenfuß" in der Kokille erstarrt und markiert den Startpunkt des eigentlichen Gießprozesses, da hier die kontrollierte Absenkbewegung der Kokille einsetzt. Mit einer konstanten Geschwindigkeit zwischen 86 und 89 mm/min wird der Gießprozess kontinuierlich fortgeführt, bis der Bolzen seine endgültige Länge von 6,8 m erreicht hat.

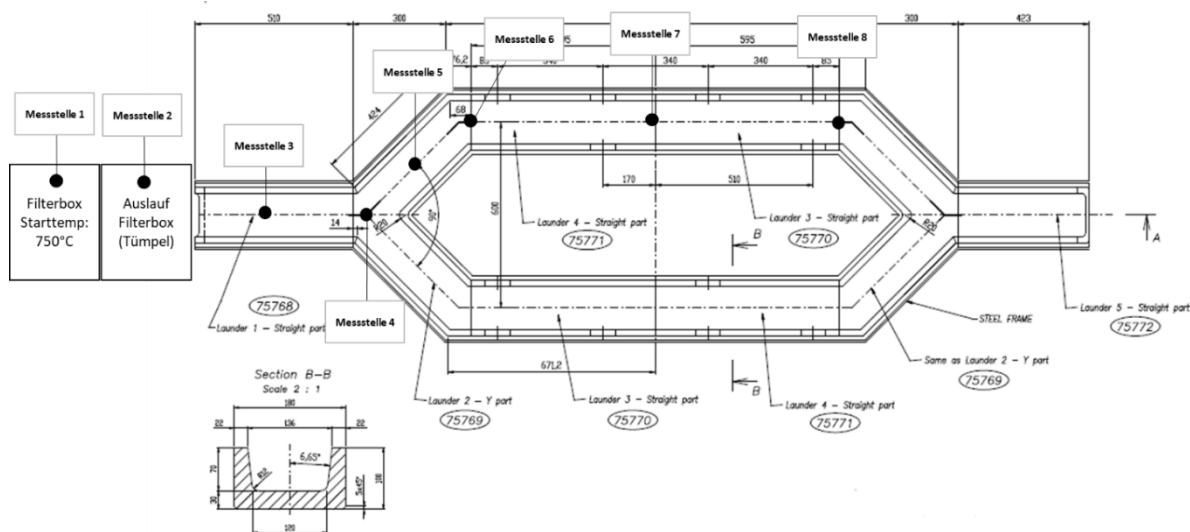


Abbildung 3-12: Positionierung der Messstellen im Gießverteilersystem (HMT)

Während des gesamten Prozesses wird die Verteilerrinne durch eine hydraulisch gesteuerte Kippbewegung des Gießofens kontinuierlich mit Schmelze nachgespeist. Diese präzise Steuerung gewährleistet eine gleichmäßige Versorgung des Gießsystems und verhindert Schwankungen im Schmelzeffluss, die die Qualität der Bolzen beeinträchtigen könnten. Ein Abguss des Formats 203 umfasst insgesamt 12 Bolzen, die zusammen ein Gesamtgewicht von ca. 7 Tonnen Aluminium ergeben. Der gesamte Abguss dauert etwa 80 Minuten, was einem Massenstrom von 7,52 kg pro Minute entspricht. Bei einer Aluminiumdichte der gewählten Vertreterlegierung A6060 von 2,7 kg pro Kubikdezimeter ergibt sich daraus ein Volumenstrom von 2,79 Kubikdezimetern (bzw. Litern) pro Minute.

Die Temperaturerfassung diente nicht nur dazu, potenzielle Überhitzungen oder Abkühlungen der Schmelze durch die veränderten thermischen Bedingungen im Gießofen während des Gießprozessverlaufs zu erkennen, sondern auch, um eine gemittelte Starttemperatur für die Basissimulation zu erhalten (**Tabelle 3-2**).

Tabelle 3-2: ermittelte Schmelztemperaturen im Gießverteiler während des Gießens (HMT)

Giesszeit [Min]	MS-1 [°C]	MS-2 [°C]	MS-3 [°C]	MS-4 [°C]	MS-5 [°C]	MS-6 [°C]	MS-7 [°C]	MS-8 [°C]
10	750	740	735	732	729	727	727	714
20	750	745	743	743	740	737	737	725
30	738	736	733	733	733	731	728	717
40	728	728	726	726	725	724	721	713
50	726	723	721	721	720	719	717	708
60	718	716	715	715	713	712	710	703
70	726	724	723	723	722	722	720	712
	734	730	728	728	726	725	723	713



Abbildung 3-13: gefüllter Gießverteiler während des Gießprozesses (HMT)

Der gegossene Bolzen wird während der Absenkbewegung kontinuierlich aktiv mittels direkter Wasserkühlung an der Bolzenoberfläche unmittelbar nach „Verlassen“ der Kokille gekühlt. Die Veränderung der Kühlwassertemperatur über dem Gießprozess wurde erfasst und ist in der **Tabelle 3-3** dokumentiert.

Tabelle 3-3: abgelesener Verlauf der Kühlwassertemperatur während des Gießprozesses (HMT)

Zeit	T [°C]	Anmerkung
Bei Gießprozessstart	25,2	Im Kühlstrahl am Einzelbolzen gemessen
nach 40 Minuten	29,6	
bei Gießprozessende	30,6	

In **Abbildung 3-14** ist das für die Formgebung des Bolzens verantwortliche Werkzeug (Kokille) dargestellt, welches sich an den Gießverteiler anschließt.

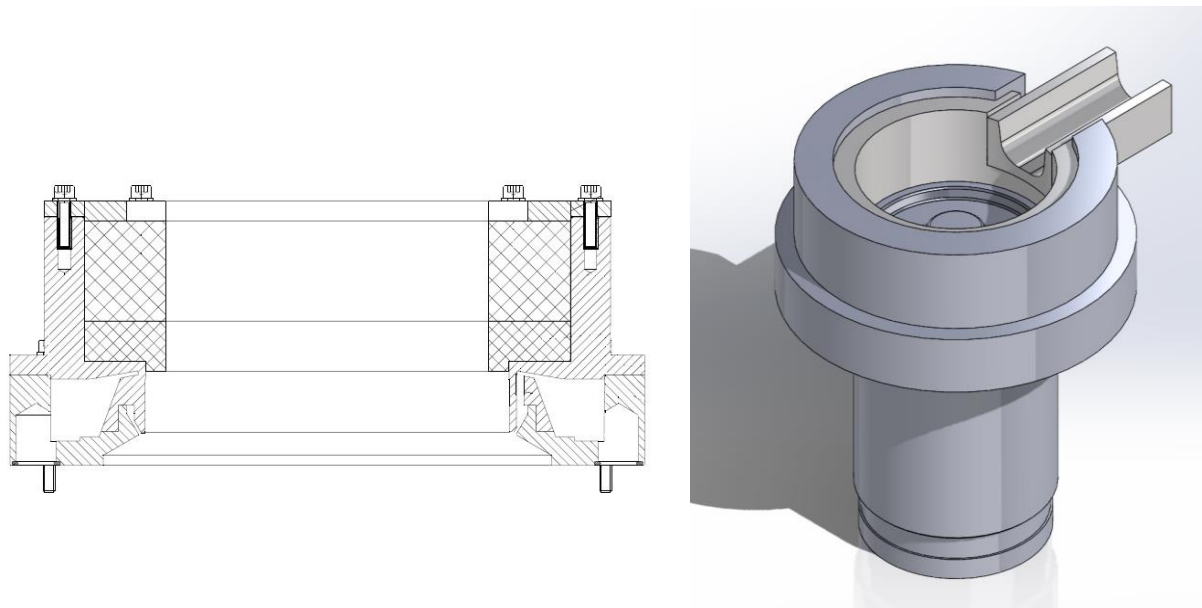


Abbildung 3-14: Zeichnung Kokille ohne Angussfuß (links) und vereinfachtes CAD-Modell der Kokille für einen Einzelbolzenabguss (rechts)

3.3.2 Basismodell für die CFD-Simulation

Zur Vereinfachung der Computational Fluid Dynamics Simulationsrechnung (kurz: CFD-Simulation) mittels der Software Flow3D wird auf die Simulation der Formfüllung von Filterbox und Gießverteiler verzichtet. Ferner wird als konstruktive Basis der Simulationsrechnung ein Einzelabguss abgebildet. Weiterhin wird die aktive Wasserkühlung, welche über einen umlaufenden Stichkanal in der Kokille realisiert wird, mittels eines zusätzlichen wärmeleitenden Elements berücksichtigt. Da die Abbildung eines Zwei-Fluid-Systems (Aluminiumschmelze und Kühlwasser) nicht zielführend ist, da eine eventuelle Berücksichtigung des Wasserstoffeinflusses über ein solches Multiphase Problem durch die Volume of Fluid Methode (kurz: VOF) eventuell abgebildet werden soll und dabei die Softwarebeschränkung für annehmbare Rechenzeiten bei 2 Fluiden liegt.

In **Abbildung 3-15** ist der allgemeine Aufbau der Basissimulation zur Abbildung eines im Direct Chill Casting Gießverfahrens hergestellten Bolzens aufgezeigt. Die Aluminiumschmelze wird über eine Druckrandbedingungen über eine „Düse“ (Farbe Lila), die sich aus dem Füllstand des Gießverteilers ergibt mit einer Starttemperatur von 720°C in die Simulationsumgebung eingebracht und füllt zuerst die komplette Kokille. Nach einer definierten Haltezeit von 60 Sekunden beginnt die Absenkbewegung der Kokille (Farbe Grün), die den Bolzenfuß abbildet. Diese lineare Abwärtsbewegung wird bis zum Erreichen der Produktionslänge des Gussteils von 6,8 Metern fortgesetzt. Während der keramische Einsatz (Farbe: Gelb) isolierend auf die Schmelze wirkt und soll die vereinfachte Wasserkühlung (Farbe Blau) die Schmelze durch einen erhöhten Wärmekoeffizient schnell abkühlen, um eine formstabile Randschale auszubilden. Ansonsten würde das schmelzflüssige Aluminium über den Bolzenfuß (Rabe Grün) hinaus oder herunter laufen.

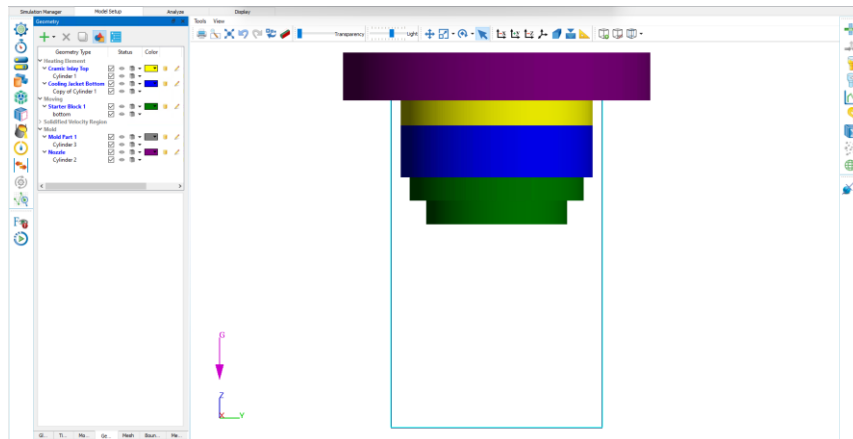
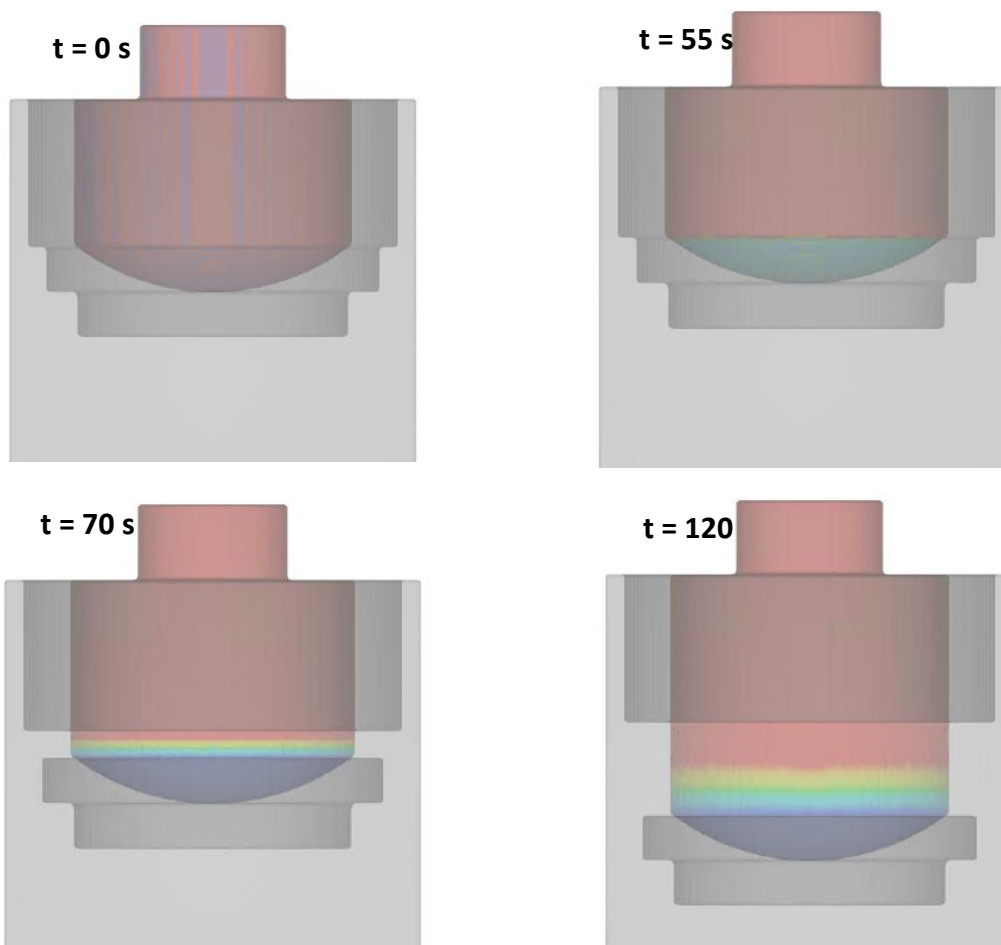


Abbildung 3-15: Aufbau der Basissimulation in Flow3D (Quelle: OvGU)

Die ausgewählten Materialparameter für die Kokille (Steel H 13), der vereinfachten Wasserkühlung (CuCoBe (Copper die)), der keramischen Einsätze (Ceramic) und der Aluminiumschmelze (Aluminum Alloy 6061) sind der Materialdatenbank von Flow3D entnommen. Nach erfolgter Simulationsrechnung wurde das Temperaturfeld einzelner Zeitschritte visualisiert und in **Abbildung 3-16** zusammengefasst.



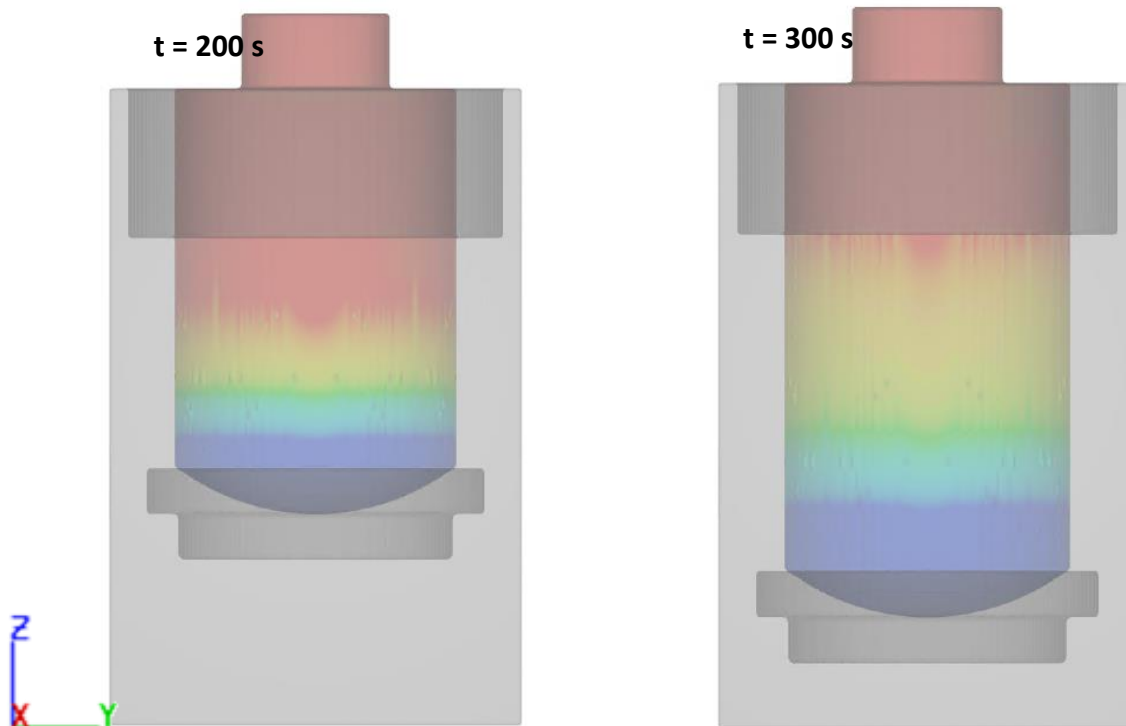


Abbildung 3-16: Darstellung der berechneten Schmelztemperatur über den Gießzeitraum von 0 bis 18 Minuten (Quelle: OvGU)

3.3.3 Ansätze zur Abbildung des Wasserstoffeinflusses

Anpassung thermophysikalischer Daten

Zur Berücksichtigung des Wasserstoffeinflusses in Aluminiumschmelzen kann in der Theorie eine gezielte Anpassung der thermophysikalischen Kenndaten der Aluminiumlegierung in der Simulation eingesetzt werden, um die realen Bedingungen präzise nachzubilden. Wasserstoff beeinflusst wesentliche Parameter wie die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärme und die Viskosität der Schmelze sowie deren Gaslöslichkeit und Diffusionsverhalten. Diese Eigenschaften spielen eine entscheidende Rolle für die Erstarrungsdynamik und die Bildung von Porosität im Gussstück. Durch die Integration dieser veränderten Materialdaten in die Simulationsmodelle können Effekte wie die Gasaufnahme und -freisetzung während des Erstarrungsprozesses sowie die resultierende Porenbildung realitätsnah abgebildet werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Vorhersage der Gefüge- und der mechanischen Eigenschaften des Endprodukts und schafft eine wichtige Grundlage für die Optimierung von Gießprozessen unter Berücksichtigung des Wasserstoffeinflusses. Jedoch ist diese Methodik in gängigen Simulationsmodellen nicht integriert bzw. müsste selbst programmiert werden. Die hierfür benötigten Stoffdaten bzw. angepassten thermophysikalischen Eigenschaften stehen ebenfalls in keiner Datenbank zur Verfügung und müssten durch überaus umfangreiche Experimente für variierende Wasserstoffgehalte im schmelzflüssigen bis breiigen Zustand ermittelt werden, um als Basis für die Simulationsrechnung zu dienen.

Partikelmodell

Das Lagrange-Partikelmodell ist ein Subgittermodell, das verwendet wird, um die Bewegung von kugelförmigen Partikeln mit unterschiedlichen Eigenschaften und Größen zu verfolgen, die kleiner als eine Rechenzelle sind. Diese Partikel können masselos sein (z. B. Markierungspartikel), feste Kugeln (z. B. Massenpartikel), flüssige Tropfen (z. B. Flüssigkeitspartikel) oder gasförmige Blasen (z. B. Gas- oder Leerpartikel) darstellen. Das Modell wurde entwickelt, um die Bewegung dieser Objekte im Berechnungsbereich sowie ihre Interaktionen mit anderen Elementen wie Wänden, Flüssigkeiten oder Hohlräumen zu simulieren, ohne dass eine Netzverfeinerung zur expliziten Modellierung erforderlich ist. Beim Einsatz in der Simulation von Aluminiumschmelzen wird das Modell verwendet, um die Dynamik von Gasblasen zu analysieren, einschließlich ihrer Wechselwirkung mit der Schmelze. Um Prozessen wie Gasdiffusion, Blasenanstieg und potenzieller Porenbildung im Gussstück zu zeigen, sind jedoch nicht genug Materialdaten bzw. Reaktionsdaten und Eingabemasken vorhanden, sodass hier noch bedeutender Entwicklungsaufwand betrieben werden müsste. Die Partikel werden im Standardmodell nicht als diffusionsgelöste bzw. ausgeschiedene Blasen implementiert, sondern als lokaler Gasblasenblock mit vorgegebenen Blasendurchmessern. Wobei die Blasen anschließend mit der Strömung mitgezogen werden und mehr als Marker dienen, als mit der Schmelze interagieren. Zum Teil kann es vorkommen, dass die importierten Gasblasen über ihre Auftriebskraft einfach aus der Schmelze in die Atmosphäre entweichen, was in der fehlenden Abbildung der Gas- bzw. Wasserstofflöslichkeit begründet ist.

3.4 Anlagentechnik und Analytik

Um die Eigenschaften der Schmelze und deren Einfluss auf das Endprodukt zu bewerten, werden Proben entnommen und einer detaillierten Analyse unterzogen. Diese umfasst eine Untersuchung der Porosität mittels Computertomografie (CT) sowie metallographischer Schliffbilder, die Aufschluss über die innere Gefügestruktur geben. Ergänzend dazu werden Zugversuche durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Dehnung zu ermitteln. Eine chemische Analyse dient dazu, die Zusammensetzung der Legierung zu überprüfen und mögliche Einflüsse auf die Materialqualität zu identifizieren.

Die Kombination dieser Technologien ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung des Schmelzprozesses und liefert wertvolle Erkenntnisse zur Abbildung des Wasserstoffeinflusses auf das Eigenschaftsprofil der Vertreterlegierung.

3.4.1 Wasserstoffmessung

Bei jedem Experiment erfolgte die Entnahme von Schmelzproben für die Unterdruckdichtemessung. Zur Ermittlung des Dichteindex wurde eine elektronische Dichte-Index Waage MK 2200 und ein Unterdruckdichteproben-Gerät Serie 3 VT der Fa. MK Industrievertretungen GmbH verwendet. Die Geräte sind auf der **Abbildung 3-17** dargestellt.



Abbildung 3-17: Dichte-Index Waage und Unterdruckdichteprobe-Gerät Serie 3 VT der Fa. MK Industrievertretungen GmbH (OVGU)

Zur direkten Wasserstoffmessung wurde ein Analysator HYCAL MK Portable der Fa. IDECO GmbH, siehe **Abbildung 3-** verwendet.

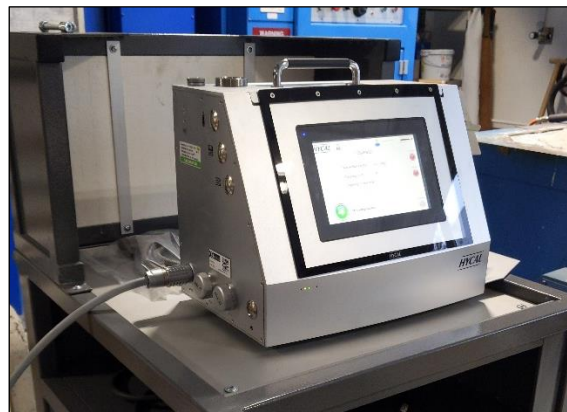


Abbildung 3-18: Wasserstoffmessgerät HYCAL MK Portable der Fa. IDECO GmbH (OVGU)

3.4.2 Messmittel zur Abgasanalyse

Die Temperaturmessung der Gas- und Luftströme erfolgt über Ni-Cr/Ni Thermoelement (Typ K, Kennfarbe grün). Das Thermoelement basiert auf dem 1821 von Seebeck beschriebenen Effekt, dass ein geringer Strom fließt, wenn zwei metallische Leiter aus unterschiedlichem Werkstoff A und B in Verbindung stehen und entlang der beiden Leiter ein Temperaturunterschied vorliegt [15]. Die beiden miteinander verbundenen Leiter werden als Thermoelement bezeichnet. Die gemessene Spannung hängt sowohl von den beiden Materialien als auch vom Temperaturunterschied ab. Grundsätzlich besteht ein industrielles Thermoelement aus zwei elektrisch leitenden Metallen, die an der gewünschten Messstelle miteinander verbunden sind. Sobald sich die Temperatur an der Messstelle erhöht, bewegen sich die freien Elektronen des metallischen Leiters aufgrund der thermischen Energiezufuhr schneller zur Vergleichsstelle. Die Folge ist, dass sich an den beiden Enden der Leiter unterschiedliche Ladungsschwerpunkte ausbilden, die mit einem Spannungsmessgerät gemessen werden (thermoelektrischer Effekt). Der schematische Aufbau eines Thermoelements ist in **Abbildung 3-19** dargestellt:

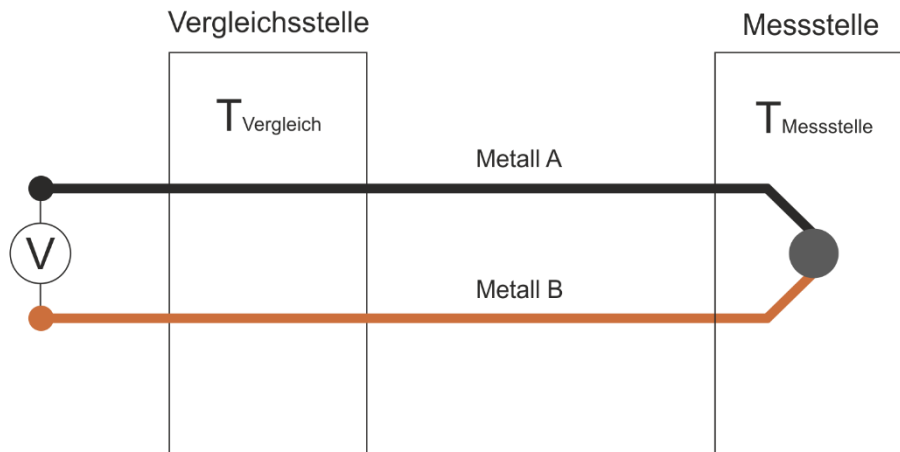


Abbildung 3-19: Schematische Darstellung eines Thermoelement-Messkreises

Da die Messgeräteklemmen, mit denen die Thermoelemente befestigt werden, oft aus anderen Leitungsmaterialien bestehen, treten bei der Temperaturmessung zusätzliche Thermospannungen im Messkreis auf, die kompensiert werden müssen. Thermoelemente vom Typ K sind in der industriellen Messtechnik am häufigsten anzutreffen, denn sie zeichnen sich durch geringe Kosten und einen weiten Anwendungsbereich aus. Der gewöhnliche Temperaturmessbereich dieser Thermoelemente liegt zwischen 0 - 1.250 °C.

Volumenstromerfassung der Brenngaskomponenten

Die einzelnen Gaskomponenten werden in einer Gasmischanlage vermischt. Die Volumenströme der Gaskomponenten werden nach dem Prinzip der thermischen Massendurchflussmessung (Fa. Bronkhorst) erfasst. Ein thermischer Massendurchflussmesser ist ein Messgerät zur Bestimmung des Massenstroms von Fluiden. Das Herz eines thermischen Massendurchflussmessers/-reglers ist ein Sensor, bestehend aus einem dünnen Edelstahlrohr mit thermischen Widerstandselementen [16]. Ein Teil des Gases fließt durch einen Bypass, welcher von einer Heizung erwärmt wird. Daraus ergibt sich mit steigendem Massendurchfluss eine steigende Temperaturdifferenz zwischen T1 und T2. Die gemessene Temperaturdifferenz wird proportional mit dem Massendurchfluss durch einen Sensor elektronisch ermittelt. Schließlich erfolgt anhand der Wärmekapazität und des Konversionsfaktors die Bestimmung des Volumenstroms. Dies wird mit Hilfe der gasspezifischen Daten (Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c_p und Konversionsfaktor K), die Berechnung des Volumenstroms gezeigt. Im **Abbildung 3-20** wird das Prinzip eines thermischen Massendurchflussmessers gezeigt.

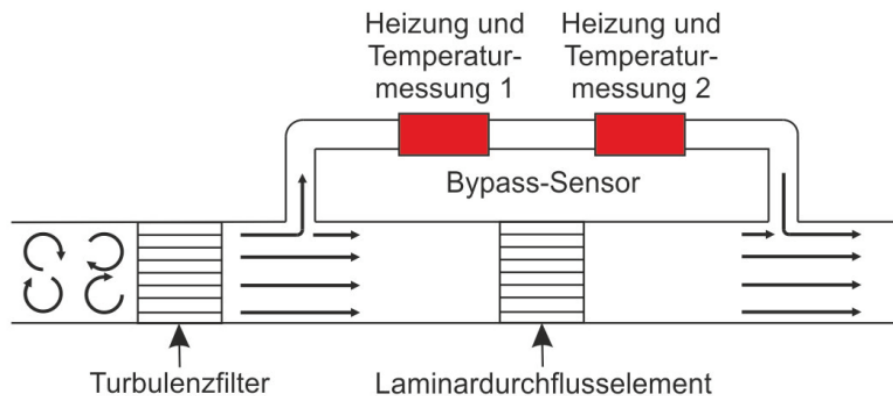


Abbildung 3-20: Schematische Darstellung der Volumenstromerfassung

Emissionsmessung

Die Photometrie ist eine bewährte Messmethode zur Bestimmung von gasförmigen Luftverunreinigungen in der Gas- und Prozessanalytik. Prinzipiell wird die Absorption infraroter (IR), sichtbarer (VIS) oder ultravioletter Strahlung (UV) durch Schadgase als Messeffekt ausgenutzt. Die Emissionsmessung erfolgte mit zwei unterschiedlichen Messgeräten der Firma Emerson-Rosemount. Die Schadstoffkonzentrationen im Abgas wurden mit dem Abgasanalysator, der nach dem Prinzip der nichtdispersiven Infrarotabsorption (NDIR) arbeitet, aufgenommen. Parallel dazu wurde der Sauerstoffgehalt im trockenen Abgas mit einem weiteren Abgasanalysator, der das paramagnetische Verhalten von Sauerstoff als Messeffekt ausnutzt, gemessen. NDIR-Analysatoren eignen sich hauptsächlich zur Bestimmung der Gase CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, CH₄, H₂O, C₂H₆ und vieler anderer Kohlenwasserstoffe. Für die CO- und CO₂-Messung ist die NDIR-Photometrie das am meisten angewendete Messverfahren. Im Gegensatz zu den zweiatomigen Elementargasen mit symmetrischer Elektronenanordnung im Molekül weisen alle heteroatomigen Gase einen gewissen Dipolcharakter auf. Dieser Dipolcharakter führt dazu, dass das Molekül bei IR-Bestrahlung in Grundschiwingung gerät und dabei Strahlung absorbiert [17]. Heteroatomige Gase weisen je nach Molekülaufbau starke Absorptionsbänder auf, die relativ gut voneinander getrennt sind. Die gasspezifischen Wellenlängen der Absorption infraroter Strahlung sind charakteristisch für die jeweils gemessene Gaskomponente, wobei die Intensität der Absorption ein Maß der Konzentration des Gases ist. Die Strahlung, die durch ein rotierendes Blendenrad moduliert wird, durchläuft die Mess- und Vergleichsküvette und verursacht eine periodisch abwechselnde Signalveränderung im Detektor. Mit der Differenz der abwechselnden Signalamplituden wird die tatsächlich gemessene Abgaskonzentration des jeweiligen Gases im Abgasstrom berechnet und am Display abgelesen. Im **Abbildung 3-21** ist das Funktionsprinzip eines NDIR-Photometers angegeben.

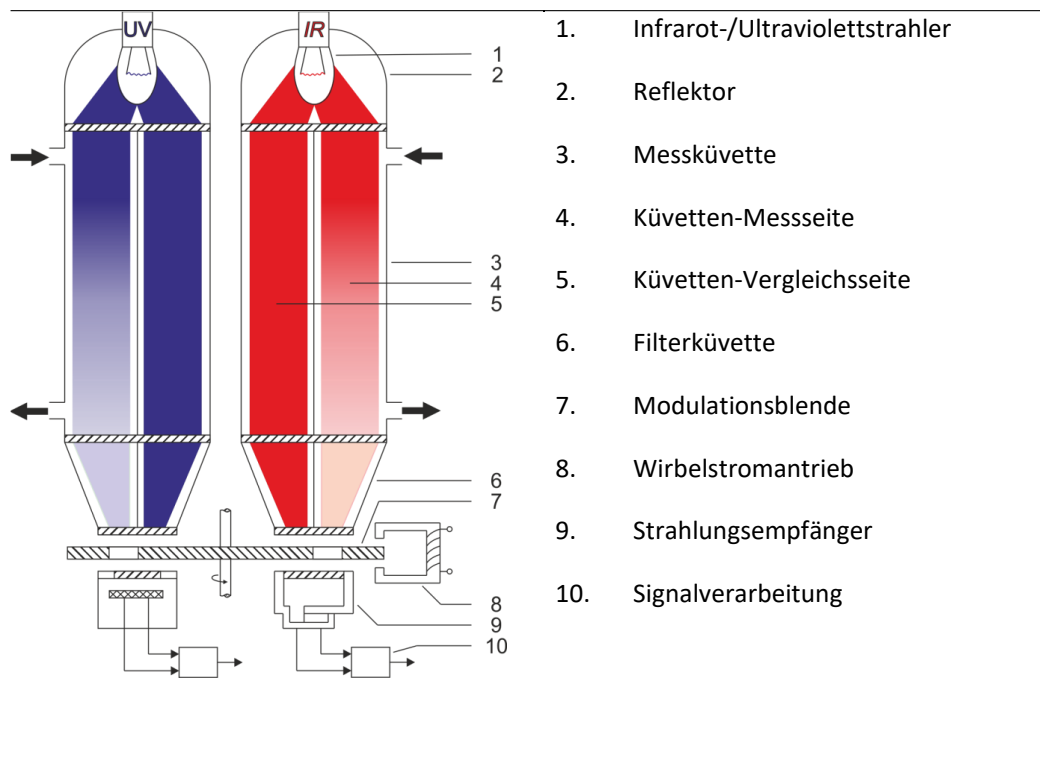


Abbildung 3-21: Funktionsprinzip eines NDIR-Photometers

Das Messgerät ermöglicht die Sauerstoffmessung sowohl auf paramagnetischem als auf elektrochemischem Weg als ein- oder zweikanaliges Messgerät [18]. Die Bestimmung der Sauerstoffkonzentration im Abgas erfolgte bei diesen Untersuchungen mit einem Messgerät, das nach dem Prinzip der paramagnetischen Verhalten von Sauerstoff misst. Sauerstoff weist gegenüber allen anderen normalerweise auftretenden Gasen ein paramagnetisches Verhalten auf. Diese Eigenschaft wird in Messgeräten zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts von Abgasen als Messeffekt ausgenutzt, indem der Sauerstoff in ein Magnetfeld hineingezogen wird und damit Strömungen in den Messkammern entstehen, deren Größe elektrisch bestimmt wird [17]. In der Messzelle des Sauerstoffanalysators schweben zwei mit Stickstoff gefüllte Quarkugeln gemeinsam an einem dünnen Platindraht zwischen einem permanenten Magnetfeld. Ein kleiner Spiegel, der mittig am Platindraht montiert ist, reflektiert einen Lichtstrahl weiter zu einem Photodetektor. Sobald die Sauerstoffmoleküle in die Zelle hineinströmen, werden sie aufgrund ihres Paramagnetismus zum stärksten Bereich des Magnetfelds hingezogen. Dabei setzt sich das Drehpendel mit beiden Quarkugeln in Rotation und verursacht ein gewisses Drehmoment. Aufgrund dessen bewegt sich auch der Spiegel, wobei der Lichtstrahl mit einer veränderten Auslenkung auf einen hochgenauen Photodetektor strahlt und dadurch eine elektrische Spannung erzeugt. Anschließend bewirkt ein verstärktes elektrisches Signal, dass das Pendel mit beiden Quarkugeln sich in die Ausgangsposition zurück bewegt [19]. Der dabei benötigte Strom wird als Maß der O_2 -Konzentration im Abgas ausgenutzt. **Abbildung 3-22** zeigt das Funktionsprinzip eines paramagnetischen Sauerstoffanalysators.

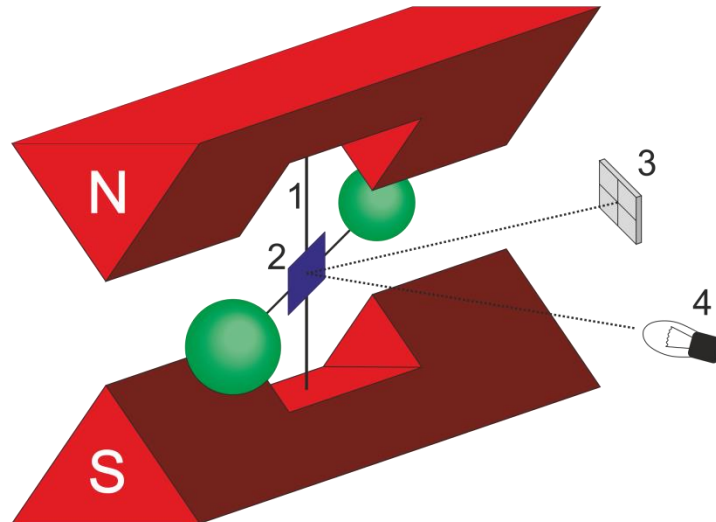


Abbildung 3-22: Funktionsprinzip eines paramagnetischen Sauerstoffanalysators

Abgasanalysegeräte sind empfindliche Messinstrumente, die nur in gewissen Arbeits- und Temperaturbereichen effektiv messen. Aufgrund dessen werden die Emissionsgase erst gekühlt und entfeuchtet, bevor sie dem Analysegerät zugeführt werden.

3.4.3 Ermittlung der Porosität

Die für die computertomographischen Messungen verwendete Anlage ist in **Abbildung 3-23** dargestellt. Es handelt sich um einen Nanofokus-CT Typ phoenix Nanotom S der Firma General Electrics (GE) mit einer max. Ausgangsleistung von 15 W.



Abbildung 3-23: μ CT Typ Nanotom S des Herstellers GE mit Darstellung der Messkammer (OVGU)

Die Parametereinstellungen des Scanvorgangs sind in **Tabelle 3-4** beschrieben, zu beachten bleibt, dass die erreichte Voxelgröße nicht mit der erreichten Auflösung gleichzusetzen ist. Ferner wurde das Verhältnis von Röhrenstrom und Beschleunigungsspannung dahingehend

eingestellt, dass sich ein breites Histogramm und dementsprechend ein guter Kontrast im rekonstruierten Volumen ergibt.

Tabelle 3-4: Übersicht der eingestellten CT-Scanparameter

Scanparameter	Parametereinstellung
Probenabstand zur Röhre [mm]	310
Probenabstand zum Detektor [mm]	125
Probendurchmesser [mm]	5
Röhrenstrom [μA]	230
Beschleunigungsspannung [kV]	80
Belichtungszeit [ms]	500
Voxelgröße [μm]	20

Nach Abschluss der Messungen erfolgte die Rekonstruktion der CT-Aufnahmen des Probekörpers mittels der Software phoenix datos|x 2 des Herstellers GE zu einem digitalisierten Volumen. Über softwareseitig bereitgestellte Tools zur automatischen Korrektur von Geometrieabweichungen sowie der Auswirkungen der Strahlaufhärtung konnte eine reproduzierbare Rekonstruktion der einzelnen Probestäbe gewährleistet werden.

Porositätsanalyse der CT-Daten

Basis der Porositätsanalyse bilden die rekonstruierten Volumina der Probestäbe. Für die Analyse wurde die Software VGStudio Max v2.2.5 kurz VG genutzt. Das von VG bereitgestellte Tool zur Porenanalyse ist die Defektanalyse. Dabei wird anhand der Grauwerte der Rekonstruktion über einen festgelegten Schwellwert eine Abgrenzung zwischen als Defekt und Material deklarierten Voxel getroffen.

Im Falle einer Porenanalyse hat vor allem die Bezugsfläche bzw. im Falle von dreidimensionalen Datensätzen das Bezugsvolumen einen wesentlichen Einfluss auf die Vergleichbarkeit Analyseergebnisse. Um das Analysevolumen als konstant betrachten zu können, wurde eine sogenannte Region of Interest (ROI) definiert über den Messlängenbereich der Probekörper erstellt. Die ROI umfasst dabei den nach parallelen Messlängenbereich mit einer Höhe von 30 mm. Dementsprechend wurde ausgehend von der relativen Probenmitte die ROI 15 mm nach oben respektive nach unten aufgespannt und umfasste den kompletten Querschnitt der zu analysierenden Probestäbe. Anschließend erfolgte die Defektanalyse mit den in **Tabelle 3-5** dargestellten Analyseparametern für alle gefertigten Probekörper in VGStudio Max.

Tabelle 3-5: Übersicht der definierten Parameter zur Defektanalyse

Analyseparameter	Parametereinstellung
Algorithmus	VGDefX v2.2
Schwellwert	ca. 48000
Rauschminderung	Medianfilter
Wahrscheinlichkeitskrit.	Größe
Analysebereich	Interne Bereinigung alle
Volumenfilter ab	0,0001 mm ³ $\pm$ 12 Voxel

Das Ergebnis der Analyse stellt eine Vielzahl an einzelnen abhängigen und unabhängigen Porokennwerten dar. Die für die Festigkeit maßgeblichen Kennwerte sind die querschnittsmiminierende Fläche, Sphärizität und der Abstand zur Oberfläche einer Pore. Des Weiteren wird zur allgemeinen Klassifizierung der Probekörper die dreidimensionale Porosität (P_{3D}) herangezogen. In **Abbildung 3-24** ist ein Analyseergebnis eines Zugstabes beispielhaft dargestellt.

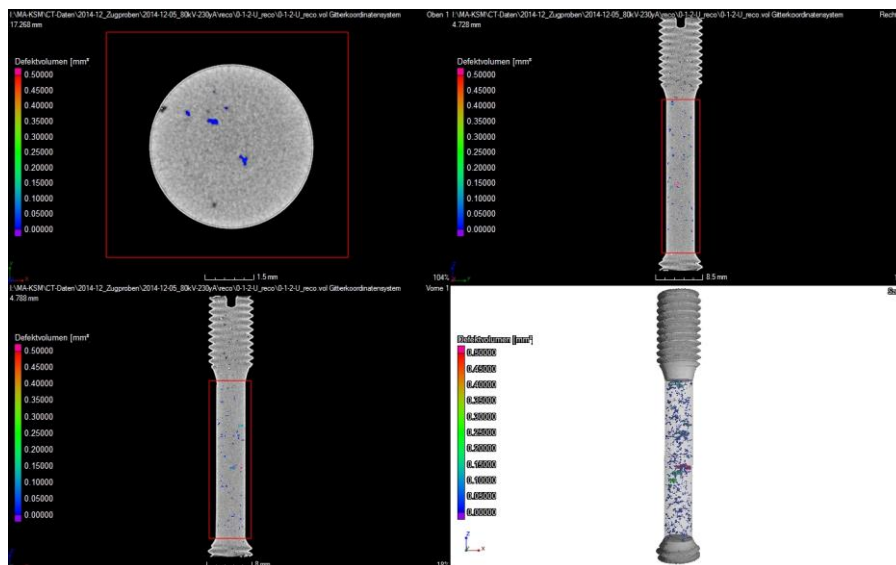


Abbildung 3-24: Darstellung des analysierten Volumens in VGStudio Max (Quelle: OvGU)

Neben der digitalen Auswertung der Probestäbe erfolgte ebenso im Zuge der Auswertung eine konventionelle lichtmikroskopische Betrachtung der Porosität im Probekörperquerschnitt. Zur Analysevorbereitung erfolgte ein Nassschleifen der Proben bei zunehmender Schleifpapierkörnung (P180, P320, P600, P1000, P2500) und zum Abschluss eine Politur mittels Diamantsuspension und Lubrikant, beides auf Wasserbasis, auf 3 µm.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen erfolgten an einem Lichtmikroskop Keyence VHX-5000 mit dem entsprechenden Bildverarbeitungssoftware VHX-5000_900F Version 1.6.0 der Firma Keyence. Die präparierten Proben wurden über ein zusammengesetztes Bild, ein

sogenanntes Mosaikbild, in ihrer Gänze abgebildet. Anschließend erfolgte eine zweidimensionale Analyse der detektierten Defekte, vgl. **Abbildung 3-25**.

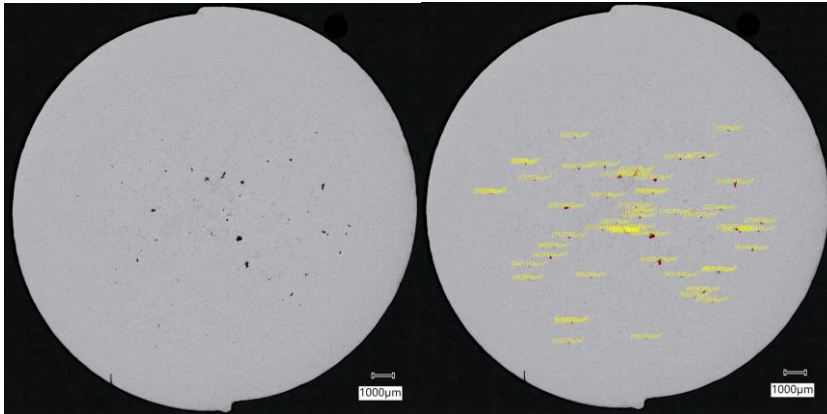


Abbildung 3-25: Beispielhafte Darstellung der Porositätsmessung (Quelle: OvGU)

3.4.4 Mechanische Kennwerte

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte an der in **Abbildung 3-26** dargestellten Universalprüfmaschine Inspekt 250 der Firma Hegewald & Peschke bei Raumtemperatur (20 °C). Während des Versuchs erfolgte die Kraftmessung durch eine Kraftmessdose der Firma Interface Typ 1220 mit einer maximalen Kapazität von 250 kN. Zur Aufnahme der Dehnung innerhalb der parallelen Messlänge wurde ein Extensometer Typ MFN-A mit einem Messlängenbereich von 30 mm der Firma MF genutzt. Die Anlagensteuerung erfolgte über die Software Labmaster Version 2.5.6.50. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 2 mm/s bei einer Vorspannkraft von 50 N festgelegt. Als Versagenskriterium wurde ein Kraftabfall von 80 % definiert.

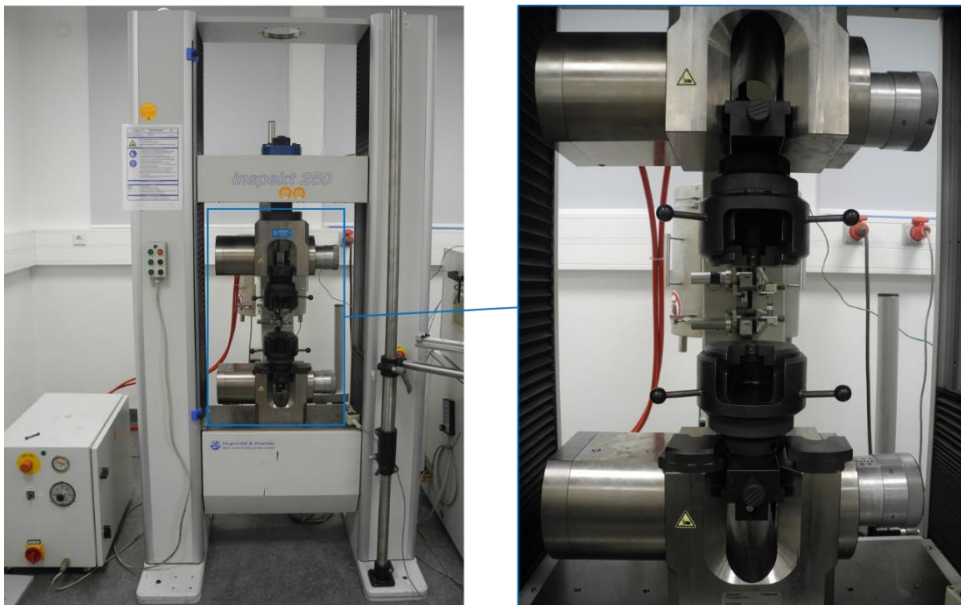


Abbildung 3-26: Konfiguration Universalprüfmaschine Inspekt 250 für die RT-Zugversuche (OVGU)

3.4.5 Chemische Analyse

Für die chemische Analyse kam ein Röntgenfluoreszenzanalysegerät der Firma Spectro zum Einsatz. Die Analyse erfolgte am Spectroscout siehe **Abbildung 3-27** mittels der RFA-Methode.

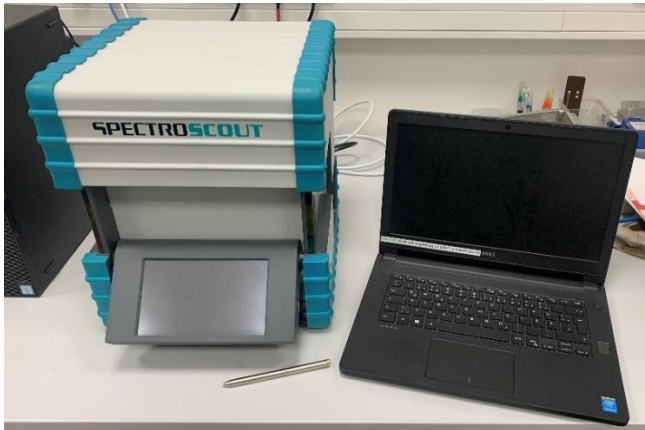


Abbildung 3-27: Röntgenfluoreszenzanalysegerät Typ SpectroScout der Fa. Spectro (OVGU)

3.5 Experimente im Labormaßstab

Für die Schmelzversuche wurden jeweils vorgewärmte Werkzeuge verwendet, um optimale Schmelzbedingungen zu gewährleisten. Dabei wurde die Schmelzkurve aufgezeichnet, um den Schmelzprozess genau zu dokumentieren. Vor dem Abguss wurde eine Dichteindexprobe entnommen, um den Wasserstoffgehalt qualitativ zu messen, später erfolgte eine quantitative direkte Wasserstoffmessung mittels Hycal Messsystems, um mögliche Einflüsse der eingesetzten Brenngaszusammensetzung zu erfassen. Zusätzlich wurde die Porosität, sowohl zweidimensional im metallographischen Schliff als auch zum Teil dreidimensional mittels Röntgen Computertomographie der erschmolzenen Aluminiumproben erfasst, um ihre Materialqualität zu analysieren. Schließlich wurden Zugversuche durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Festigkeit, der Aluminiumlegierung zu bestimmen. Ergänzt wurde die Materialanalyse mit einer chemischen Analyse zum Nachweis des Abbrandes von Legierungselementen durch die erhöhten Flammentemperaturen bei der Verwendung von Wasserstoff als Brenngas. Dieser Experimentier- und Analyseablauf ermöglichte eine umfassende Charakterisierung der geschmolzenen Aluminiumlegierung sowie eine Bewertung möglicher Einflüsse des Wasserstoffs als Brenngas auf die technologischen Eigenschaften.

3.5.1 Experimente Laborofen und Tiegel

Schmelzprozess

Im Versuchsablauf wurden zwei wesentliche Varianten betrachtet, um die Auswirkungen unterschiedlicher Verbrennungsbedingungen auf den Prozess der Aluminiumproduktion zu untersuchen. Zum einen wurden Variationen der Luftzahl (λ) in drei Stufen durchgeführt, wobei

Werte von 0,95, 1,00 und 1,10 gewählt wurden. Diese Variationen ermöglichten es, die Verbrennung mit unterschiedlichen Sauerstoffüberschüssen zu untersuchen und deren Auswirkungen auf die Effizienz und Emissionen des Prozesses zu bewerten.

Zum anderen wurden Variationen der Brenngaszusammensetzung in fünf Stufen untersucht, wobei der Anteil von Wasserstoff im Brenngas von 0 bis 100 Vol.-% variierte. Durch diese Variationen konnte die Auswirkung der Substitution von Erdgas durch Wasserstoff als Brenngas auf den Prozess untersucht werden. Dies ermöglichte es, den Einfluss des Wasserstoffgehalts im Brenngas auf die Verbrennungscharakteristik, den Materialeinfluss und die Emissionsprofile des Aluminiumschmelzprozesses zu analysieren.

In **Abbildung 3-28** ist die Versuchsanlage mit Gasmischer, Brennkammer und nachgelagerte Abgasanalyse dargestellt. In diese Brennkammer wurden die Versuchstiegel aus Graphit Größe A8 zur Vorwärmung bei laufenden Betrieb eingefahren und nach Druchwärmung ausgefahren und mit ca. 2 kg Primäraluminium der Leegierung AlSi7Mg0.3 zum Schmelzen bestückt.

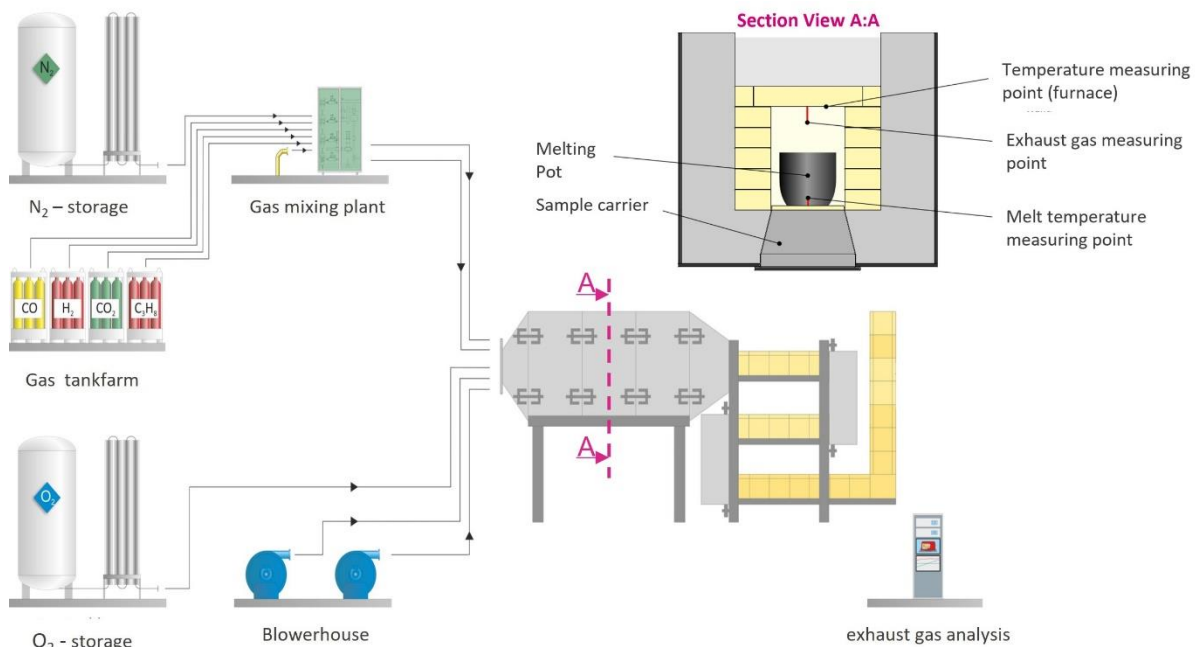


Abbildung 3-28: Schematische Darstellung des Laborofens für die Schmelzversuche am GWI

Während des Schmelzprozesses wurde mittels eines Thermoelementes Typ K der Temperaturverlauf (siehe **Abbildung 3-29**) aufgezeichnet, um so Halte-, Verweil- und Entnahmezeiten zu dokumentieren. Nach Aufschmelzen des eingelegten Probenmaterials wurde die schmelzflüssige Probe bis zu einer Temperatur von 780 °C erwärmt und anschließend zum Abguss entnommen. Der gesamte Schmelzprozess im vorgewärmte Graphittiegel benötigte ca. 10 bis 15 Minuten.

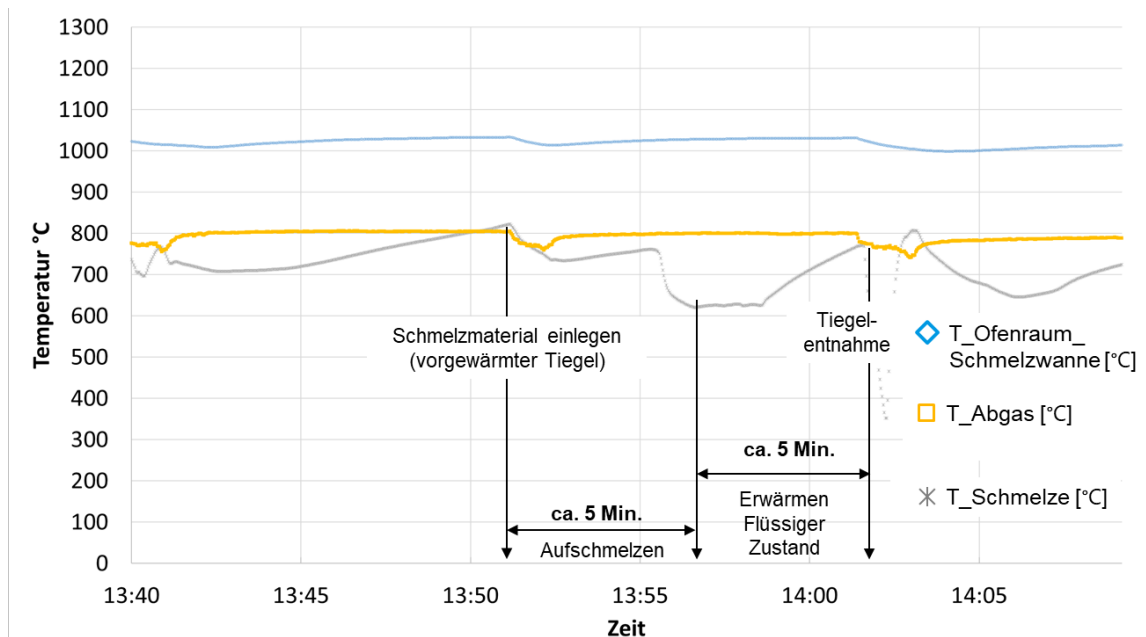


Abbildung 3-29: Schmelzkurve (Tiegel) [$\lambda =1,1$] Erdgas 80 Vol.-%, H₂ 20 Vol.-% (Quelle: GWI)

Abguss und Schmelzequalität

Nach der Entnahme des Tiegels wurde die Temperatur kontinuierlich bis zur Abgustemperatur von 720 °C gemessen, um den Verlauf des Schmelzprozesses genau zu verfolgen. Nach Erreichen von 730 °C Schmelztemperatur wurde die Oxidhaut abgekratz't und eine Probe für die Dichteindexmessung entnommen. Währenddessen wurde eine Dichteindexprobe gegossen, um den Wasserstoffgehalt der Schmelze zu ermitteln und mögliche Einflüsse des Brenngases zu erfassen. Beim Erreichen der Abgustemperatur wurde die geschmolzene Aluminiumlegierung in zwei zuvor auf 300 °C vorgewärmte Stabkokillen (Stabdurchmesser 16 und 20 mm) gegossen, vgl. **Abbildung 3-30**.



Abbildung 3-30: Abgusszenario der im Graphittiegel geschmolzenen Materialproben (Quelle: GWI)

Die ermittelten Dichteindizes (DI) (siehe **Abbildung 3-31**) schwanken zwischen 10 und 14 % und liegen damit im erhöhten Bereich für unbehandelte Schmelzen. Daraus lässt sich ableiten, dass unabhängig vom eingesetzten Brenngasgemisch die Schmelzen verunreinigt werden und Wasserstoff aus der Atmosphäre aufnehmen. Auffällig dabei ist der kontinuierliche Anstieg des DI mit Zugabe bzw. Zunahme von Wasserstoff ins Brenngas bei einer Luftzahl von 1,0. Jedoch lässt sich im Allgemeinen hieraus noch nicht ableiten, dass durch den Einsatz von Wasserstoff als Brenngas eine erhöhte Wasserstoffabsorption stattfindet.

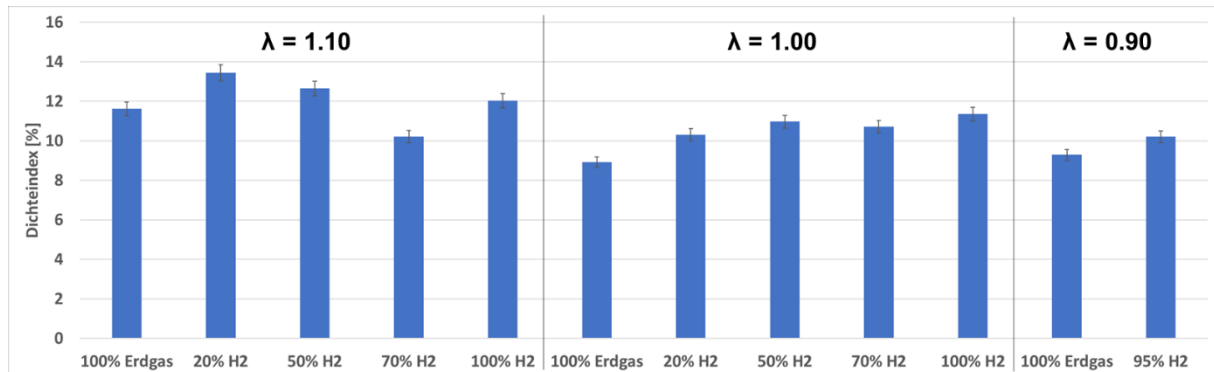


Abbildung 3-31: ermittelter Dichteindex für die Experimentierreihe im Graphittiegel (Quelle: OvGU)

Materialanalyse

Eine Analyse der abgegossenen Probestäbe hinsichtlich der sich einstellenden Porosität sowie der chemischen und mechanischen Eigenschaften erfolgte im Nachgang der Schmelzexperimente. Hierbei wurde als erstes ein Trennen der einzelnen Probestäbe mittels Nasstrennschleifer in die in **Abbildung 3-32** dargestellten Probestücke durchgeführt.

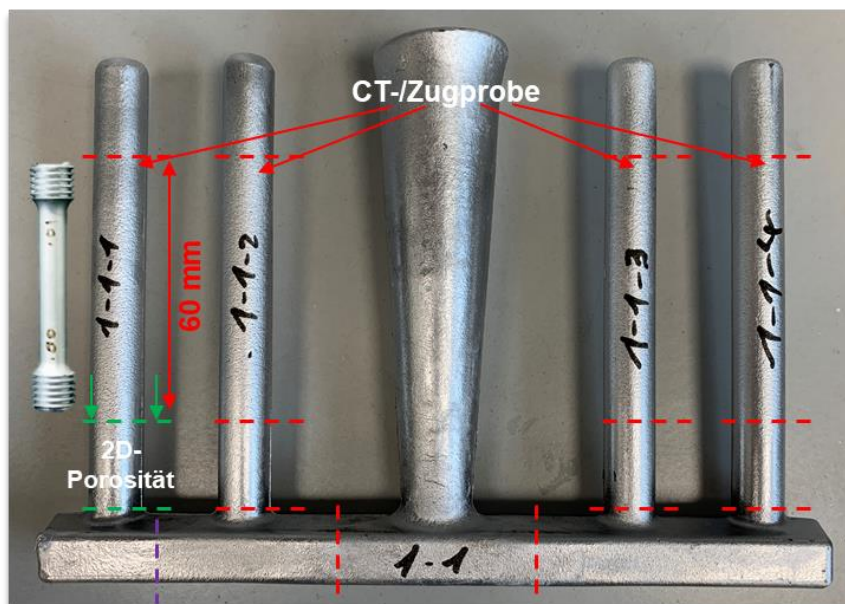


Abbildung 3-32: Darstellung der Analysepositionen der Probestücke (Quelle: OvGU)

Anschließend wurden die unteren Probestücke des Stabes 1 metallographisch präpariert, um lichtmikroskopische Analysen (Porositätsmessungen) durchführen zu können. Weiterhin wurden aus allen Probestäben Rundzugproben nach DIN EN ISO 50125 Form B hergestellt, um die dreidimensionale Porosität im Computertomographen und die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. Ein Stück vom Lauf wurde ebenfalls herauspräpariert, um die chemische Analyse durchzuführen.

Porosität

Nach der Präparation der Querschliffe der Probestäbe, was das Schleifen und Polieren bis zu 1 μm Suspension beinhaltet, wurden an einem Digitalmikroskop Stitchingaufnahmen (zusammengesetzte Bilder) des gesamten Probenquerschnitts (vgl. **Abbildung 3-33**) realisiert.

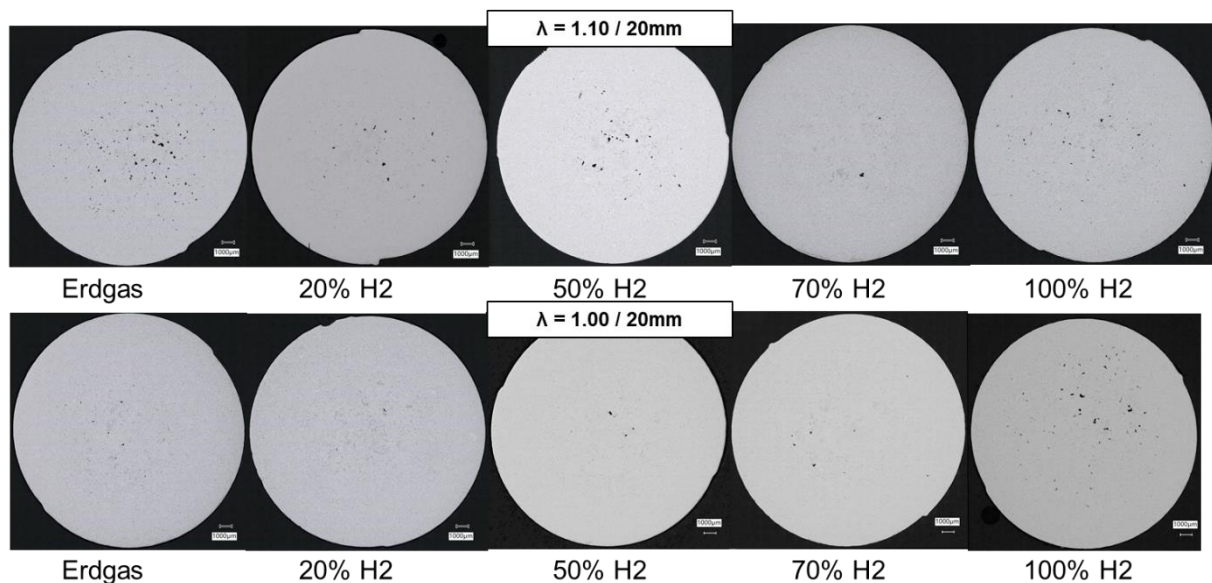


Abbildung 3-33: Ausgewählte Querschliffe durch Probestäbe zur Flächenporositätsanalyse (AlSi7Mg0.3 / Luftzahl (λ) = 1,10 und 1,00 / 20 mm-Bolzen) (Quelle: OvGU)

Nach Aufnahme der Gesamtquerschnitte erfolgte die Porositätsanalyse der Probestäbe. Hierbei wird der aufgenommene Querschnitt anhand eines Schellwertes im Farbhistogramm binarisiert, um so die dunkleren Bereiche (zumeist Poren, Lunker, Löcher) quantifizieren zu können. Die sich ergebenden Flächensummen werden in Verhältnis zum Gesamtquerschnitt der Proben gesetzt und es ergibt sich eine Flächenporosität. Exemplarisch sind die Resultate der Porositätsmessung in Abhängigkeit von der Wasserstoffzumischung am Beispiel der 20 mm Bolzen bei einer Luftzahl von 1,1 und 1,0 in **Abbildung 3-34** aufgetragen. Es ergeben sich zwei gegensätzliche Verläufe zum einen eine Abnahme der Porosität mit Zunahme des Wasserstoffanteils bei einer Luftzahl von 1,1 und zum anderen ein Anstieg der Porosität bei einer Luftzahl von 1,0.

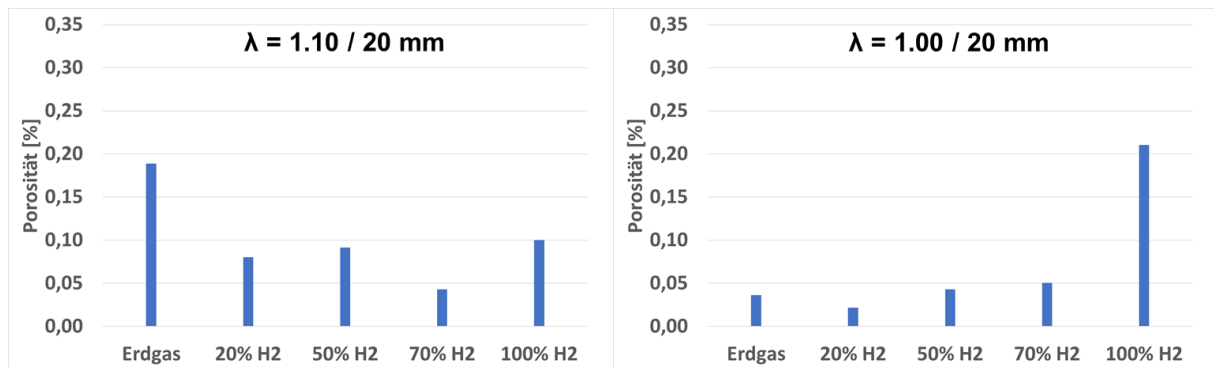


Abbildung 3-34: Darstellung der mittleren Flächenporosität nach H₂-Anteil (Quelle: OvGU)

Berücksichtigt man die Ergebnisse der dreidimensionalen Porositätsanalyse mittels Computertomographie (vgl. **Abbildung 3-35**) zeigt sich, dass beim Vergleich zwischen mit 100 Vol.-% Erdgas und 100 Vol.-% Wasserstoff geschmolzenen Proben die mittlere Volumenporosität jeweils einen vergleichbaren Betrag aufweist oder sogar bei Wasserstoffbeimischung reduziert ist. Sodass sich bezüglich der Porosität keine negativen Auswirkungen auf die Materialqualität beim Einsatz von Wasserstoff zum Schmelzen einer AlSi7Mg-Gusslegierung ableiten lassen.

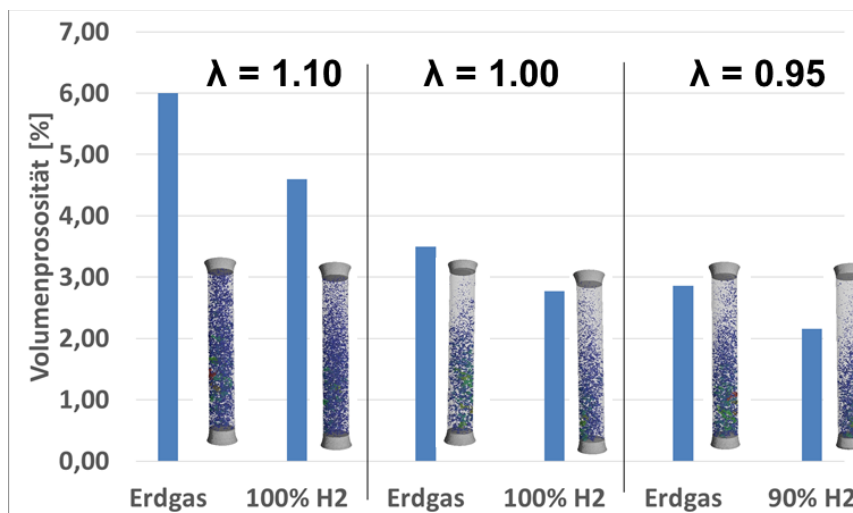


Abbildung 3-35: Ermittelte mittlere Volumenporosität in Abhängigkeit vom eingesetzten Brenngas sowie der eingestellten Luftzahl (Quelle: OvGU)

Chemische Zusammensetzung

Tabelle 3-6 trägt die Elementanteile der in den Experimenten erschmolzenen Legierung auf und zeigt, dass kein Abbrand insbesondere vom flüchtigen Element Mg zu verzeichnen ist. Abermals kann davon ausgegangen werden, dass sowohl eingesetzter Brennstoff als auch Luftzahl keinen Einfluss auf das Abbrandverhalten haben.

Tabelle 3-6: Ergebnisse der chemischen Analyse der Experimentierreihe im Tiegel

	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Ti
Erdgas ($\lambda=1,10$)	95,45	3,765	0,73	0,012	0,001	0,024
20%-H2 ($\lambda=1,10$)	95,58	3,639	0,73	0,011	0,001	0,025
50%-H2 ($\lambda=1,10$)	94,46	4,717	0,72	0,011	0,001	0,036
70%-H2 ($\lambda=1,10$)	93,29	5,830	0,74	0,010	0,001	0,057
100%-H2 ($\lambda=1,10$)	95,21	3,971	0,71	0,012	0,001	0,032
Erdgas ($\lambda=1,00$)	94,39	4,754	0,74	0,012	0,001	0,042
20%-H2 ($\lambda=1,00$)	95,45	3,742	0,73	0,011	0,001	0,030
50%-H2 ($\lambda=1,00$)	95,62	3,630	0,69	0,010	0,001	0,025
70%-H2 ($\lambda=1,00$)	94,13	5,062	0,71	0,011	0,001	0,046
100%-H2 ($\lambda=1,00$)	95,43	3,779	0,72	0,011	0,001	0,031
Erdgas ($\lambda=0,95$)	95,41	3,818	0,70	0,011	0,001	0,032
20%-H2 ($\lambda=0,95$)	95,16	4,023	0,72	0,012	0,001	0,032

Mechanische Eigenschaften

Die gefertigten Probestäbe wurden nach dem CT-Scan einer Zugprüfung gemäß DIN EN ISO 6892-1 bei Raumtemperatur unterzogen. Die ermittelten mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit (R_m), Dehngrenze ($R_{p0.2}$) und Bruchdehnung (A) wurden ermittelt. Exemplarisch sind in **Abbildung 3-36** die ermittelten Festigkeitskennwerte für die Luftzahlen 1,1 und 1,0 der 20 mm Probestäbe aufgetragen. Die nahezu horizontalen Verläufe der Kennwerte weisen darauf hin, dass keine Beeinflussung der mechanischen Festigkeit durch eine Beimischung von Wasserstoff bzw. Variation der Luftzahl stattfindet.

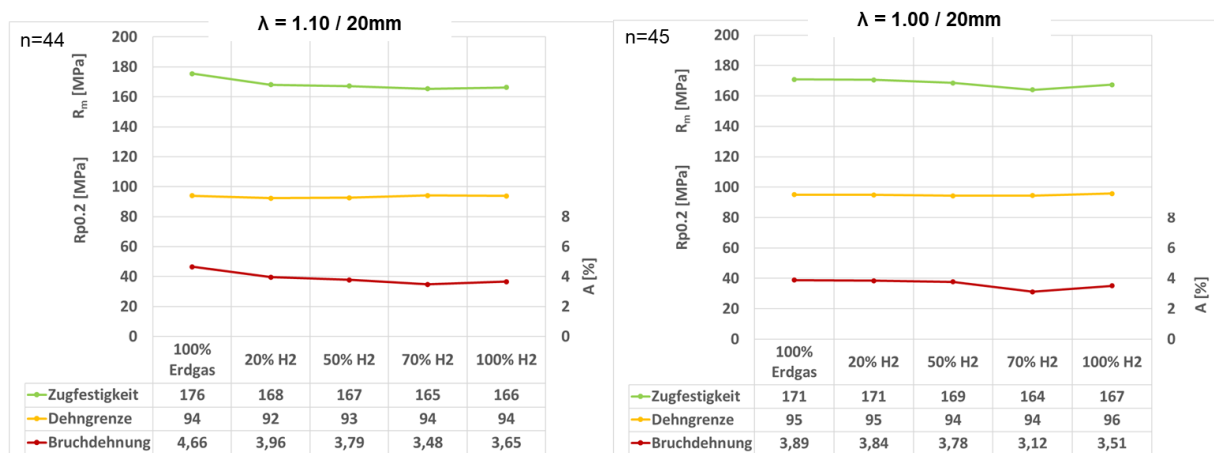


Abbildung 3-36: Auftragung der ermittelten mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch links: AlSi7Mg0.3 / Luftzahl (λ) = 1,10 und rechts: AlSi7Mg0.3 / Luftzahl (λ) = 1,00 (Quelle: OvGU)

Fazit: Experimente Laborofen und Tiegel

Es konnten keine signifikanten Unterschiede beim Schmelzen von Primäraluminium (AlSi7Mg0.3) im Graphittiegel mittels 100 Vol.-% Wasserstoff bzw. Wasserstoffzumischungen

ins Brenngas (Erdgas) im Vergleich zum konventionellen Schmelzprozess nachgewiesen werden. Jedoch ergaben sich folgende Diskussionspunkte:

- Verhält sich die Wasserstoffaufnahme anders bei der Verwendung von Sekundärmaterial des Projektpartners HMT (Legierung EN AW-6060)
- Ist die Kontakt- bzw. Verweilzeit der Schmelze zu gering, um mit der Ofenatmosphäre zu reagieren?
- Wie sieht die Kontaktzone zwischen Flamme und Schmelzgut im Realprozess aus und bildet ein Tiegel dies ab?
- Entgast/Trocknet der Tiegel zu Beginn der Versuche und gibt somit Feuchtigkeit an die Schmelze ab?

3.5.2 Experimente mit entwickelter Schmelzwanne

Schmelzprozess

Um die in der ersten Experimentalreihe entstandenen Frage- bzw. Problemstellungen zu klären, wurde für weitere Experimente eine Stahlwanne, siehe **Abbildung 3-37**, konzipiert. Diese soll mehrere Zwecke zugleich erfüllen:

- Eliminierung der vermeintlichen Entgasung des Graphits durch die Fertigung der Schmelzwanne aus Warmarbeitsstahl
- Erhöhung der Schmelzbadoberfläche und der Kontaktzone zwischen Schmelzgut und Verbrennungsgasatmosphäre
- Steigerung des Schmelzgut- bzw. Schmelzbadvolumens und damit Verlängerung der Schmelzzeit
- Neigung der Wannengeometrie in Richtung Brennerflamme des Laborofenraumes und damit direkterer Flammenkontakt mit dem Schmelzgut

Bei den Experimenten mit der Schmelzwanne wurde die Sekundärlegierung EN AW-6060, welche vom Projektpartner HMT in Form von Bolzenabschnitten bereitgestellt wurde, untersucht. Weiterhin wurde die Brennerleistung reduziert, um die Ofenraumtemperatur von ca. 1.000 °C auf ca. 900 °C zu reduzieren, um so eine Erhöhung der Kontaktzeit zwischen Ofenraum- atmosphäre und Schmelzgut zu gewährleisten, was die Reaktion zwischen Wasserstoff und Aluminium begünstigen soll. Zu Beginn des Schmelzprozesses wurde in die vorgewärmte Schmelzwanne ca. 4 kg Aluminium eingelegt und in den Brennraum eingebracht. Nach Aufschmelzen des eingelegten Probenmaterials wurde die schmelzflüssige Probe bis zu einer Temperatur von 780 °C erwärmt und anschließend zum Nachchargieren entnommen. Beim Nachchargieren bzw. Nachlegen wurden nochmals 2 kg Aluminium ins flüssige Aluminium hinzugegeben und anschließend der Schmelzprozess im Ofen fortgesetzt, sodass sich das gesamte Schmelzvolumen auf ca. 2,6 dm³ bzw. ca. 6 kg Aluminium beläuft.

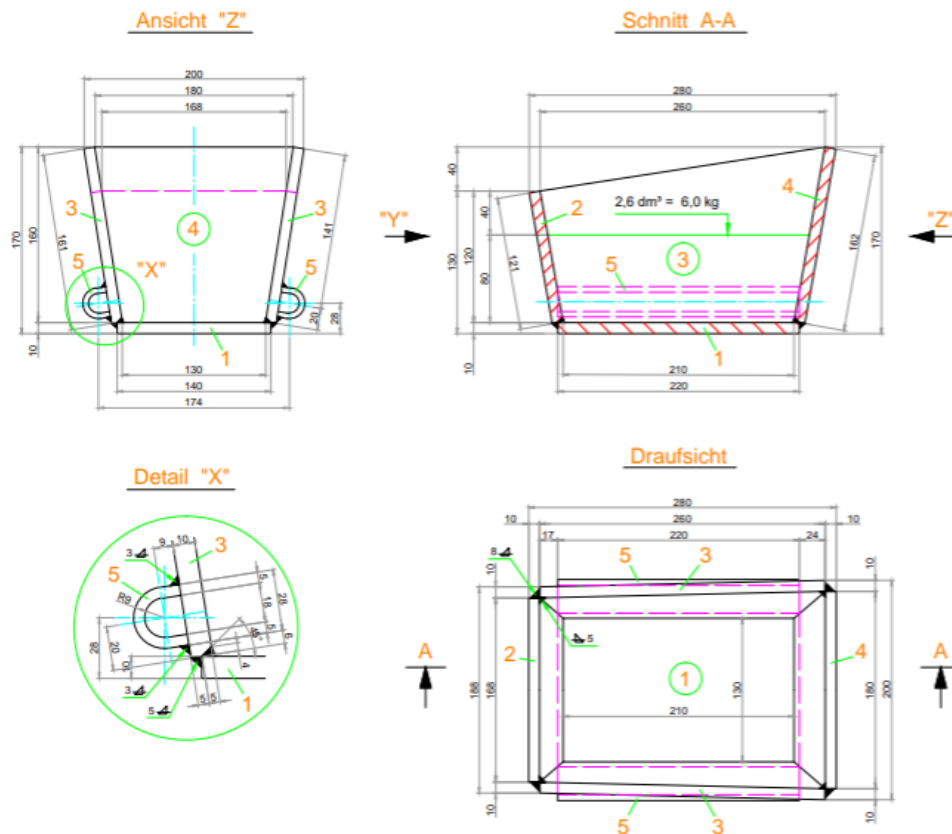


Abbildung 3-37: technische Zeichnung der entwickelten Schmelzwanne (HMT)

Der gesamte Schmelzprozess in der entwickelten Schmelzwanne benötigte ca. 55 bis 60 Minuten und wurde abermals beim Erreichen von 780 °C Schmelztemperatur mit der Entnahme zum Abguss der Proben beendet, siehe auch **Abbildung 3-38**.

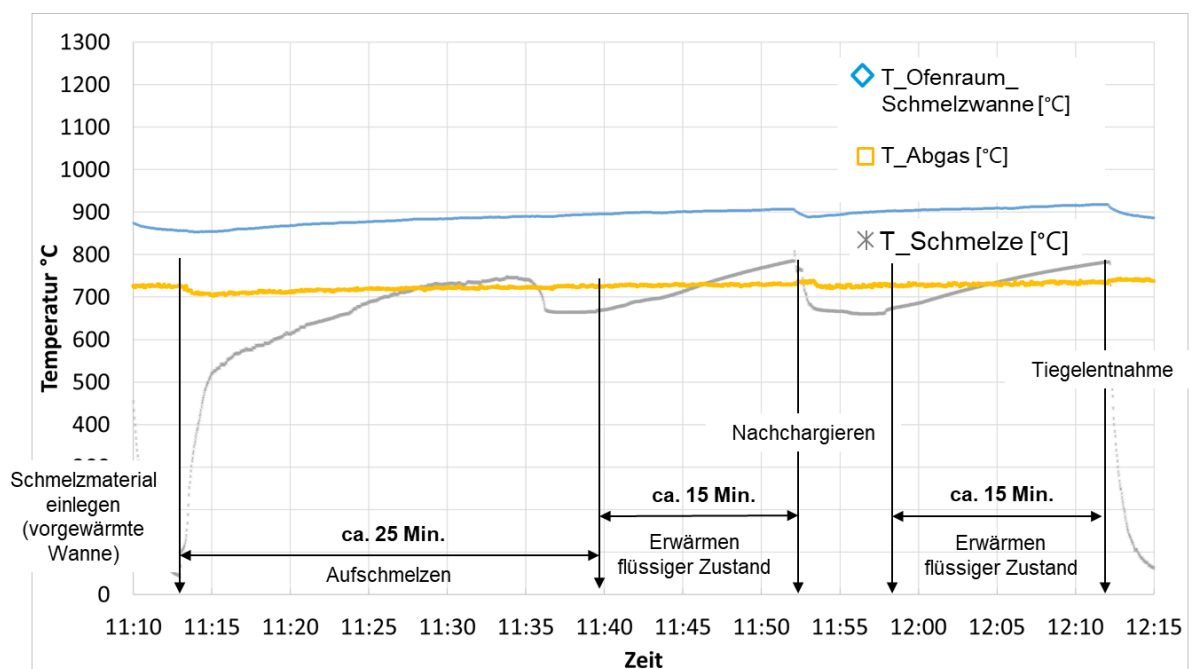


Abbildung 3-38: Schmelzkurve (Schmelzwanne) [$\lambda = 1,1$] Erdgas 80 Vol.-%, H₂ 20 Vol.-%

Abguss und Schmelzequalität

Nach der Entnahme der Schmelzwanne aus dem Laborofen wurde die Temperatur kontinuierlich bis zur Abgusstemperatur von 720 °C direkt in der Schmelze mittels Thermoelement Typ K aufgenommen, um den Verlauf des Abkühlprozesses genau zu verfolgen. Analog zu den Experimenten mit dem Graphittiegel wurde bei 730 °C die Schmelzbadoberfläche abgekrätzt, sprich die Oxidhaut auf dem Schmelzbad entfernt, und eine Dichteindexprobe gegossen, um den Wasserstoffgehalt der Schmelze zu ermitteln und mögliche Einflüsse des Brenngases zu erfassen. Beim Erreichen der Abgusstemperatur von 720 °C wurde die geschmolzene Aluminiumlegierung in zwei zuvor auf 300 °C vorgewärmte Stabkokillen (Stabdurchmesser 16 und 20 mm) gegossen, siehe **Abbildung 3-39**.

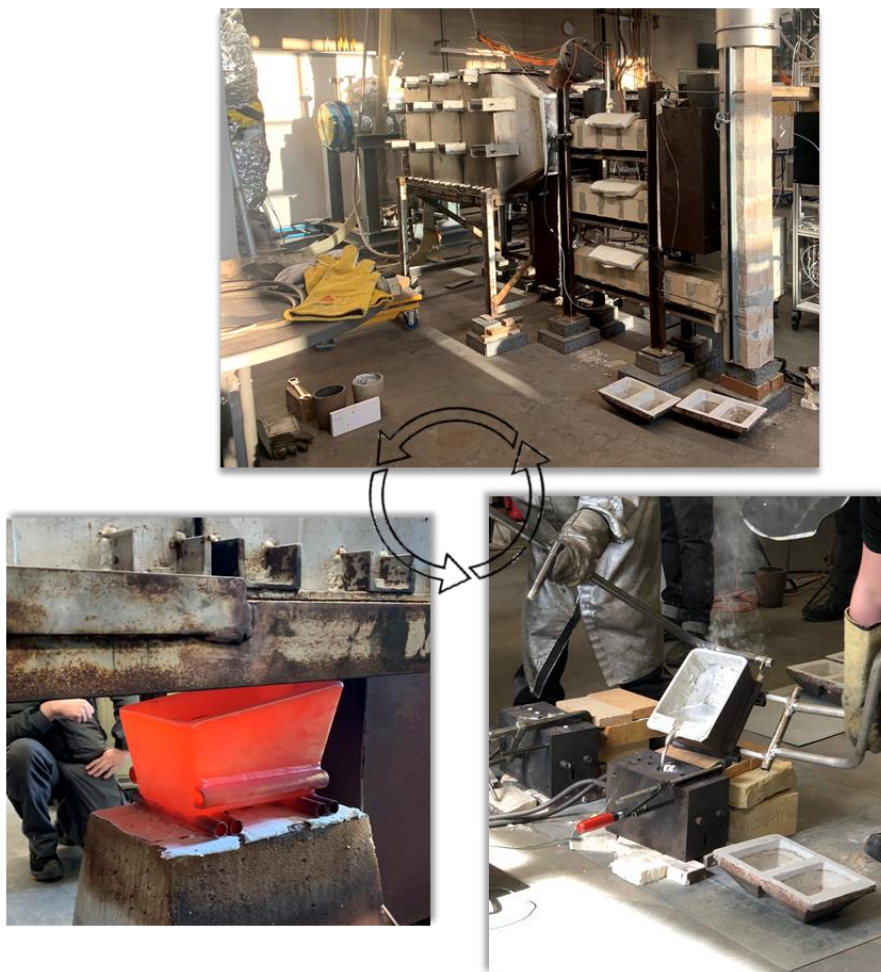


Abbildung 3-39: Abgussszenario der in der Schmelzwanne geschmolzenen Materialproben

Die ermittelten Dichteindizes (DI), vgl. **Abbildung 3-40** schwanken unabhängig von der Luftzahl zwischen 18 und 20 % und liegen damit erfahrungsgemäß im sehr hohen Bereich für unbehandelte Schmelzen.

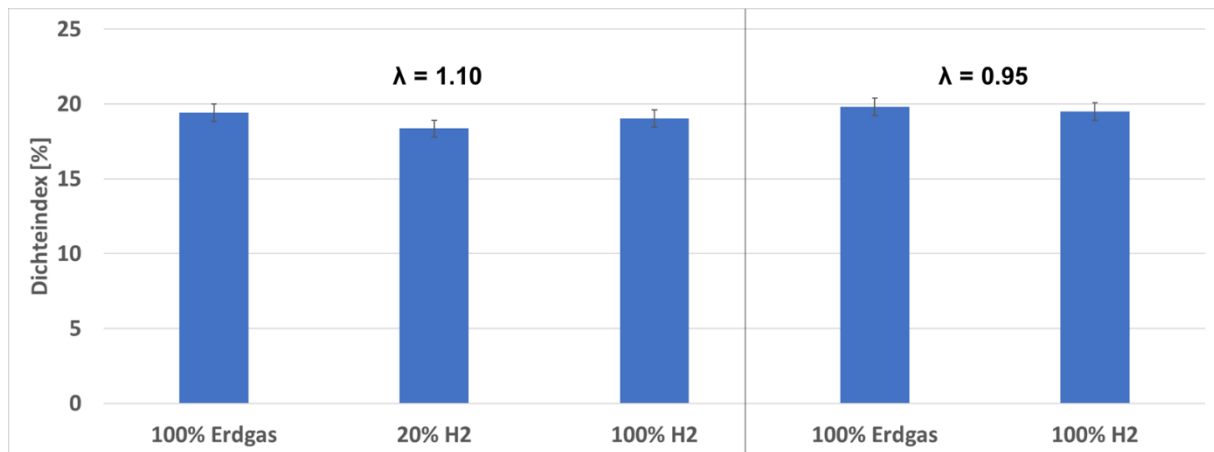


Abbildung 3-40: ermittelter Dichteindex für die 1. Experimentierreihe in der Schmelzwanne (Quelle: OvGU)

In einer 2. Experimentierreihe wurde zusätzlich zum Dichteindex eine direkte Wasserstoffmessung mittels Hycal Messsystem durchgeführt. Die ermittelten Dichteindexwerte bestätigten die ersten Experimente und lagen zwischen 18 und 20 % unabhängig vom Wasserstoffzusatzungsgrad, vgl. **Abbildung 3-41**. Die Hycalmessungen wurden direkt im Schmelzbad während der Erwärmung des flüssigen Schmelzvolumens im Ofenraum durchgeführt. Hierfür wurde die Messsonde durch die Ofendecke über eine Messposition direkt in die Schmelze eingeführt. Die Messergebnisse brachten keine neuen Erkenntnisse bezüglich der Wasserstoffaufnahme und lagen zwischen 0,3 bis 0,7 ml/100g Wasserstoff in der Schmelze (**Abbildung 3-41**), was auf 2 Gründe zurückzuführen ist. Zum einen sind die Messsonden für eine Ofenraumatmosfera von > 850 °C nicht geeignet und entsprechend mehrmals ausgefallen. Zum anderen ist für eine verlässliche Wasserstoffmessung eine konstante Temperatur der Schmelze vorgesehen, jedoch lässt sich dies im Laborofen mit der vorhandenen Versuchskonfiguration nicht realisieren, daher wurde während der Erwärmungsphase der flüssigen Schmelze die Hycalmessung durchgeführt und eventuell beeinträchtigt.

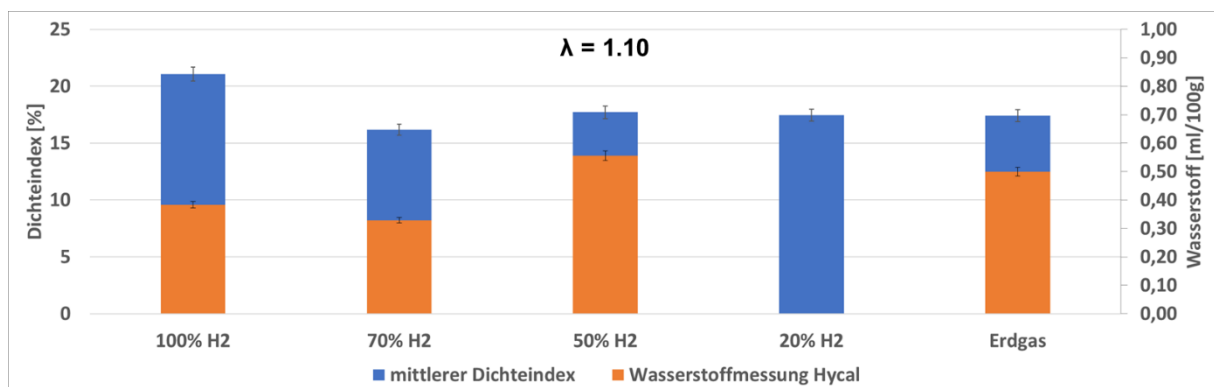


Abbildung 3-41: ermittelter Dichteindex und Wasserstoffmessungen mittels Hycal für die 2. Experimentierreihe in der Schmelzwanne (Quelle: OvGU)

Grundsätzlich lässt sich aber aus den Dichteindexwerten sowie der Wasserstoffmessung ableiten, dass eine Beeinflussung der Schmelzequalität bzw. eine erhöhte Aufnahme von Wasserstoff in die Schmelze, aufgrund der Wasserstoffzumischung nicht stattfindet.

Porosität

Im metallographischen Schliff zeigten sich keine Auffälligkeiten im Gussgefüge der geschmolzen und gegossenen Proben der Sekundärlegierung A6060, vgl. **Abbildung 3-42**. Die ermittelte Flächenporosität der ersten und zweiten Experimentierreihe mit der Schmelzwanne zeigen im Allgemeinen sehr geringe bis nahezu keine Flächenporosität im untersuchten Probenquerschnitt, siehe **Abbildung 3-43**. Entsprechend kann keine allgemeingültige Aussage zur Porosität getroffen werden. Aber vergleicht man die mittlere Flächenporosität der mit Erdgas geschmolzenen Materialproben zu jedem Wasserstoffbeimischungsgrad ist diese mindestens vergleichbar bzw. zum Großteil sogar geringer.

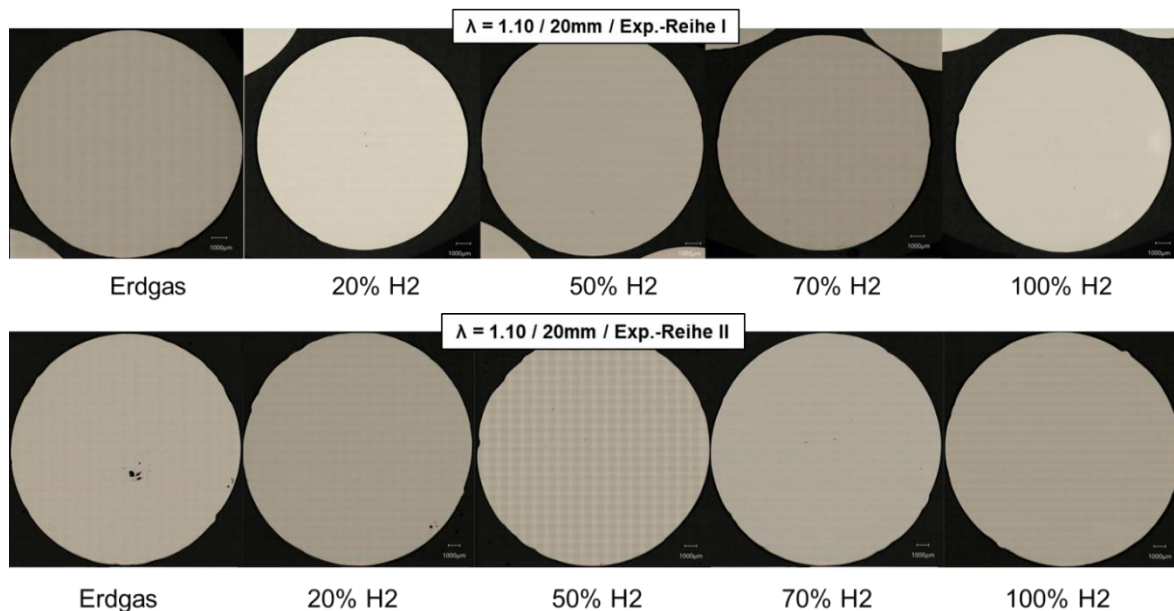


Abbildung 3-42: Ausgewählte Querschliffe durch Probestäbe zur Flächenporositätsanalyse (EE AW-6060 / Luftzahl (λ) = 1,10 / 20mm-Bolzen / Exp.-Reihe I und II) (Quelle: OvGU)

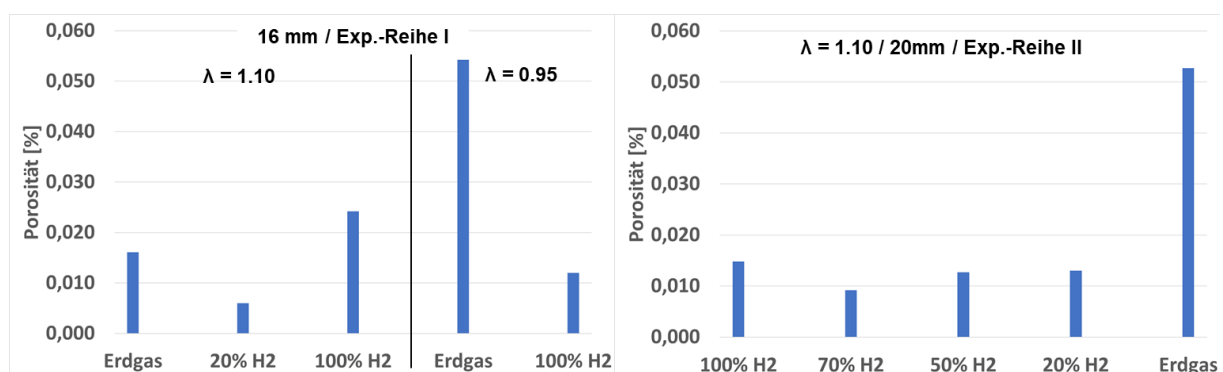


Abbildung 3-43: Darstellung der mittleren Flächenporosität nach H₂-Anteil (Quelle: OvGU)

Die Ergebnisse der computertomographischen Analysen der Volumenporosität, siehe **Abbildung 3-44**, bestätigen die vorrangegangenen Messungen der Flächenporosität, sodass analog zu den Ergebnissen der im Graphittiegel geschmolzenen Legierung AlSi7Mg0.3 die Porosität nicht vom Wasserstoffzumischungsgrad beeinflusst wird.

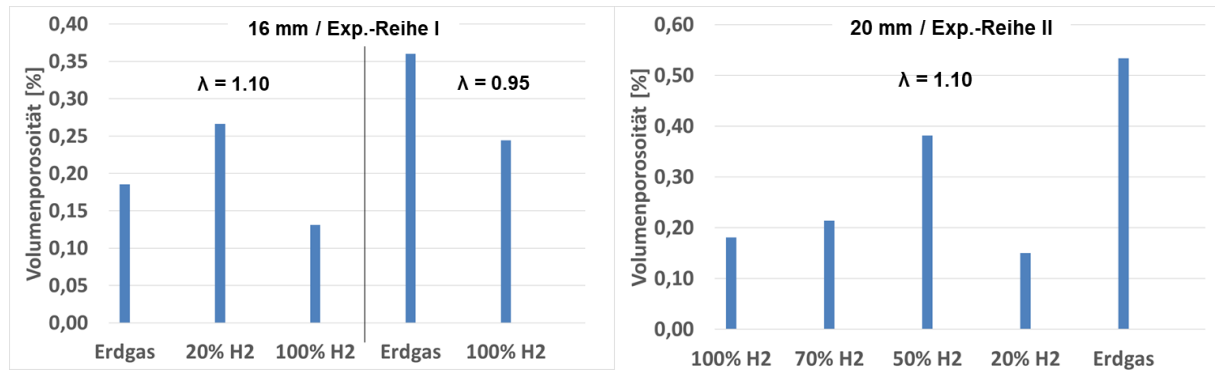


Abbildung 3-44: Ermittelte mittlere Volumenporosität in Abhängigkeit vom eingesetzten Brenngas sowie der eingestellten Luftzahl der Experimentierreihen I und II (Quelle: OvGU)

Chemische Zusammensetzung

Tabelle 3-7 stellt die detektierten Elementanteile nach dem Umschmelzen der bereitgestellten Sekundärlegierung EN AW-6060 dar. Es zeigt sich abermals kein Abbrandverhalten durch die Wasserstoffzumischung bzw. das Schmelzen mit 100 % Wasserstoff sowie Erdgas. Entsprechend kann keine Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung der Legierung nachgewiesen werden.

Tabelle 3-7: Analyse der chemischen Zusammensetzung nach Versuchsreihe (A6060)

	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Cr	Zn
Erdgas (λ=1,10)	98,91	0,189	0,844	0,034	0,003	0,003	0,001	0,003
20%-H2 (λ=1,10)	98,92	0,186	0,839	0,033	0,002	0,003	0,001	0,003
100%-H2 (λ=1,10)	98,92	0,182	0,834	0,039	0,003	0,003	0,001	0,004
Erdgas (λ=0,95)	98,77	0,283	0,885	0,036	0,002	0,004	0,001	0,002
20%-H2 (λ=0,95)	98,83	0,273	0,821	0,038	0,003	0,011	0,001	0,002

Mechanische Eigenschaften

Exemplarisch sind in die ermittelten Festigkeitskennwerte für die Luftzahl 1,1 der 16 mm und 20 mm Probestäbe der 2. Experimentierreihe mit der Schmelzwanne in der **Abbildung 3-45** aufgetragen. Die nahezu horizontalen Verläufe der Kennwerte weisen darauf hin, dass keine Beeinflussung der mechanischen Festigkeit durch Variation des Wasserstoffzumischgrades stattfindet.

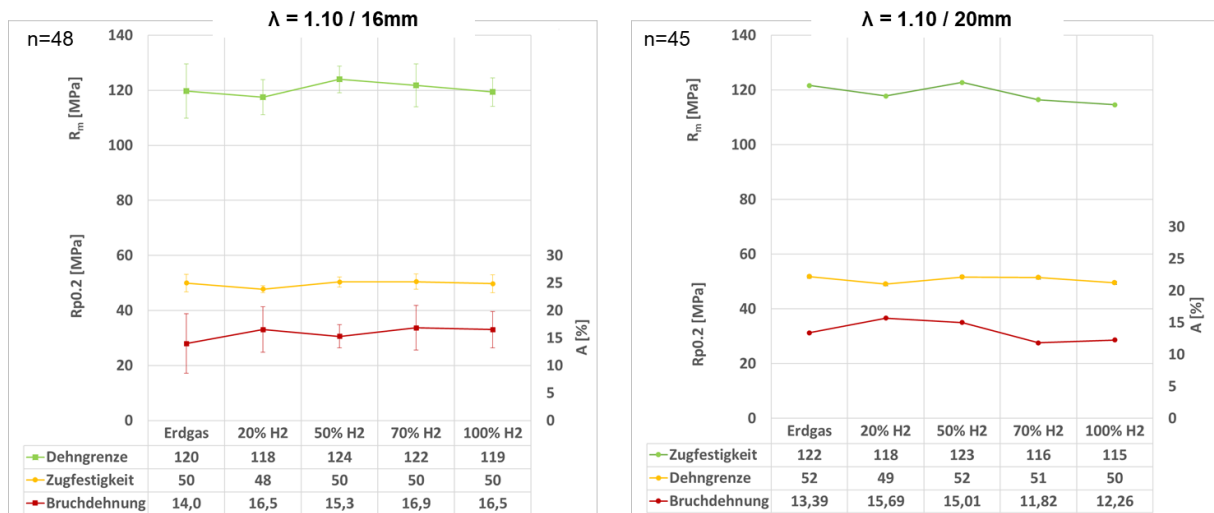


Abbildung 3-45: Auftragung der ermittelten mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch der 2ten Experimentierreihe mit der Schmelzwanne und der Legierung EN AW-A6060 (Quelle: OvGU)

Abgaszusammensetzung

Bei der Beimischung von Wasserstoff in das Brenngas beim Schmelzen von Sekundäraluminium verändern sich die Abgaswerte erst bei hohen volumetrischen Zumischraten bzw. der kompletten Substitution von Erdgas signifikant, vgl. **Abbildung 3-46**. Mit einem zunehmenden Wasserstoffanteil von 20 Vol.-% bis 70 Vol.-% wird eine kontinuierliche Reduktion der CO₂-Emissionen beobachtet, die bei 70 Vol.-% Beimischung eine Verringerung von bis zu 25 % erreicht. Bei reinem Wasserstoff (100 Vol.-% H₂) entfällt die CO₂-Emission vollständig, was das große Dekarbonisierungspotenzial dieser Technologie unterstreicht. Gleichzeitig zeigt sich jedoch ein sprunghafter Anstieg der NO_x-Emissionen, bei einem Wasserstoffanteil von 100 %. Dieser sprunghafte Anstieg ist auf die hohen Flammentemperaturen und die damit verbundenen Reaktionen von Stickstoff mit Sauerstoff zurückzuführen. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer gezielten Prozessoptimierung, um das Potenzial von Wasserstoff zur Emissionsminderung auszuschöpfen, ohne die Bildung von unerwünschtem NO_x zu fördern.

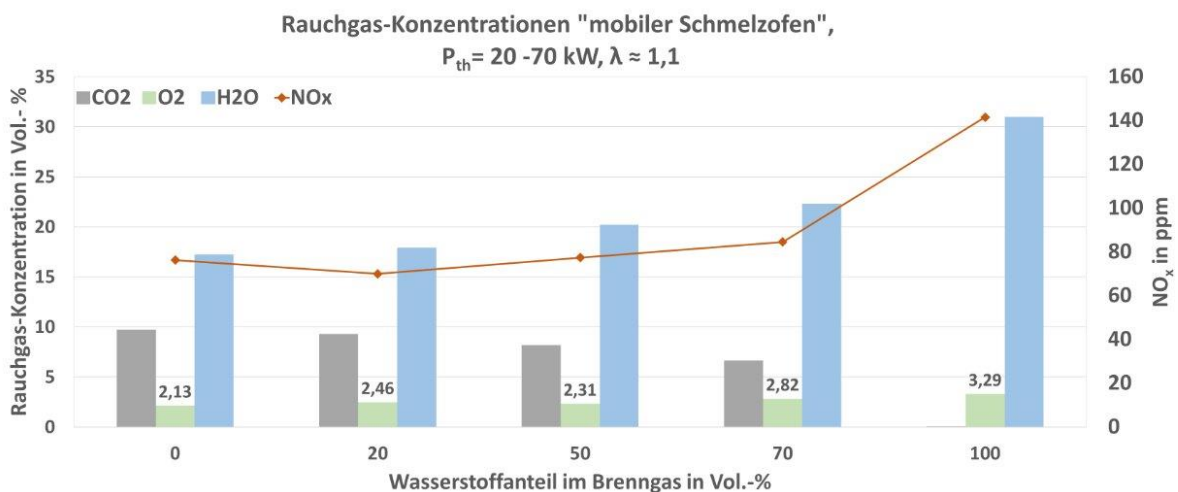


Abbildung 3-46: gemessene Rauchgaskonzentrationen der Experimente am mobilen Schmelzofen (Quelle: GWI)

Fazit: Experimente Laborofen und Schmelzwanne

Es konnten keine signifikanten Unterschiede beim Schmelzen von Aluminium (EN AW-6060) in der Schmelzwanne mittels 100 Vol.-% Wasserstoff bzw. Wasserstoffzumischungen ins Brenngas (Erdgas) im Vergleich zum konventionellen Schmelzprozess hinsichtlich der Schmelze- und Gussteilqualität nachgewiesen werden. Lediglich die Abgaswerte (CO_2 , NO_x) verändern sich erwartungsgemäß sprunghaft bei vollständiger Substitution von Erdgas mit Wasserstoff.

3.5.3 Langzeitexperimente

Um die Kontaktzeit zwischen Brenngasatmosphäre und Aluminiumschmelze weiter erhöhen zu können, wurde ein Versuchstand konzipiert, siehe **Abbildung 3-47**, in dem die Aluminiumschmelze elektrisch auf Temperatur gehalten und eine definierte Brenngasatmosphäre über die Schmelze geleitet wird. Dabei können verschiedene Parameter wie Temperatur, Brenngas- sowie Abgaszusammensetzung genau kontrolliert werden, um spezifische Bedingungen nachzustellen und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften der Aluminiumlegierung zu analysieren. Langzeitversuche ermöglichen es, Veränderungen in der Schmelzequalität, insbesondere des Wasserstoffgehaltes über eine kontinuierliche direkte Wasserstoffmessung zu detektieren und das Absorptionsverhalten zu charakterisieren.

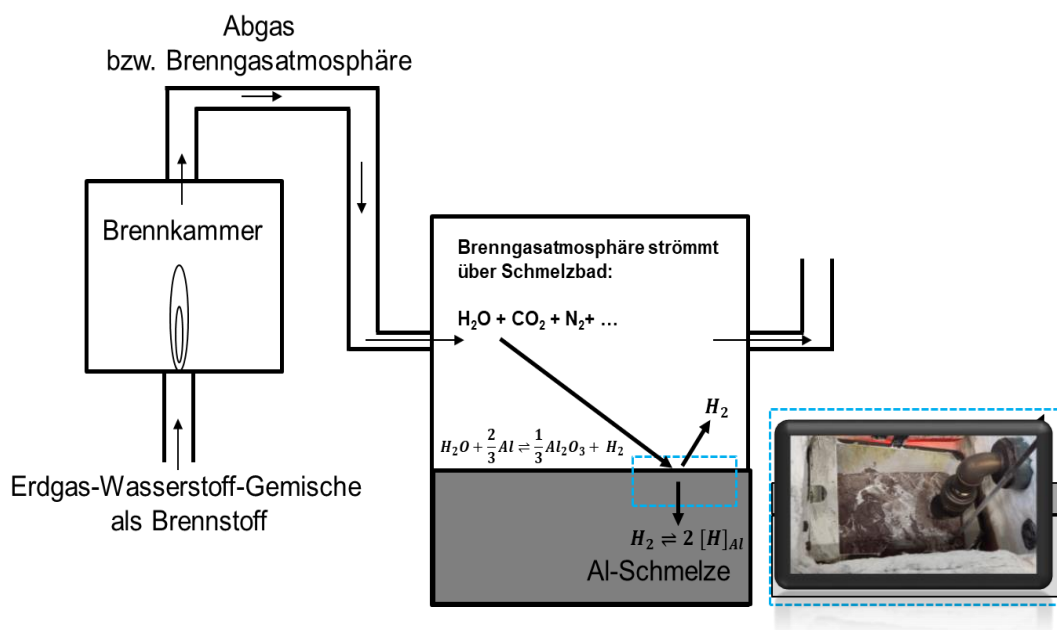


Abbildung 3-47: Schematischer Aufbau der Langzeitversuche inkl. Wasserstoffreaktionen nach [13]

Die Integration des Versuchstandes der OvGU beim Projektpartner GWI in Essen ist in **Abbildung 3-48** dargestellt.



Abbildung 3-48: Umsetzung der Versuchsanlage für die Langzeitversuche am GWI in Essen

Laut [20] ergibt sich mit zunehmenden Wasserdampfanteil in der Verbrennungsgasatmosphäre eine Steigerung des Wasserstoffgehaltes innerhalb der Schmelze. Zieht man die Graphen von Syvertsen et al. [20] in **Abbildung 3-49** heran, ergibt sich bei Verdopplung des H_2O -Gehaltes im Abgas eine um ca. 33 % gesteigerte Wasserstoffkonzentration innerhalb der Schmelze. Jedoch deuten die Schmelztemperaturunterschiede der jeweiligen Messtage daraufhin, dass die Steigerung des gemessenen Wasserstoffgehaltes innerhalb der Schmelze tendenziell richtig, aber die Beträge zu hinterfragen sind. Da die Messmethodik eine Temperaturabhängigkeit aufweist (grundsätzliche Berechnung der Löslichkeit von H_2 in schmelzflüssigen Aluminium nach dem Sievertschen-Gesetz) und somit den berechneten Anteil an gelösten Wasserstoff innerhalb der Aluminiumschmelze eventuell überprognostiziert.

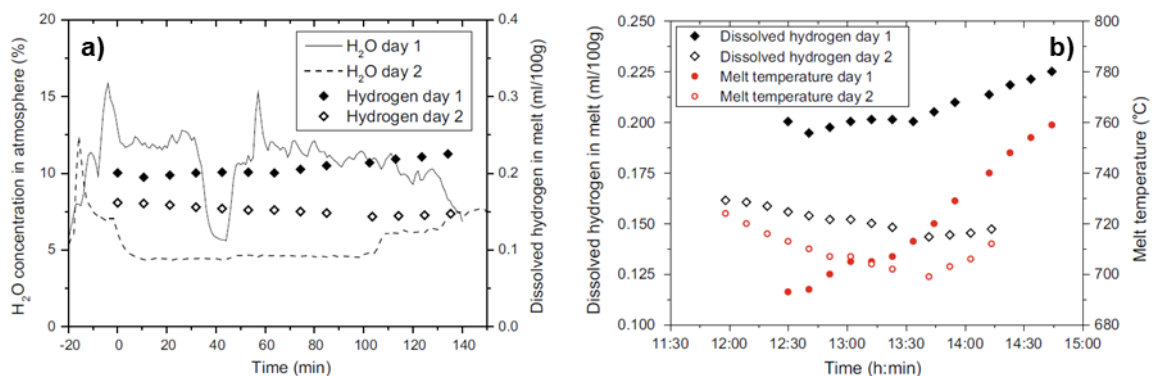


Abbildung 3-49: Verläufe des Wasserdampfgehalt im Ofenraum sowie des gelösten Wasserstoffes in der Schmelze in der Ofenraum (a) und gelöster Wasserstoff sowie Schmelztemperatur (b) [15]

Im Vergleich dazu wurden die Langzeitexperimente am GWI nach dem Schmelzen von ca. 6 kg Aluminium A6060 innerhalb des Laborofens bei nahezu konstanter Temperatur ($\Delta T \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) während der Wasserstoffmessung gehalten. **Abbildung 3-50** stellt am Beispiel eines Experiments mit 100 Vol.-% Wasserstoff als Brenngas den Temperaturverlauf und den in situ Verlauf des gemessenen Wasserstoffgehaltes innerhalb der Aluminiumschmelze dar. Es zeigt sich innerhalb des Untersuchungszeitraumes von 4 Stunden, entgegen den Erwartungen, kein signifikanter Anstieg des gelösten Wasserstoffes innerhalb der Schmelze, sondern ein nahezu konstanter Wasserstoffgehalt.

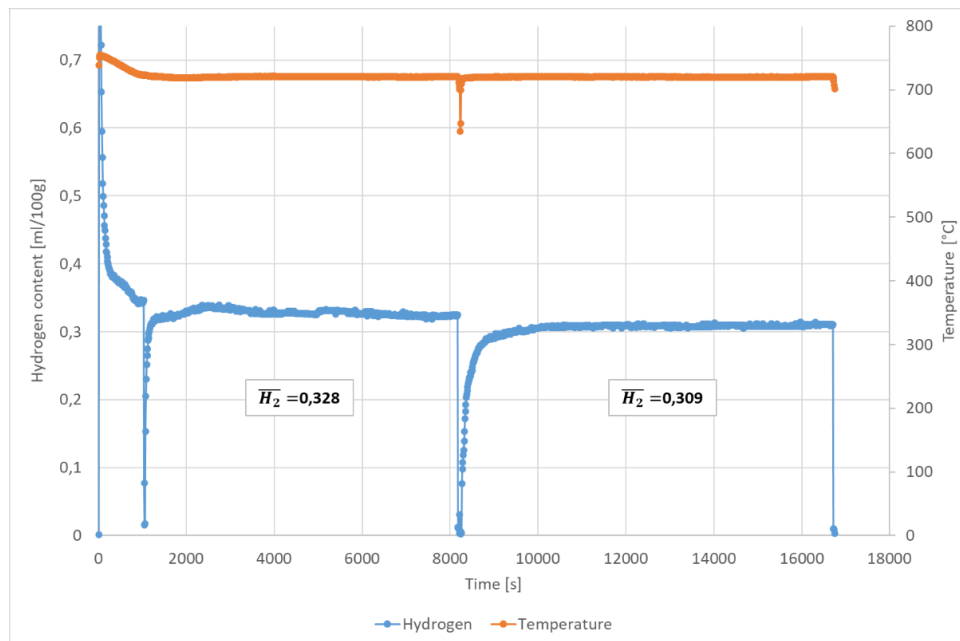


Abbildung 3-50: Messverlauf des gelösten Wasserstoffs sowie Schmelztemperatur (100 Vol.-% H₂) (Quelle: OvGU)

Die weiteren Messergebnisse des Referenzprozesses mit Erdgas sowie der stufenweisen Beimischung von Wasserstoff bis 100 Vol.-% verdeutlichen die quasistatischen Verläufe des Wasserstoffgehaltes bzw. negieren die Wasserstoffaufnahme während der Haltezeiten nach dem Schmelzen. Da sich aber, wie in **Abbildung 3-51** aufgezeigt, die Beträge des in der Schmelze gemessenen gelösten Wasserstoffgehaltes mit zunehmenden Wasserdampfanteil im Brenngas deutlich steigern, wird darauf geschlossen, dass entweder die atmosphärischen Bedingungen (Wasserdampfgehalt) während des Schmelzens oder der gebundene Wasserstoffgehalt im Ausgangsmaterial maßgeblich den Wasserstoffgehalt nach dem Schmelzen definieren. Der Messwert des in der Schmelze gelösten Wasserstoffgehaltes steigt mit zunehmendem Anteil an H₂ im Brenngas und damit H₂O Gehalts im Abgas. Der ermittelte Dichteindex (**Abbildung**

3-52) der jeweiligen Versuchsschmelzen kann diesen Trend nur zum Teil wiedergeben und reißt für die Zumischrate von 100 % H₂ unter das Referenzniveau (Erdgas) aus.

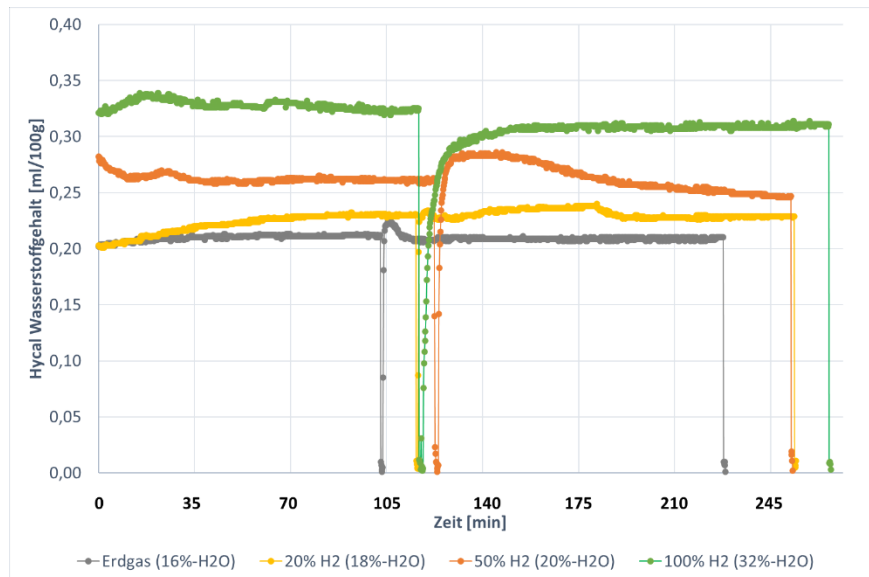


Abbildung 3-51: Verläufe der Wasserstoffaufnahme bei stufenweiser Anhebung des H₂-Anteils (Quelle: OvGU)

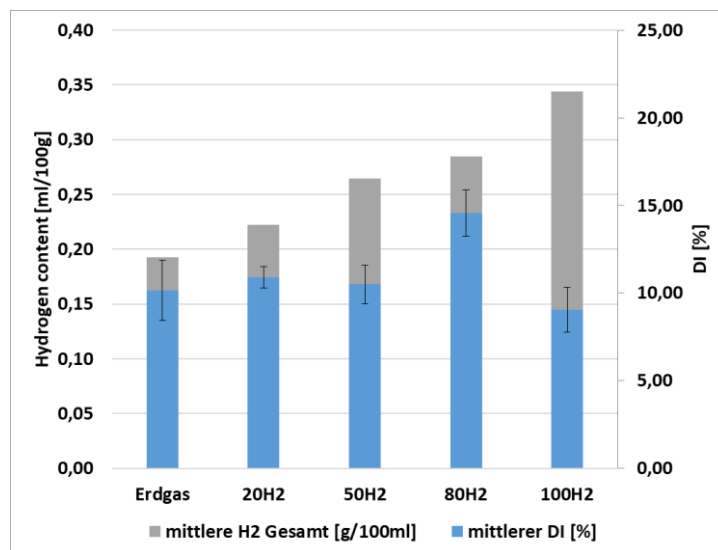


Abbildung 3-52: ermittelter gelöster H₂-Gehalt sowie Dichteindex der Langezeitexperimente (Quelle: OvGU)

Porosität

Die Porositätsanalysen sind in den **Abbildung 3-53** und **Abbildung 3-54** dargestellt und zeigen analog zu den Versuchen mit der Schmelzwanne in der mobilen Brennkammer nur sehr kleine Porositätsgehalte sowohl im metallographischen Schliff als auch bei der CT-Messung der Probestäbe.

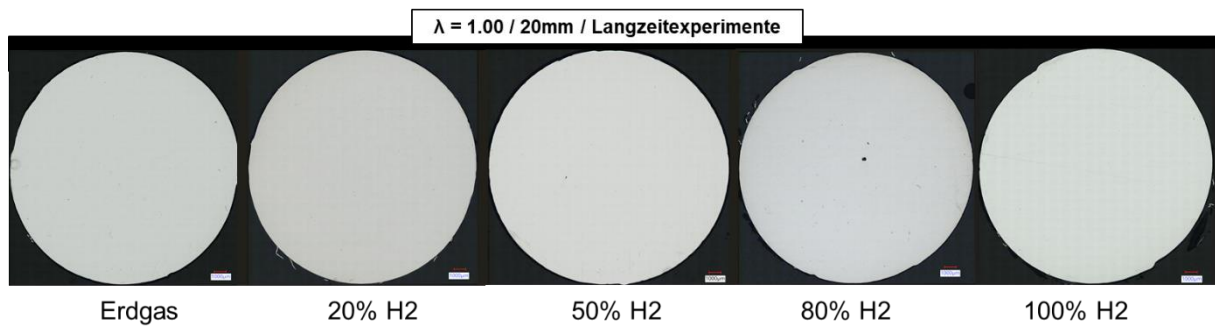


Abbildung 3-53: Ausgewählte Querschliffe durch Probestäbe der Langzeitexperimente (Quelle: OvGU)

Vergleicht man die Darstellung der Beträge der Volumenporosität (**Abbildung 3-53**) und die des Dichteindex (**Abbildung 3-54**), zeigen sich Parallelen. Es kommt zu einer stufenweisen Erhöhung sowohl des Dichteindex, des gemessenen Wasserstoffgehaltes als auch der Porosität bis ca. 80 Vol.-% Zumischrate von Wasserstoff im Brenngas. Jedoch fällt sowohl der Dichteindex als auch die Volumenporosität bei 100 Vol.-% H₂ ab. Hier könnte ein Zusammenhang zwischen dem Keimhaushalt der Schmelze, welche den Dichteindex maßgeblich beeinflusst, und der Zusammensetzung des Brenngases bestehen, was aber im Rahmen der derzeitigen Untersuchungen nicht eindeutig geklärt werden konnte und weiterer wesentlich umfangreicherer sowie detaillierter Untersuchungen bedarf.

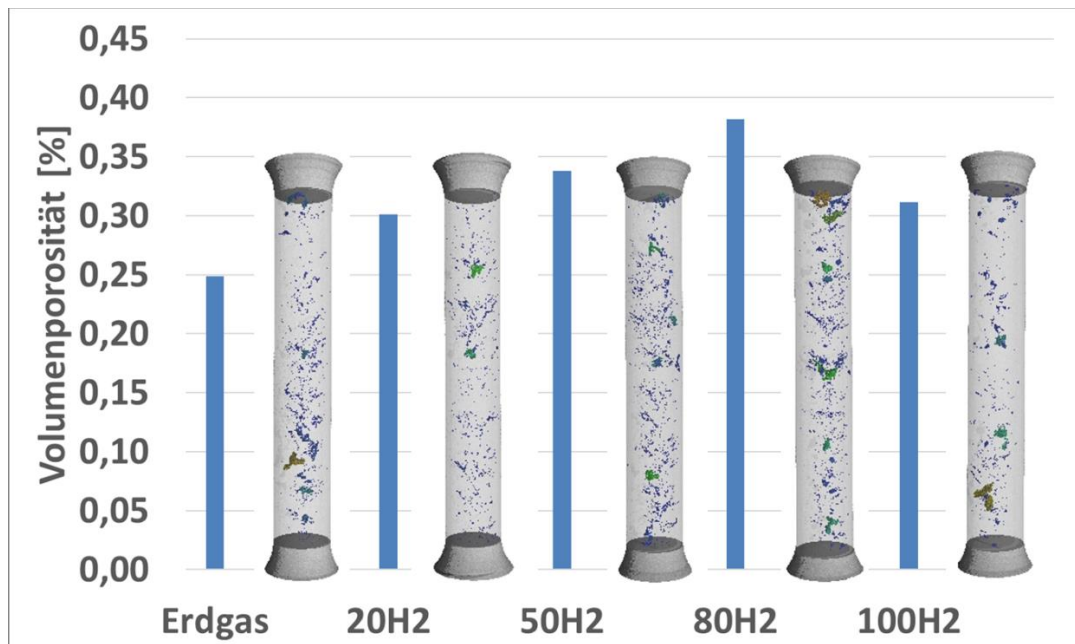


Abbildung 3-54: Ermittelte mittlere Volumenporosität in Abhängigkeit vom eingesetzten Brenngas der Langzeitexperimente (Quelle: OvGU)

Mechanische Kennwerte

Die nahezu horizontalen Verläufe der Kennwerte aus dem Zugversuch weisen darauf hin, dass keine Beeinflussung der mechanischen Festigkeit durch Variation des Wasserstoffzumischgrades beim Schmelzen sowie anschließenden Halten der Legierung A6060 im schmelzflüssigen Zustand bei 720 °C in wasserdampfhaltigen Atmosphären stattfindet, siehe **Abbildung 3-55**.

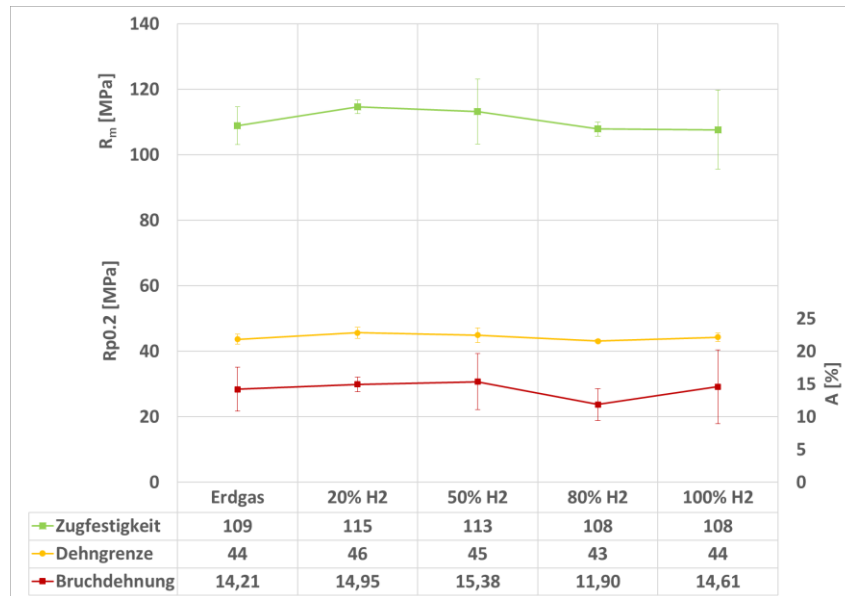


Abbildung 3-55: Auftragung der ermittelten mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch der Langzeitexperimente mit der Schmelzwanne und der Legierung EN AW-A6060 (Quelle: OvGU)

Abgaszusammensetzung

Analog zu den Ergebnissen der Abgasanalyse in Kap. 3.4.2 konnte eine bis zu 50-prozentige Reduktion des CO₂-Gehaltes im Abgas bei einer Zumischrate von 80 Vol.-% H₂ ins Brenngas nachgewiesen werden. Jedoch zeigte sich auch bei diesen Messungen ein erheblicher Anstieg der NO_x-Werte ab einer Zumischrate von größer als 70 - 80 Vol.-% Wasserstoff, vgl. **Abbildung 3-56**.

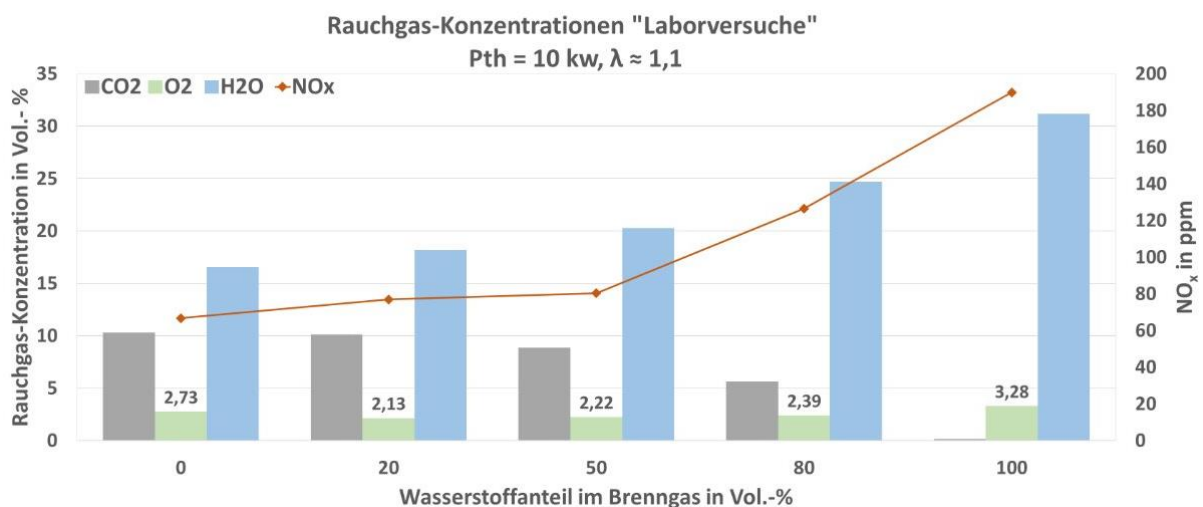


Abbildung 3-56: gemessene Rauchgaskonzentrationen der Langzeitexperimente (Quelle: GWI)

3.5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Einfluss verschiedener Erdgas-/Wasserstoff-Mischungsverhältnisse als Brenngas mit bis zu 100 Vol.-% Wasserstoff auf den Schmelzprozess und die Materialqualität (Porosität und mechanische Eigenschaften) beim Schmelzen von Sekundäraluminium wurden untersucht. Es ergaben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Der ermittelte Dichteindex beim Schmelzen mit 100 Vol.-% Erdgas ist vergleichbar mit dem bei Wasserstoffbeimischungen und steigt bei Verwendung von 100 Vol.-% Wasserstoff leicht an.
- Die Annahme, dass die Porosität im Gussstück mit der Zugabe von Wasserstoff zum Brenngas zunimmt, konnte nicht bestätigt werden. Es wurde kein signifikanter Einfluss bzw. Unterschied durch Wasserstoffbeimischung bei den Schmelzversuchen auf die Materialporosität festgestellt.
- Die Schmelzversuche ergaben keinen signifikanten Einfluss der Erdgas-/Wasserstoffmischungen, bis zu 100 Vol.-% Wasserstoff, auf die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung).
- Die nachgelagerten Langzeitexperimente, die mit 4 Stunden Haltezeit unter realer Verbrennungsatmosphäre zeitlich an den industriellen Einschmelzprozess angelehnt sind, ergaben eine Zunahme des Wasserstoffgehalt innerhalb der Schmelze je nach Brenngasgemisch. Es konnte jedoch kein Einfluss des Brenngasgemisches auf sich ergebende Porosität und die ermittelten mechanische Eigenschaften nachgewiesen werden.
- Die chemische Analyse der gegossenen Proben konnte keinen Abbrand von Legierungselementen nachweisen.
- Mit steigendem Wasserstoffanteil im Brenngas von 20 Vol.-% bis 100 Vol.-% sinken die CO₂-Emissionen stetig und erreichen bei reinem Wasserstoff (100 Vol.-%) Null, was das hohe Dekarbonisierungspotenzial unterstreicht.
- Die NO_x-Emissionen steigen ab einer Mischrates zwischen 70 - 80 Vol.-% H₂, insbesondere bei 100 % H₂, sprunghaft an. Was durch die hohen Flammentemperaturen und verstärkter Bildung von thermischen Stickstoffoxiden bedingt ist.
- Die Langzeitmessungen ergaben, dass die Beträge des in der Schmelze gemessenen gelösten Wasserstoffgehaltes mit zunehmenden Wasserdampfanteil im Brenngas steigen. Es wird darauf geschlossen, dass entweder die atmosphärischen Bedingungen (Wasserdampfgehalt im Abgas) während des Schmelzens oder der gebundene Wasserstoffgehalt im Ausgangsmaterial maßgeblich den Wasserstoffgehalt nach dem Schmelzen definieren.

3.6 Abbildung des Wasserstoffeinflusses mittels Simulationsmodul

Die Zumischung von Wasserstoff ins Brenngas beim Schmelzen von Aluminium zeigte, dass der Wasserstoffanteil im Brenngas weder die Porosität noch die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit oder die chemische Zusammensetzung der Legierung beeinflusst hat. Daher

konnten aus den Schmelzversuchen keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden, die in die Simulation zurückgeführt werden könnten. Lediglich die Langzeitversuche zeigten eine erhöhte Aufnahme von gelöstem Wasserstoff in der Schmelze. Diese führte jedoch zu keiner signifikanten Veränderung der Gussteilqualität, was darauf hindeutet, dass der Einsatz von Wasserstoff unter den untersuchten Bedingungen unkritisch für die Materialeigenschaften bleibt. Im Folgenden werden Maßnahmen zur kontrollierten Einstellung bzw. Reduktion eines erhöhten Wasserstoffgehaltes aufgeführt.

3.7 Gegenmaßnahmen der Wasserstoffaufnahme

In diesem Projekt wurde die Legierung EN-AW-6060 des Projektpartners HMT untersucht. Wie berichtet, konnten hier keine nennenswerten Einflüsse der Wasserstoffanwendung als Brenngas für die Beheizung der Schmelzbrenner nachgewiesen werden.

Während des gesamten Projektes wurden parallel zu den eigenen Arbeiten kontinuierlich Recherchen durchgeführt, wobei auch Erkenntnisse anderer Projektteams (auch aus dem Ausland) betrachtet wurden.

Aus einem Austausch mit der Universität Leoben, wo ebenfalls Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstoff auf Aluminiumschmelzen (allerdings andere Legierungen und als Auftragsarbeit für einen Aluminium-Produzenten) untersucht wurden, zeigten sich bei einigen der dort untersuchten Legierungen Ansätze von Anreicherung von Wasserstoff in der Schmelze.

Insbesondere bei höheren Gehalten von Magnesium in der Legierung traten dort bei den Versuchen Wasserstoffanreicherungen auf. Allerdings ist der dort verwendete Versuchsaufbau gegenüber den im vorliegenden Projekt H2-Alu verwendeten Methodik dahingehend unterschiedlich, dass dort ein synthetisches Abgas erzeugt wurde und für die Untersuchungen beim Schmelzen und bei Langzeitbeobachtungen eingesetzt wurde. Im vorliegenden Projekt H2-Alu wurden hingegen reale Verbrennungsabgase durch direkte Verbrennung von Wasserstoff bzw. mit Wasserstoff angereichertem Erdgas erzeugt und sowohl in den Schmelzversuchen als auch in den Langzeituntersuchungen eingesetzt.

Da im vorliegenden Förderprojekt H2-Alu auch die Übertragbarkeit auf die allgemeine Sekundäraluminiumwelt Teil der Aufgabe ist, und es sich durchaus ergeben kann, dass HMT in Zukunft vielleicht noch andere Legierungen einsetzen möchte, wurde das Aufgabenspektrum des Projektes auch um die Untersuchung erweitert, wie eine metallurgische Nachbehandlung bzw. eine Reduktion einer stattgefundenen Wasserstoffanreicherung umgesetzt werden könnte.

Dazu wurde am konkreten Beispiel HMT untersucht, wie eine Gasbehandlungseinrichtung, ein sogenannter Entgaser, und eine Filtration des Metalls durch einen Keramik-Schaumfilter (meist als CFF bezeichnet) in die Prozesskette hinzugefügt werden könnte.

Für die Integration einer metallurgischen Behandlung können Geräte eingesetzt werden, in denen mittels einer Einblasung von Argon (Ar) oder Stickstoff (N) eine Reduktion der Wasser-

stoffgehalte der Schmelze erfolgt. Es gibt auch Anwendungen, wo mittels zusätzlicher Zumi-
schung von Chlor gearbeitet wird, dies bedarf aber höchst komplexer Geräte sowie einer Zu-
lassung für den Einsatz von Chlor, der aber mehr und mehr aus den Gießereien verbannt wird.
Eine metallurgische Behandlung sollte möglichst kurz vor dem Gießprozess erfolgen, also zwi-
schen dem Gießofen und der Gießanlage.

Um der Gasreaktion genügend Zeit und Raum zu geben, werden meist Box-ähnliche mit Feu-
erfestmaterial ausgekleidete und beheizte Entgasungsgeräte eingesetzt. Diese sind mit meist
2 oder mehr Kammern ausgestattet, um der durchfließenden Schmelze genügend Verweilzeit
unter Einfluss des Behandlungsgases zu geben. Durch einen Rotor, der in die Schmelze ein-
taucht wird, werden kleine Gasblasen erzeugt, die dem Reinigungsprozess dienen. Die Größe
der Kammern bzw. die Anzahl der Kammern ist abhängig von der Durchsatzmenge an
Schmelze pro Zeiteinheit und muss auf die jeweilige Anwendung ausgelegt werden.

Am Beispiel des Anlagenlayouts von HMT wurde die grundsätzliche bauliche Lage unter den
Aspekten der Arbeitssicherheit, den vor Ort herrschenden baulichen Gegebenheiten und den
prozessbedingten Randbedingungen untersucht.

Eine metallurgische Behandlungsstrecke ist nicht überall Bestandteil einer Aluminiumprozess-
kette, daher ist die Untersuchung auf Ausführbarkeit wichtig, um Platzbedarf und andere As-
pekte wie Arbeitssicherheit und Wartungsfreundlichkeit zu bestimmen.

Ausgehend von einem bestehenden Layout, **Abbildung 3-57** wurden zunächst die baulichen
Einschränkungen untersucht.

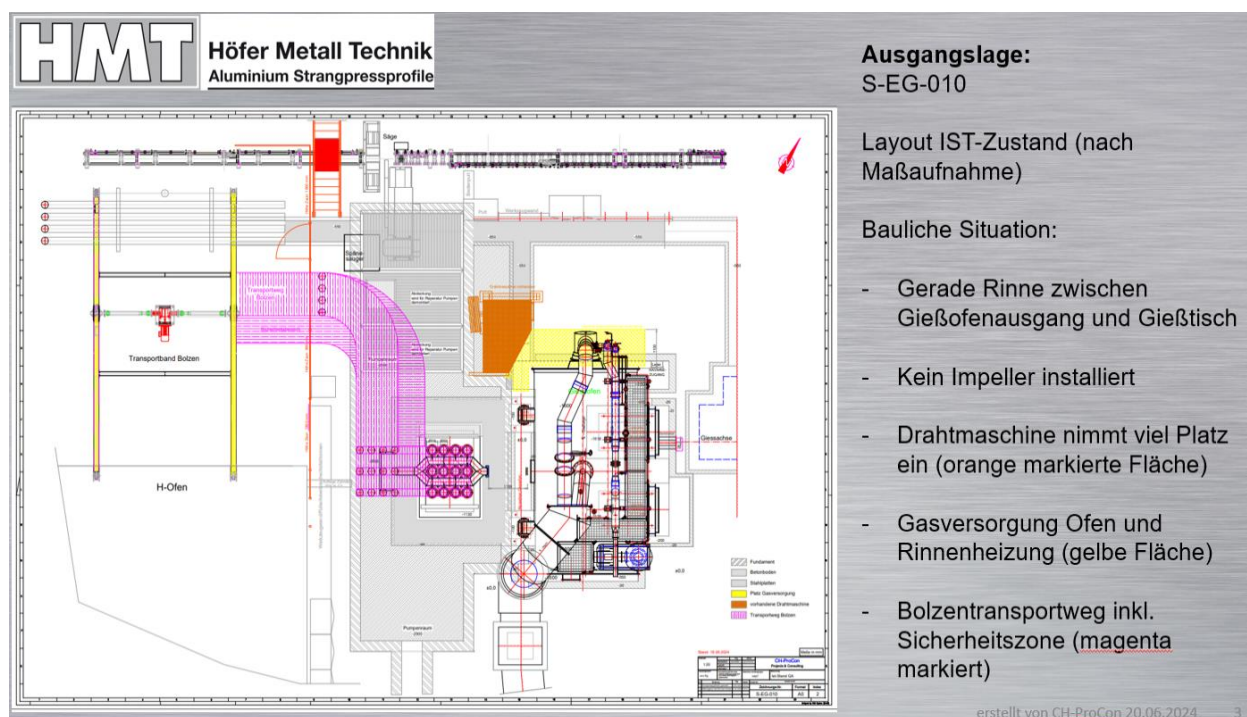


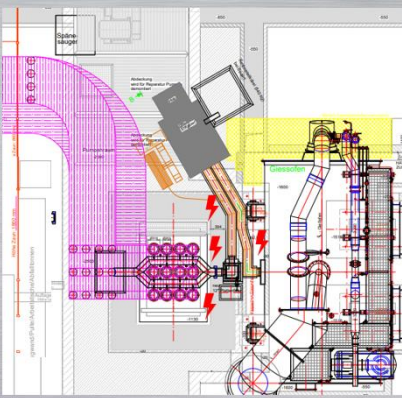
Abbildung 3-57: Ausgangssituation Layout Gießofen bis Gießanlage (Quelle: HMT)

Auf Grund der baulichen Situation und dem Flächenbedarf für Bolzentransport und Medienversorgungsbereichen ergibt sich, dass für die Implementierung von Entgaser und CFF Einschränkungen bestehen, die Einfluss auf die Aufstellung der Geräte und die Verbindungsrinnen zwischen Gießöfen, den Geräten und dem Gießtisch haben.

Im Laufe der Untersuchungen wurden mehrere Layout-Varianten entworfen und unter den folgenden Aspekten beurteilt:

- Zugänglichkeit für regelmäßige Tätigkeiten wie Reinigen nach jedem Abguss
- Arbeitssicherheit, unter anderem:
 - Muss über heiße Flächen gegriffen werden?
 - Gibt es Fluchtwege in Gefahrensituationen?
- Wartungsfreundlich
- Baulich umsetzbar bzw. mit wenigen baulichen Anpassungen realisierbar
- Geringst-möglicher Kompromiss für die bisherigen täglichen Arbeitsweisen

Nachfolgend sind Auszüge aus den untersuchten Layout-Varianten, **Abbildung 3-58** und **Abbildung 3-59** aufgeführt.



HMT Höfer Metall Technik
Aluminium Strangpressprofile

Variante 3: Zeichnung S-EG-023

Grundlagen:

- Neuer Entgaser mit Ein- und Ausgang frontseitig
- Neuer CFF 12" wird „über Eck“ durchströmt
- Restmetall-Behälter für Stapler zugänglich positioniert
- Modifizierte Drahtmaschine oder neue Maschine erforderlich

Aspekt Bauliche Situation:

Positiv:

- Keine Kollision zwischen Ofen und Entgaser beim Kippen
- Keine Änderung Verteiler Gießtisch

Negativ:

- Entgaser steht deutlich auf Abdeckplatte (HMT muss prüfen, ob die Abdeckplatte ggf. gekürzt werden kann und ob dann der Zugang zum Pumpenraum noch ausreicht)
- Vorhandene Drahtmaschine muss stark modifiziert werden oder eine neue Maschine muss angeschafft werden
- Drahtmaschine steht teilweise auf Abdeckplatte Pumpenraum, muss für Zugang demontiert werden (Position kann ggf. noch optimiert werden)
- Gasanschl. für Rinnenbeheizung muss geändert werden

Aspekt Arbeitssicherheit

Positiv:

- Entgaser rundum erreichbar
- Bolzentransportweg fast ganz kollisionsfrei möglich (nur eine kleine Überlappung zwischen Drahtmaschine und Sicherheitszone)

Negativ:

- Bereich zwischen Ofenausgang und Kipplager nicht erreichbar
- Rinne Ofenausgang – Entgaser im Bereich Ofenausgang – Kipplager nur durch „Übergreifen“ erreichbar
- Ofenausg. nur von einer Seite zugänglich
- CFF nur von engem Durchgang bedienbar bzw. wenig Raum um CFF
- Bereich zwischen Gießtisch und Rinne Entgaser – CFF sehr eng (< 500 mm, damit nach Arbeitssicherheits-Richtlinie nicht zulässig)
- Teile des Rinnensystems sind nur durch „Übergreifen“ erreichbar

Zusammenfassung:
Diese Lösung ist mit erheblichen Einschränkungen der Arbeitssicherheit sowie erheblichen baulichen Kompromissen versehen und daher nicht empfohlen

Umsetzung nicht empfohlen

erstellt von CH-ProCon 20.06.2024 7

Abbildung 3-58: Anordnung von Entgaser und CFF - Variante 3 (Quelle: HMT)

Nach Betrachtung aller Entwürfe wurde, sollte sich die Notwendigkeit einer Implementierung von Entgaser und CFF ergeben, eine Layout-Variante als bevorzugte Lösung ausgewählt und unter den oben genannten Aspekten als realisierbar bestimmt.

Die **Abbildung 3-60** zeigt die mögliche Variante, die aber noch hinsichtlich der Metallführung auf dem Gießtisch zu einem späteren Zeitpunkt final optimiert werden muss, um eine gleichmäßige Befüllung der einzelnen Kokillen zu erreichen. Dazu muss dann Layout / Anordnung der Kokillen auf dem Gießtisch optimiert werden.

HMT Höfer Metall Technik
Aluminium Strangpressprofile

Variante 4: Zeichnung S-EG-024

Grundlagen:

- Neuer Entgaser mit Ein- und Ausgang frontseitig
- Neuer CFF 12" wird „über Eck“ durchströmt
- Restmetall-Behälter für Stapler zugänglich positioniert
- Modifizierte Drahtmaschine oder neue Maschine erforderlich

Aspekt Bauliche Situation:

Positiv:

- Keine Kollision zwischen Ofen und Entgaser beim Kippen
- Keine Änderung Verteiler Gießtisch
- Entgaser steht nur minimal auf Abdeckplatte (HMT muss prüfen, ob die Abdeckplatte ggf. gekürzt werden kann und ob dann der Zugang zum Pumpenraum noch ausreicht)

Negativ:

- Vorhandene Drahtmaschine muss stark modifiziert werden oder eine neue Maschine muss angeschafft werden
- Drahtmaschine steht auf Abdeckplatte Pumpenraum, muss für Zugang demontiert werden
- Gasanschluß für Rinnenbeheizung muss geändert werden

Aspekt Arbeitssicherheit

Positiv:

- Entgaser rundum erreichbar
- Bolzentransportweg kollisionsfrei möglich
- CFF ist gut bedienbar

Negativ:

- Bereich zwischen Ofenausgang und Kipplager nicht erreichbar
- Rinne Ofenausgang – Entgaser im Bereich Ofenausgang – Kipplager nur durch „Übergreifen“ erreichbar
- Ofenausguß nur von einer Seite zugänglich
- „Tot-Raum“ zwischen CFF, Entgaser und Rinne
- Bereich zwischen Gießtisch und CFF bzw. Durchgang eng (knapp < 500 mm, damit nach Arbeitssicherheits-Richtlinie nicht zulässig)
- Teile des Rinnensystems sind nur durch „Übergreifen“ erreichbar

Zusammenfassung:
Diese Lösung ist mit einigen Einschränkungen der Arbeitssicherheit verbunden, es muss abgewogen werden, ob die Kompromisse akzeptabel sind, daher ist diese Aufstellung nur bedingt empfohlen

Umsetzung nur unter Einschränkungen möglich

erstellt von CH-ProCon 20.06.2024 8

Abbildung 3-59: Layout Anordnung Entgaser und CFF – Variante 4 (Quelle: HMT)

HMT Höfer Metall Technik
Aluminium Strangpressprofile

Variante 1: Zeichnung S-EG-021

Grundlagen:

- Neuer Entgaser mit Ein- und Ausgang frontseitig
- Neuer CFF 12" gerade durchströmt
- Restmetall-Behälter für Stapler zugänglich positioniert
- Modifizierte Drahtmaschine oder neue Maschine erforderlich

Aspekt Bauliche Situation:

Positiv:

- Keine Kollision zwischen Ofen und Entgaser beim Kippen
- Entgaser steht nur minimal auf Abdeckplatte (HMT muss prüfen, ob die Abdeckplatte ggf. gekürzt werden kann und ob dann der Zugang zum Pumpenraum noch ausreicht)

Negativ:

- Vorhandene Drahtmaschine muss stark modifiziert werden oder eine neue Maschine muss angeschafft werden
- Drahtmaschine steht auf Abdeckplatte Pumpenraum, muss für Zugang demontiert werden
- Verteiler Gießtisch muss modifiziert werden
- Gasanschluß für Rinnenbeheizung muss geändert werden

Aspekt Arbeitssicherheit

Positiv:

- Entgaser rundum erreichbar
- CFF gut bedienbar
- Rinnen zugänglich für Reinigung und Reparatur (Zugang / Durchgang ist > 500 mm)
- Kein „Übergreifen“ über heiße Rinnen
- Bolzentransportweg kollisionsfrei möglich

Negativ:

- Bereich zwischen Ofenausgang und Kipplager nicht erreichbar
- Ofenausguß nur von einer Seite zugänglich

Zusammenfassung:
Diese Lösung kann mit kleinen Einschränkungen der Arbeitssicherheit und mit Änderung Verteiler Gießtisch umgesetzt werden, sofern die aufgezeigten Kompromisse akzeptabel sind.

Umsetzung ist mit kleinen Einschränkungen möglich

erstellt von CH-ProCon 20.06.2024 4

Abbildung 3-60: Layout Anordnung Entgaser und CFF – bevorzugte Variante (Quelle: HMT)

Fazit: Gegenmaßnahmen

Die grundsätzliche Machbarkeit einer Implementierung von Entgaser und CFF unter Einbeziehung der vorausgesetzten Parameter ist damit aufgezeigt.

In einem weiteren Schritt erfolgten die detaillierte Auslegung und Abstimmung mit Herstellern solcher Anlagen.

3.8 CO₂ Einsparpotentiale

Im Zusammenhang mit der Feuerung von Erdgas/Wasserstoffgemischen stellt sich meist auch die Frage nach der erzielbaren CO₂-Einsparung. Hierbei ist es wichtig, zwischen der energetischen Zumischung und der volumetrischen Zumischung zu unterscheiden. Die **Abbildung 3-61** verdeutlicht die Zusammenhänge. Anhand der Grafik wird deutlich, dass eine volumetrische Substitution des Erdgases durch Wasserstoff nicht zu einer Einsparung fossiler Energie in gleicher Größenordnung führt. Bei einem volumetrischen H₂-Anteil im Erdgas in Höhe von beispielsweise 10 % werden lediglich etwa 3 % der durch das Erdgas freigesetzten fossilen Energie eingespart. Ursächlich hierfür ist der gegenüber Erdgas um etwa den Faktor drei geringere volumetrische Heizwert des Wasserstoffs

Die erreichbare CO₂-Einsparung ist proportional zur Einsparung der fossilen Energie, was anhand der **Abbildung 3-61** deutlich wird.

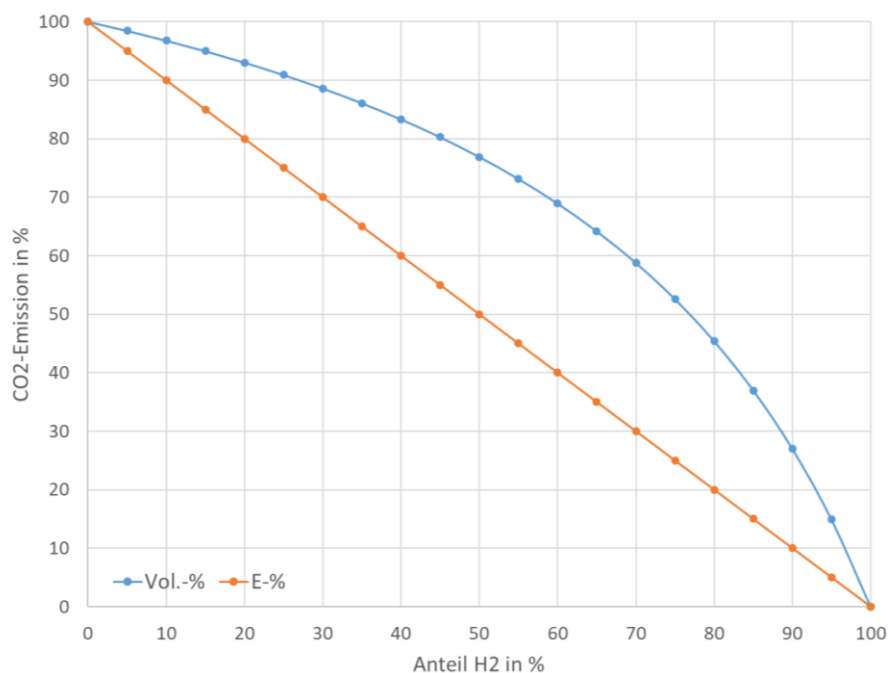


Abbildung 3-61: CO₂-Emissionen bei energetischer und volumetrischer Erdgassubstitution durch H₂ (Quelle: GWI)

Die Datenlage für die CO₂-Emissionen verbessert sich stetig, ist aber noch nicht auf den Stand das man aktuelle Zahlen oder Produktionszahlen aus dem Jahr 2023 bzw. 2024 ermittelten

kann, deswegen wurden Zahlen für das Jahr 2020 betrachtet. Für die Berechnungen der potenziellen CO₂-Reduktion wurde die in Deutschland produzierte Menge von Sekundäraluminium (Remelter) im Jahre 2020 verwendet [21]. Die 2.440.000 t wurden anschließend mit dem Faktor von 14 Prozent verrechnet, um die Menge von Sekundäraluminium zu ermitteln, die für das Strangpressen verwendet wird [22]. Die thermische Energie, die benötigt wird, um ein Halbzeug fürs Strangpressen herzustellen, beinhaltet 1.135,5 kWh/t_{Al} [22]. Darin sind 3 Öfen enthalten Schmelzofen, Warmhalteofen und Homogenisierungsöfen. Die Treibhausgasemissionen von grünem Wasserstoff werden maßgeblich durch die vorgelagerten Emissionen der Stromerzeugung beeinflusst. Je nach Standort der Wasserstoffproduktion können auch die Emissionen durch den Pipelinetransport eine Rolle spielen.

Bei der Herstellung von grünem Wasserstoff aus Photovoltaik-Strom sind insbesondere die vorgelagerten Emissionen der PV-Modulproduktion relevant. Der CO₂-Fußabdruck von PV-Strom variiert dabei erheblich je nach Herkunft der Module: So verursachen Module, die 2020 in China gefertigt wurden, etwa 1,75-mal höhere Emissionen als in Europa hergestellte Module. Dieser Unterschied ist hauptsächlich auf den jeweiligen Strommix in den Produktionsländern zurückzuführen [23].

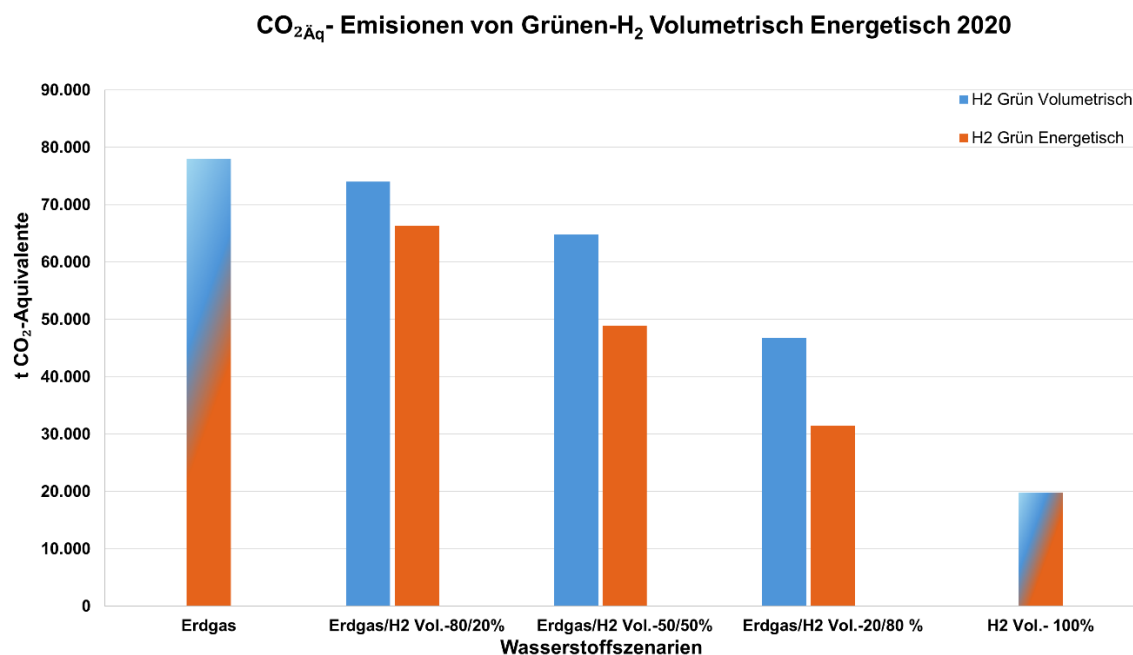


Abbildung 3-62: CO₂-Emissionen bei der Produktion von Sekundäraluminiumhalbzeug für die Strangpressindustrie: Vergleich volumetrischer und energetischer Betrachtung für Wasserstoffszenarien im Jahr 2020, berechnet mit Daten [23], [24]

Die **Abbildung 3-62** stellt die CO₂-Emissionen für den oben beschriebenen Fall von Sekundäraluminiumhalbzeug in der Strangpressindustrie dar und vergleicht dabei die volumetrische und energetische Betrachtung für verschiedene Wasserstoffszenarien im Jahr 2020.

Die Gesamtemissionen für die Herstellung des Sekundäraluminiumhalbzeuges beträgt ca. 78.000 t CO₂-Äq. Für den Fall einer Wasseranreicherung von 20 % in Erdgas sieht man eine Differenz 7.700 t CO₂-Äq zwischen den unterschiedlichen Betrachtungsarten, ca. 10 %.

Die Unterscheidung zwischen volumetrischer und energetischer Betrachtung ist nur in Szenarien relevant, in denen gemischte Anteile von Wasserstoff und Erdgas vorliegen. Bei reinem Erdgas (100 %) und reinem Wasserstoff (100 %) entfällt diese Differenzierung.

Im weiteren Verlauf sollen die CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Produktionsarten von Wasserstoff dargestellt und miteinander verglichen werden. Bei blauem und türkischem Wasserstoff spielen die Vorkettenemissionen des verwendeten Erdgases oder Methans eine entscheidende Rolle für die Gesamt-Treibhausgasemissionen der Wasserstoffproduktion [23]. Die Abbildung verdeutlicht, dass das CO₂-Reduktionspotenzial stark von der H₂-Produktionsart abhängt. Grüner Wasserstoff erzielt die stärkste Emissionsreduktion auf ca. 25 % zum Vergleich mit Erdgas, während bei blauem und türkischem Wasserstoff die Emissionen zwar ebenfalls sinken, jedoch aufgrund der Produktionsprozesse höher bleiben.

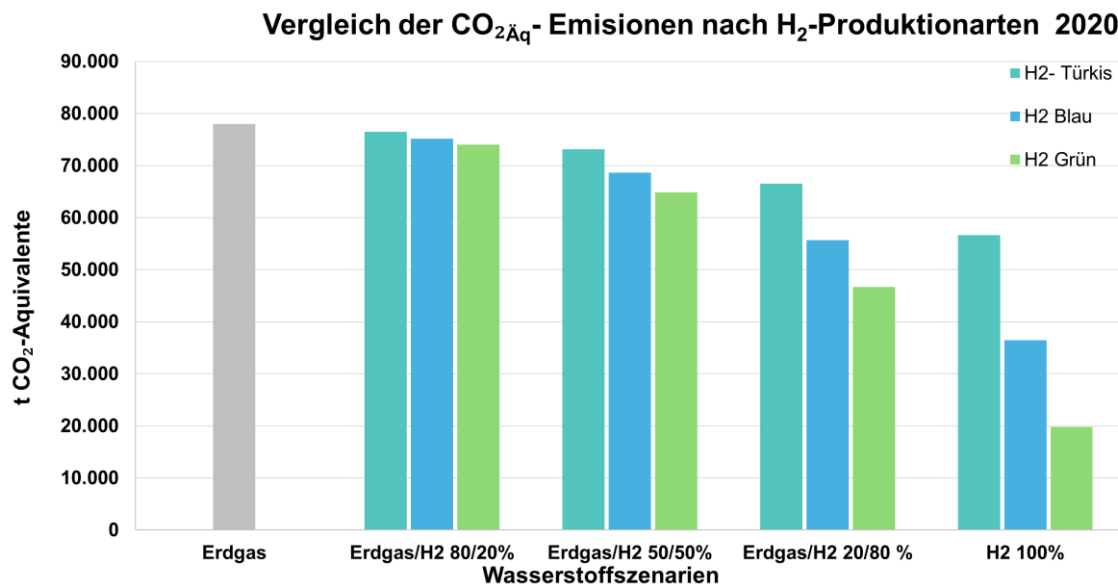


Abbildung 3-43: CO₂-Emissionen bei den unterschiedlichen H₂-Produktionarten für die Strangpressindustrie im Jahr 2020 , berechnet mit Daten [23], [24]

Die **Abbildung 3-63** verdeutlicht, dass die Verwendung von Wasserstoff mit aktuellen Technologien eine Reduktion der CO₂-Emissionen ermöglicht. Bei den Szenario Erdgas/H₂ 20/80 % sinkt der Anteil der CO₂-Emissionen zwar, jedoch führen die Vorkettenemissionen von grünem Wasserstoff lediglich zu einer Gesamtreduktion der Emissionen um rund 5 %. Bei einer Weiterentwicklung der Technologien und dem vollständigen Einsatz von Wasserstoff (100 %) ist es hypothetisch möglich, die jährlichen CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 auf etwa 7,2 t CO₂-Äquivalente zu reduzieren, siehe **Abbildung 3-64**.

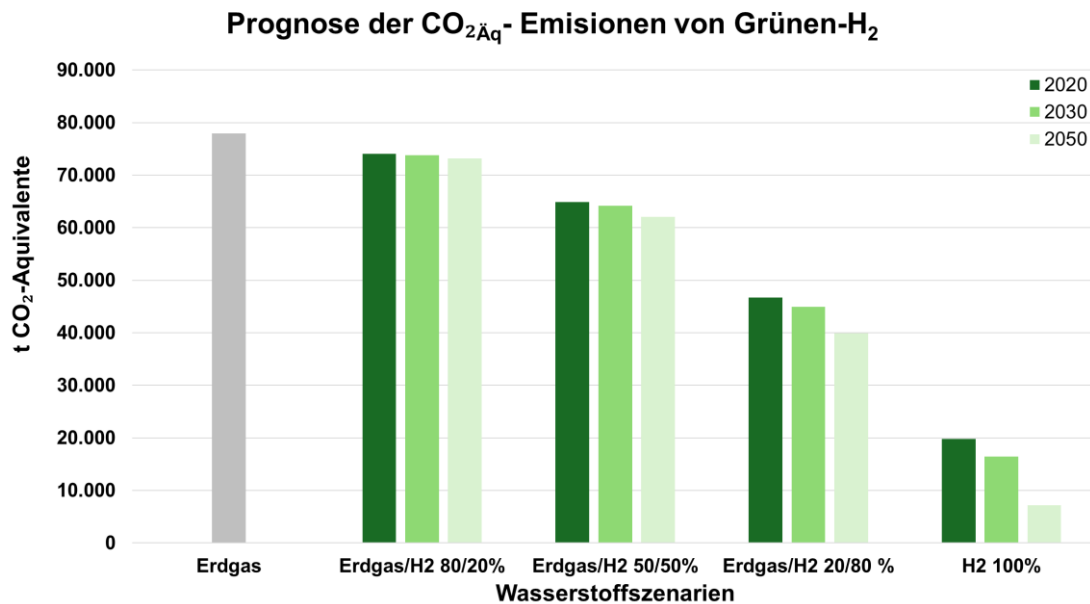


Abbildung 3-64: Prognostizierte CO₂-Emissionen für verschiedene grüne Wasserstoffszenarien im Vergleich zu reinem Erdgas an drei Zeitpunkten: 2020, 2030 und 2050, Volumetrische Aufteilung berechnet mit Daten [23]

Die Analyse zeigt, dass die Verwendung von Wasserstoff in Erdgas-Wasserstoff-Gemischen signifikantes Potenzial zur Reduktion von CO₂-Emissionen bietet. Dabei ist die Unterscheidung zwischen volumetrischer und energetischer Betrachtung essenziell, da volumetrische Substitutionen aufgrund des geringeren Heizwerts von Wasserstoff nur eine proportionale Einsparung fossiler Energie ermöglichen. Die CO₂-Emissionen sind stark von der Wasserstoffproduktionsart abhängig: Grüner Wasserstoff bietet das höchste Einsparpotenzial, während bei blauem und türkisem Wasserstoff die Vorkettenemissionen aus der Erdgas- oder Methanaufbereitung die Einsparungen begrenzen. Beispielsweise führt ein Gemisch von 20 % Wasserstoff im Erdgas zu einer Reduktion der Emissionen um lediglich 5 %, was die Bedeutung technologischer Weiterentwicklungen unterstreicht. Perspektivisch könnten durch einen vollständigen Übergang zu Wasserstoff und optimierte Technologien die jährlichen CO₂-Emissionen deutlich gesenkt werden.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit in Hinsicht auf den zahlenmäßigen Nachweis

Im Bearbeitungszeitraum wurden die Arbeiten abweichend zum Arbeitsplan angepasst. Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Die Arbeiten in AP 2 wurde reduziert, da sich wie erläutert keine signifikanten Änderungen der Materialeigenschaften bei einer H₂-Zumischung ergaben, die eine Ableitung von Parametern für das Simulationsmodell ermöglichten. Dafür wurde der Umfang der messtechnischen Untersuchungen zur Beeinflussung der Aluminiumqualität durch H₂-Zumischung in den Brennstoff deutlich erhöht. Zuerst wurden die Versuche mit einer angepassten Schmelzwanne und einem weiteren Messgerät (Hycal), welches im Rahmen des Projektes zusätzlich angeschafft wurde, nochmal durchgeführt und dann wurden Langzeitversuche, die nicht vorgesehen waren, ergänzend durchgeführt, um die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren.

Die für dieses Projekt eingeplanten Ressourcen hinsichtlich des zahlenmäßigen Nachweises, wurden ausgeschöpft. Die angestrebten Ergebnisse wurden im Laufe des Vorhabens erreicht. Für die durchgeführten theoretischen und praktischen Arbeiten waren die eingeplanten Mitarbeiter (Techniker und Ingenieure) der beteiligten Forschungspartner im beantragten Umfang tätig. Die eingeplanten Kosten für Geräte und Verbrauchsmaterialien wurden vollumfänglich benötigt und ausgegeben.

5 Fortschreibung des Verwertungsplans

Das Projekt und erste Ergebnisse wurden auf folgenden Tagungen/Messen/Konferenzen, auf Webseiten und in folgenden Zeitschriften vorgestellt und veröffentlicht:

- Projektsteckbrief unter: https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd._Projekte/Jahr_2019/Projektsteckbrief_AdReku.pdf
- Projektsteckbrief unter: <https://www.home-of-foundry.de/news/neues-projekt-einfluss-von-wasserstoff-bei-der-herstellung-und-verarbeitung-von-sekundaeraluminium-1323>
- Projektsteckbrief: Regenerativer Wasserstoff für Sekundäraluminium, Giesserei, Jahrgang 110, Ausgabe 1, 01-2023, S. 10, Hrsg. BDG
- Präsentation bei der 1. Statuskonferenz von KlimPro-Industrie - Neue Wege der Industrie zur Klimaneutralität: H2-Alu - Werkstoffliche Grundlagenuntersuchungen für den Einsatz von regenerativem Wasserstoff bei der Herstellung von Sekundäraluminium, 26. - 27. April 2023, EUREF-Campus, Berlin
- Zeitschriftenbeitrag: Gas/hydrogen blends as fuel to produce secondary aluminium, International Aluminium Journal - Hannover: Giesel, Bd. 100 (2024), Heft 1-2, S. 60-65
- Posterbeitrag, „The H2-Alu project: Fundamental material investigations for the use of renewable hydrogen in the production of secondary aluminum – KlimPro“, Industriemesse „Aluminium“, 08. -10. Oktober 2024, Düsseldorf
- Präsentation bei der 2. Statuskonferenz von KlimPro-Industrie - Neue Wege der Industrie zur Klimaneutralität: H2-Alu - Werkstoffliche Grundlagenuntersuchungen für den Einsatz von regenerativem Wasserstoff bei der Herstellung von Sekundäraluminium, 12. - 13. November 2024, Brauturm im Dortmunder U, Dortmund

Weiterhin sind folgende Veröffentlichungen geplant:

- Abschlussbericht auf den Webseiten der Forschungspartner
- Zeitschriftenbeitrag im „International Journal of Metalcasting“ (Open-access)
- Posterbeitrag bei der H2MSE 2025
- Vortrag bei der Werkstoffwoche 2025 der DGM

Es wurde keine Patentanmeldung seitens der Forschungspartner durchgeführt.

6 Ergebnisse von dritter Seite (Literatur etc.)

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung sind den Forschungspartnern folgende neuen Literaturquellen Dritter bekannt, welcher aber in Komplexität und Fertigungsverfahren keine Überschneidungen zum vorliegenden Forschungsvorhaben aufweisen.

Die Ergebnisse aus den aufgeführten Literaturquellen sind nicht den hier vorliegenden Ergebnissen gegenübergestellt und vergleichbar, da sowohl nicht alle Daten vollständig vorlagen als auch die Herangehensweise eine andere war, z. B. wurde mit synthetisch hergestellten Atmosphären gearbeitet.

- S. Tichy: Effects of the atmosphere on melt quality and oxidation of aluminium-magnesium melts. Vortrag auf Light Metals Expert Meeting, Hamburg 2023
- S. Tichy: Mechanism of hydrogen absorption from H₂O in aluminium melts. Vortrag auf Light Metals Expert Meeting, Maasmechelen 2024

7 Literatur

- [1] Gesamtverband der Aluminiumindustrie,
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156039/umfrage/weltweite-aluminiumnachfrage-seit-2006/> [18.11.2020]
- [2] Giese, A., Rahms, H.: Optimierung der thermischen Prozessführung beim Recycling von Aluminiumschrott unter Berücksichtigung des Einflusses organischer Anhaftungen auf den Aluminiumabbrand. AiF-Abschlussbericht (IGF-Nr.: 14524 N), 2008
- [3] Hübner, T., Guminski, A., Rouyrre, E., von Roon, S.: Energiewende in der Industrie, Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-metall.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (18.11.2020)
- [4] Boin, U., Linsmeyer, T., Neubacher, Fr., Winter, B.: Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie. Umweltbundesamt, Wien 2002
- [5] http://www.giessereilexikon.com/uploads/tx_d3ency/882-01.jpg (18.11.2020)
- [6] Ostermann, F.: Anwendungstechnologien Aluminium, Springer-Verlag 2014
- [7] Bühring-Polaczek, A., Michaeli, W., Spur, G.: Handbuch Urformen, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [8] Schmitz, Ch.: Handbook of aluminium recycling. Vulkan Verlag GmbH, 2006
- [9] Wünning, J. G., Milani, A.: Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen, Vulkan-Verlag Essen, 2007
- [10] <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/wasserstoffloeslichkeit-725/?L=&cHash=3fb33cdb55421809434093391179007b> [18.11.2020]
- [11] Die Nationale Wasserstoffstrategie: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> (20.11.2020)
- [12] Clearwater International; McKinsey & Berylls Strategy Advisors; Clearwater International; NADCA, aufgerufen über statista
- [13] Tichy, S., Pucher, P., Prillhofer, B., Wibner, S., Antrekowitsch, H. (2023). Hydrogen Absorption of Aluminum-Magnesium Melts from Humid Atmospheres. In: Broek, S. (eds) Light Metals 2023. TMS 2023. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1_122
- [14] J. Leicher, J. Schaffert, S. Carpentier, R. Albus, K. Görner (2020) https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20211124-D2.2_CombustionTheory_fi
- [15] Cheng, P.: Two-Dimensional Radiating Gas Flow by a Moment Method; AIAA Journal, 2 1964, pp 1662-1664.
- [16] Siegel, R.; Howell, J.R.: Thermal Radiation Heat Transfer; Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C., 1992.
- [17] Shah, N.G.: A New Method of Computation of Radiant Heat Transfer in Combustion Chambers; PhD thesis, Imperial College of Science and Technology, London, England, 1979.

- [18] Carvalho, M.G.; Farias, T. Fontes, P.: Predicting Radiative Heat Transfer in Absorbing, Emitting and Scattering Media Using the Discrete Transfer Method; Fundamentals of Radiation Heat Transfer, Volume 160, ASME HTD, 1991, pp 17-26.
- [19] Magnussen, B. F.; Hertjager, B.H.: On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion; In 16th Symp. on Combustion. The Combustion Institute.
- [20] Syvertsen, M., Kvithyld, A., Gundersen, E., Johansen, I., Engh, T.A. (2019). Furnace Atmosphere and Dissolved Hydrogen in Aluminium. In: Chesonis, C. (eds) Light Metals 2019. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_128
- [21] <https://www.aluminiumdeutschland.de/statistiken/produktion-von-rohaluminium/>
- [22] Dr. Tobias Fleiter, Dr. Matthias Rehfeldt, Dr. Simon Hirzel, Lisa Neusel, Dr. Ali Aydemir: CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung, Karlsruhe
- [23] Maximilian Heneka, Friedemann Mörs: Ökologische Bewertung der Wassestoffbereitstellung Sensitivitätsanalyse zu THG-Emissionen von Wasserstoff
- [24] Marius Holst, Stefan Aschbrenner, Tom Smolinka, Christopher Voglstätter, Gunter Grimm: Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis -Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEMand Alkaline Water Electrolysis Systems