

DIPLOMARBEIT

Thema:

Einfluss und Untersuchung der wesentlichen Parameter auf den Gasgehalt in Kupferschmelzen bei Gießereiöfen



Ersteller:

Luca Moderer, BSc

Betreuer:

Dipl.-Ing.Dr.mont. Thomas Messner

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch

Leoben, März 09

Danksagung

Zuallererst danke ich dem Leiter des Instituts für Nichteisenmetallurgie Herrn Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch für die Übertragung der Arbeit.

Großen Dank möchte ich Herrn Dipl.-Ing.Dr.mont. Thomas Messner aussprechen, der immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatte und mir dabei beratend zur Seite stand.

Besonders zu danken habe ich weiters den an der Umsetzung der Arbeit beteiligten Mitarbeitern der Montanwerke Brixlegg AG, im Speziellen Herrn Dipl.-Ing.Dr. Josef Pesl, Herrn Peter Hölzl, Herrn Markus Lengauer und Herrn Archim Lindemann, welche wesentlich zum Gelingen beigetragen haben. Dank letzteren durfte ich auch so manches aus der Umgebung außerhalb des Montanwerkes Brixlegg AG kennen lernen.

Großen Dank an Ing. Martin Münzer, der mir geduldigst bei meinen „Formatier-Problemen“ half.

Herzlichen Dank an meine Eltern, die mir durch ihre finanzielle Unterstützung ermöglicht haben, mein Studium zu beenden. Vor allem möchte ich meinen Eltern für ihr Vertrauen in mich und meine Fähigkeiten danken.

Ebenso aufrichtigen Dank meiner Freundin Ingrid, die stets hinter mir steht.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe,

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum, Unterschrift

Date, Signature

Einfluss und Untersuchung der wesentlichen Parameter auf den Gasgehalt in Kupferschmelzen bei Gießereiofen

Phosphor als Legierungsmittel führt zu einer Herabsetzung des Sauerstoffgehalts im Kupfer, wodurch die mechanischen Eigenschaften verbessert und die Wasserstoffkrankheit und Porositäten vermieden werden. Der Gehalt an Phosphor ist allerdings aufgrund der Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit zu begrenzen.

Die nachfolgende Arbeit beschreibt die Reduzierung des Sauerstoff- und Wasserstoffgehalts durch geeignete Spülgasbehandlungen in der Montanwerke Brixlegg AG. Darüber hinaus kommt es zur Beschreibung der Beziehungen zwischen den Elementen Phosphor, Sauerstoff und Wasserstoff. Zu diesem Zweck fanden ein Rotor der Firma Foseco GmbH und Spülsteine der Firma Zakłady Magnezytowe „ROPCZYCE“ S.A. ihren Einsatz. In mehreren Versuchsreihen und Einzelversuchen wurden die damit erzielten Ergebnisse dem Ist-Zustand in der Gießerei der Montanwerke Brixlegg AG gegenübergestellt. In diesen Experimenten fließen Parameter wie Badtemperatur, Kathodenqualität, Behandlung der Holzkohle, Desoxidationsmittel Calciumhexaborid, Drehzahl des Rotors und Volumenstrom ein.

Influence and investigation of the essential parameters on the gas-concentration in copper-meltdown at foundry-furnaces

Phosphorus as an alloying element decreases the oxygen content of copper. Therefore the mechanical properties are improved and the porosity and reactivity of the hydrogen are reduced. But the phosphorus content has to be limited due to the decreasing of the electrical conductivity.

The following work describes the reduction of the oxygen- and hydrogen content by using suitable gas purging systems in the Montanwerke Brixlegg INC., as well as the relationships between the elements phosphorus, oxygen and hydrogen. For this purpose, a rotor of Foseco Ltd. Company and bottom purging elements of Zakłady Magnezytowe ROPCZYCE S.A. were applied. In several series of investigations and single experiments, the results achieved in that way were compared to the actual situation in the foundry of Montanwerke Brixlegg INC. For the experiments the parameters bath temperature, quality of cathodes, treatment of the charcoal, deoxidant Calciumhexaborid, rotor speed and volume flow were investigated.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	2
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	3
AFFIDAVIT	3
1. EINLEITUNG	1
2. HERSTELLUNG VON SEKUNDÄRKUPFER.....	2
2.1 Schachtofen.....	3
2.2 Konverter	4
2.3 Flammofen.....	5
2.4 Raffinationselektrolyse	6
2.5 Gießerei.....	6
3. VERHALTEN VON PHOSPHOR, SAUERSTOFF UND WASSERSTOFF IM KUPFER.....	7
3.1 Eigenschaften des Phosphors im Kupfer	7
3.2 Sauer- und Wasserstoff	10
3.2.1 Löslichkeitskurve von Wasserstoff in festen und flüssigen Kupfer.....	10
3.2.2 Abhängigkeiten von Sauerstoff und Wasserstoff im Kupfer.....	11
3.2.3 Wasserstoffkrankheit	12
4. STAND DER TECHNIK	13
4.1 Behandlungen aus der Aluminiumindustrie	13
4.1.1 Rotorsysteme.....	13
4.1.1.1 Hycast-System.....	14
4.1.1.2 ALPUR™-System	16
4.1.1.3 RDU-System.....	19
4.1.1.4 ACD-System	19
4.1.1.5 SNIF-System	20
4.1.2 Spüldüsen und Filtration	21
4.1.2.1 MINT-System.....	22
4.1.2.2 MCFS-System	23
4.1.3 Elektromagnetische Abscheidung	23
4.2 Behandlungen aus der Kupferindustrie	25
4.2.1 Vakuumbehandlung	25
4.2.2 Filter- und Spülgasbehandlungen sowie Einsatz von Kohlenstoff.....	32
4.2.3 Vergleich verschiedener Behandlungsmethoden aus der Kupferindustrie.....	39
4.3 Verwendete Spülbehandlungen	47

4.3.1	Impeller.....	47
4.3.2	Bodenspüler.....	49
5.	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	50
5.1	Vorgänge während des Chargierens und des Abgusses.....	52
5.2	Vergleich der Kathodenoberflächenqualität.....	56
5.3	Vorgänge während des Abgusses in der Kokille	58
5.4	Vorgänge während des Abgusses mit dem Impeller	61
5.4.1	FDU-XSR-Rotor.....	61
5.4.2	Vorversuche mit dem Impeller.....	63
5.4.3	Versuchsreihe mit dem Impeller.....	65
5.4.4	Einzelversuch mit dem Impeller und Calciumhexaborid	69
5.4.5	Einzelversuch mit dem Impeller, Calciumhexaborid, schlechte Kathoden und Abdeckkohle	71
5.4.6	Einzelversuch mit Impeller bei Qualität OF 101 certified	75
5.5	Vorgänge während des Abgusses mit Bodenspülern	77
5.5.1	HM3/500	77
5.5.2	Versuchsreihe mit Bodenspüler	77
6.	DISKUSSION	81
6.1	Versuchsreihe für das Abgießen ohne Spülbehandlung.....	81
6.2	Verlauf des Wasserstoffgehalts vor und nach dem Einchargieren.....	82
6.3	Einzelversuche zur Bestimmung des Gasgehalts in der Kokille	82
6.4	Vorversuche mit dem Impeller.....	83
6.5	Versuchsreihe mit dem Impeller.....	83
6.6	Einzelversuch mit dem Impeller und Calciumhexaborid	85
6.7	Einzelversuch mit dem Impeller, Calciumhexaborid, schlechte Kathoden und Abdeckkohle	85
6.8	Einzelversuch mit dem Impeller bei der Qualität OF 101 certified	85
6.9	Versuchsreihe mit Bodenspüler	86
6.10	Vergleich der Gasgehalte über die Abgusslänge	88
6.10.1	Vergleich des Wasserstoffgehalts über die Abgusslänge.....	88
6.10.1.1	Ohne Behandlung.....	88
6.10.1.2	Impeller.....	88
6.10.1.3	Bodenspüler.....	88
6.10.2	Vergleich des Sauerstoffgehalts über die Abgusslänge	88
6.10.2.1	Ohne Behandlung.....	88
6.10.2.2	Impeller.....	89
6.10.2.3	Bodenspüler.....	89
6.11	Vergleich der Behandlungsmethoden	90

6.11.1	Vergleich der Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	90
6.11.2	Vergleich der Phosphor- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	90
6.11.3	Vergleich der Phosphor- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	91
6.11.4	Darstellung des Dichteverlaufs bei OFN- und P 40-Qualitäten und ohne Spülbehandlung	91
6.11.5	Vergleich der Dichte- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	92
6.11.6	Vergleich der Dichte- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	93
6.11.7	Vergleich der Dichte- und Phosphorgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	94
6.11.8	Vergleichende Zusammenfassung in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode	94
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	96
8.	LITERATURVERZEICHNIS	98
9.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	101
10.	TABELLENVERZEICHNIS	103
11.	DIAGRAMMVERZEICHNIS	105
12.	ANHANG	110
12.1	Versuchsreihe für das Abgießen ohne Spülbehandlung	110
12.1.1	Einzelversuche zur Bestimmung des Gasgehalts in der Kokille	114
12.2	Versuche für das Abgießen mit dem Impeller	115
12.2.1	Vorversuche mit dem Impeller	115
12.2.2	Versuchsreihe mit dem Impeller	118
12.2.3	Einzelversuch mit dem Impeller und Calciumhexaborid	146
12.2.4	Einzelversuch mit dem Impeller, Calciumhexaborid, schlechte Kathoden und Abdeckkohle	147
12.2.5	Einzelversuch mit Impeller bei Qualität OF 101 certified	148
12.3	Versuche für das Abgießen mit Bodenspüler	149
12.3.1	Versuchsreihe mit Bodenspüler	149
12.3.2	Einsatz guter und schlechter Kathoden im Vergleich	160
12.4	Vergleich der Gasgehalte über die Abgusslänge	161
12.4.1	Vergleich des Wasserstoffgehalts über die Abgusslänge	161
12.4.1.1	Ohne Spülbehandlung	161
12.4.1.2	Impeller	162
12.4.1.3	Bodenspüler	170
12.4.2	Vergleich des Sauerstoffgehalts über die Abgusslänge	175
12.4.2.1	Impeller	175
12.4.2.2	Bodenspüler	181
12.5	Vergleich der Behandlungsmethoden	185

12.5.1	Vergleich der Wasser- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode.....	185
12.5.2	Vergleich der Phosphor- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode.....	191
12.5.3	Vergleich der Phosphor- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode.....	197
12.5.4	Darstellung des Dichteverlaufs bei OFN- und P 40-Qualitäten und ohne Spülbehandlung.....	203
12.5.5	Vergleich der Dichte- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode.....	204
12.5.6	Vergleich der Dichte- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode.....	210
12.5.7	Vergleich der Dichte- und Phosphorgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode.....	216
12.5.8	Vergleichende Zusammenfassung in Abhängigkeit der Behandlungsmethode ...	222

1. Einleitung

Die Produktpalette der Montanwerke Brixlegg AG umfasst ein Kupfervormaterial in Form von Kathoden und deren anschließendes Einschmelzen und Vergießen zu Rundbolzen und Walzplatten. Durch eine nachfolgende Weiterverarbeitung finden sie ihre Anwendung in der Elektronikindustrie, der Automobiltechnik, der Bauindustrie, dem Maschinen- und Anlagenbau und in High Tech Produkten wie Supraleitungen und Teilchenbeschleuniger. Aus den unterschiedlichen Prozessschritten können weitere Produkte gewonnen werden. Als Beispiel seien hier die Edelmetalle aus der Raffinationselektrolyse genannt.

Die vorliegende Arbeit erläutert die Wirkung des Phosphors und die Beziehungen des Sauer- und Wasserstoffs in Kupferschmelzen in einem Gießereiofen (Kapitel 3). Phosphor als Legierungsmittel führt zu einer Herabsenkung des Sauerstoffgehalts im Kupfer. Die Zugabe darf jedoch eine gewisse Menge nicht überschreiten, da sonst die elektrische Leitfähigkeit herabgesenkt wird. Phosphorgehalte von 100 ppm reduzieren die elektrische Leitfähigkeit um circa 5 %. Die Forderung für niedrigste Sauerstoffgehalte gewährleistet eine Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung. Da mit niedrigsten Sauerstoffgehalten die Bildung von Wasserdampfporen weitgehend vermieden werden kann. Dabei gilt es Sauerstoffgehalte von 0,001 % zu unterschreiten.

Um den Wasser- und Sauerstoffgehalt weiter herabsenken zu können, wird in Kapitel 4 der Stand der Technik für geeignete Spülgasbehandlungen ermittelt. Es werden ebenso Behandlungsarten aus der Aluminiumindustrie herangezogen, da diese zum Teil auch bereits für die Kupferverarbeitung in Verwendung sind.

Im Zuge dieser Arbeit kamen ein Rotor der Firma Foseco GmbH und Spülsteine der Firma Zaklady Magnezytowe „ROPCZYCE“ S.A. zum Einsatz. Dabei wurden die Einflussmöglichkeiten Temperatur, Kathodeneinsatzmaterial, Volumenstrom und Drehzahl berücksichtigt, diese als Parameter deklariert und als solche in der jeweiligen Versuchsreihe für den Impeller bzw. Bodenspüler variiert. Des Weiteren erfolgten Einzelversuche mit dem Impeller, in denen mitunter die Wirkung der Holzkohlendecke, des Desoxidationsmittels Calciumhexaborid und des Kathodeneinsatzmaterials ermittelt werden sollte. Es wurden auch Einzelversuche zur Bestimmung der Vorgänge während des Abgusses in der Kokille durchgeführt. Mit diesen Versuchsreihen und Einzelversuchen werden die damit erzielten Ergebnisse dem Ist-Zustand in der Gießerei der Montanwerke Brixlegg AG gegenübergestellt (Kapitel 5 und 6).

2. Herstellung von Sekundärkupfer

Der Verfahrensablauf des Montanwerkes Brixlegg AG ist in nachfolgender Abbildung 2-1 dargestellt. Einsatzmaterial für den Schachtofen sind Shredderschrott, Reststoffe und Zwischenprodukte wie Schlämme. Das gewonnene Schwarzkupfer dient der Weiterverarbeitung zu Rohkupfer im Konverter, welches mit hochkupferhaltige Schrotte und Anodenreste im Anodenofen behandelt und zu Anoden vergossen wird. Diese sind das Ausgangsmaterial für die Raffinationselektrolyse. Abschließend werden die Kathoden in der Gießerei zu Rundbolzen und Walzplatten vergossen [1].

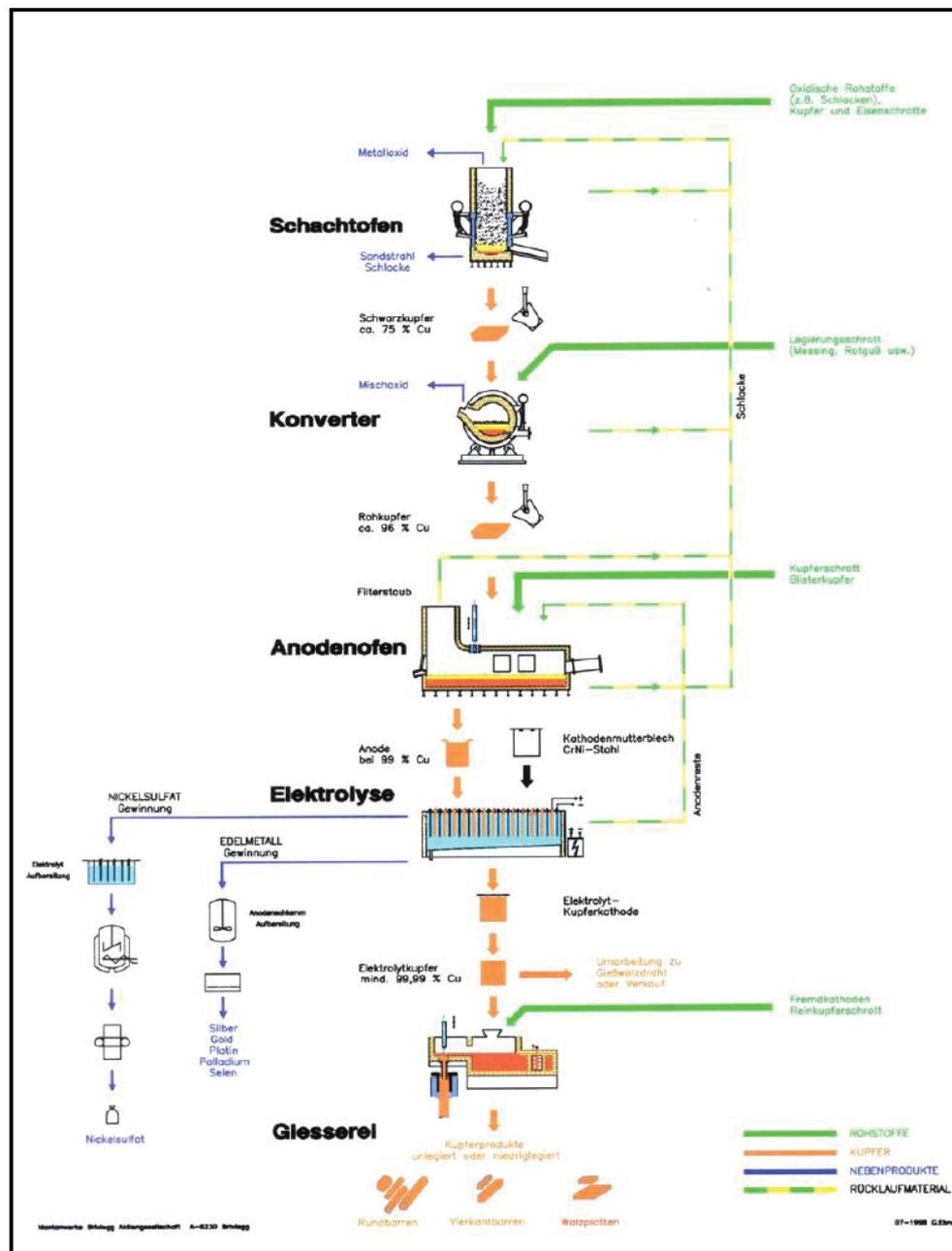


Abbildung 2-1: Verfahrensablauf Sekundärkupferherstellung [1]

Die Kapazität der Montanwerke Brixlegg AG beträgt 108.000 Tonnen Kathoden. Die Erzeugnisse werden in den europäischen Raum exportiert und 25 % der Jahresproduktion decken den Bedarf am heimischen Markt ab [1].

Nach dem zweiten Weltkrieg wurde noch das Erz aus dem Bergbau Mitterberg im Montanwerk verhüttet. Dafür wurde eigens das so genannte Brixlegg-Verfahren entwickelt. Die kompakte Umstellung auf eine Sekundärerzeugung erfolgte als das Erzvorkommen in Mitterberg erschöpft war. Durch diese Umstellung werden Ressourcen geschont sowie Energie eingespart. Der Energieaufwand bei der Primärerzeugung von Kupfer beträgt etwa 98 GJ/t (abhängig vom Kupfergehalt des Erzes), bei Sekundärkupfer nur 14 GJ/t (abhängig vom Kupfergehalt des Schrottes). Des Weiteren wird damit eine Herabsetzung von SO₂-Emissionen realisiert, da keine sulfidischen Erze herangezogen werden müssen [1], [2], [3].

Kupfer, das aus Sekundärrohstoffen erzeugt wird, ist einem selektiven Raffinationsprozess unterworfen und übertrifft zum Teil die Qualität des Primärkupfers. Recyclingmaterialien weisen in den meisten Fällen einen höheren Kupfergehalt als übliche Kupfererze auf [4].

Nachfolgend wird auf den Verfahrensablauf in der Sekundärmetallurgie eingegangen, welcher die Aggregate Schachtofen, Konverter und Flammofen beinhaltet. Anschließend erfolgt eine Raffinationselektrolyse und der letzte Bearbeitungsschritt findet in der Gießerei statt.

2.1 Schachtofen

Die Einsatzmaterialien für den Schachtofen enthalten einen niedrigen Kupfergehalt. Diese sind beispielsweise Shredderschrott, Reststoffe, und Zwischenprodukte wie Schlämme, oxidische Rohstoffe, Stäube, Aschen und kupferhaltige Rücklaufschlacken, siehe Abbildung 2-2. Beim Schachtofen bewegen sich die Beschickung und das Reaktionsgas im Gegenstrom. Um eine Gasdurchlässigkeit und eine geringe Bildung von Flugstaub gewährleisten zu können, muss das Einsatzmaterial stückig sein. Das Aufgabegut wird dafür gegebenenfalls zerkleinert oder bei staubförmigen Eintragsstoffen kompaktiert. Der Koks und die Einsatzstoffe wie Sekundärmaterialien und Kreislaufstoffe werden getrennt und schichtweise chargiert [3], [5].

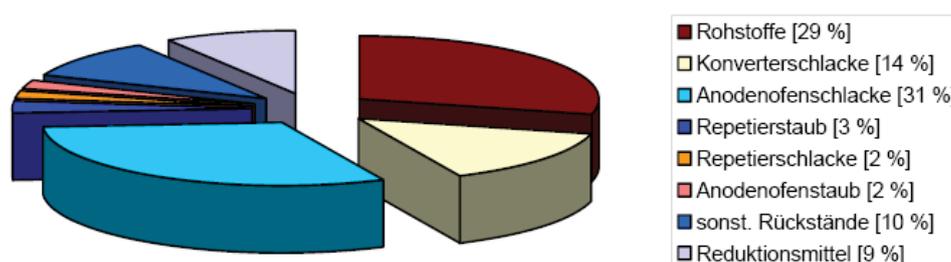


Abbildung 2-2: Durchschnittliche Chargenzusammensetzung beim Schachtofen [6]

Der Sekundärschachtofen fährt mit heißer Gicht, um eine Verdampfung von Zink und Blei sowie eine Oxidation dieser Metalle über der Beschickungssäule zu erhalten. Der Shredderschrott bringt zwar Zink und Blei in den Prozess ein, enthält aber auch erhöhte Edelmetallgehalte, die später im Anodenschlamm angereichert werden. Zu beachten ist außerdem der Chlorgehalt in den Einsatzmaterialien, da Chlor die Dioxinbildung fördert und sich meist im zinkhaltigen Flugstaub ansetzt. Weitere Schwierigkeiten mit dem Abgas beziehungsweise den Schlacken ergeben sich beim Einsatz von staubförmigen und schlammigen Materialien [3], [7].

Die Aufgaben des Schachtofens bestehen im Erschmelzen von Reststoffen und der Reduktion des oxidischen Materials sowie dem Schließen von Wertstoffkreisläufen in der Hütte [5].

2.2 Konverter

Das bei der Reduktion gewonnene Schwarzkupfer mit einem Kupfergehalt von 70 - 80 % ist als hauptsächliches Einsatzmaterial in Abbildung 2-3 dargestellt. Hinzu kommen Kupferlegierungsschrotte, die eine Regelung der Temperatur ermöglichen. Die Prozessenergie wird durch die exothermen Reaktionen aufgebracht. Die überwiegende Umsetzung ist die Oxidation des Eisens. In der zweiten Blasphase wird zusätzlich Koks zur Verflüchtigung von Zinn zugesetzt. Die Temperatur während des Prozesses beträgt ungefähr 1300 - 1400 °C, wobei die leicht flüchtigen Begleitelemente Zink, Zinn und Blei zum einen in den Flugstaub übergeführt und zum anderen verschlackt werden. Aufgrund des vorherrschenden Sauerstoffpotenzials verflüchtigt Zinn als SnO [8].

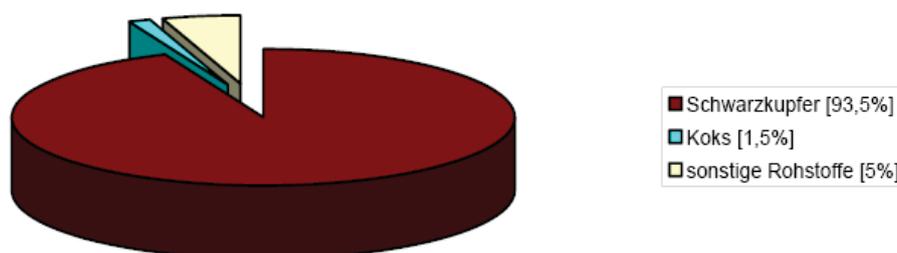


Abbildung 2-3: Chargenzusammensetzung im Konverter [2]

Die Dauer der Konvertierung beträgt circa drei Stunden und es werden etwa 9.000 Nm³ Luft eingebracht. In den beiden Blasperioden fallen zwei Schlacken an. Aufgrund des hohen Kupfergehalts werden diese wieder in den Schachtofen zurückgeführt. Die erste Schlacke enthält einen Kupfergehalt von ungefähr 15 % und die zweite in etwa 30 % Kupfer. Ein

typisches Aggregat für die Erzeugung des Rohkupfers ist der Peirce-Smith-Konverter. Das abgegossene Metall hat einen Kupfergehalt von circa 95 - 97 % [6], [9].

2.3 Flammofen

Durch die Raffination reiner Schrotte werden Kupfergehalte von 99 - 99,5 % erreicht. In der Abbildung 2-4 ist eine durchschnittliche Chargenzusammensetzung dargestellt.

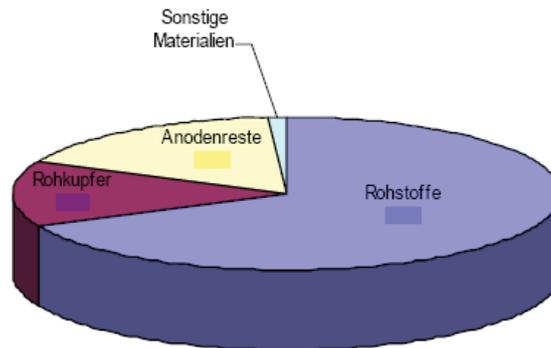


Abbildung 2-4: Chargenzusammensetzung im Flammofen [6]

Das Rohkupfer, hochkupferhältige Schrotte (90 - 97 % Cu-Gehalt) sowie Anodenreste der Raffinationselektrolyse werden in der Feuerraffination zu Anodenkupfer raffiniert. Der Prozess erfolgt in zwei Schritten. Im ersten wird Luft beziehungsweise mit Sauerstoff angereicherte Luft der Kupferschmelze aufgeblasen. Dabei findet eine selektive Oxidation und/oder Verflüchtigung der Verunreinigungen, wie zum Beispiel Zink, Zinn, Nickel, Blei und Arsen, statt. Weiters wird SiO_2 als Schlackenbildner nachgesetzt. In der zweiten Prozessstufe setzt das Polen ein. Um das mit Sauerstoff gesättigte Kupferbad zu desoxidieren werden entweder Holzstämme eingetaucht oder Polgase, wie zum Beispiel Erdgas, aber auch Kerosin oder Schweröl eingebracht. Dabei muss diese Prozessstufe wiederum in das Dichtpolen (Entfernung der letzten Metalloxyidgehalte) und das Zähpolen (Reduktion des Cu_2O) unterteilt werden. Für das Vergießen des Kupfers zu Anoden werden Sauerstoffgehalte von maximal 0,3 % bei einer Temperatur von ca. 1180 °C gefordert. Der Abguss erfolgt auf einem Gießrad. Weitere wichtige Parameter neben dem Sauerstoffgehalt und der Temperatur sind unter anderem die gleichmäßige Geometrie der Anode, der Oberflächenzustand und die Dichte [10], [11], [12], [13], [14].

Folgende unterschiedliche Bauarten der Flammöfen werden eingesetzt [10]:

- Stationärer Anodenflamofen
- Kippbarer Anodenflamofen
- Anodentrommelofen
- Anodenschachtofen (Contimelt)

2.4 Raffinationselektrolyse

Die Anoden aus der pyrometallurgischen Raffination bilden hier das Ausgangsprodukt. Die Kathoden, bestehend aus dünnem Edelstahlblech, sind als Minus-Pol geschaltet. Kupfer und unedlere Elemente, beispielsweise Arsen, Eisen, Nickel und Zink, lösen sich sobald Spannung angelegt wird. Die Edelmetalle Gold, Silber und Metalle aus der Platingruppe, oder Elemente, die unlösliche Verbindungen bilden wie etwa Blei, gehen in den Anodenschlamm. Aus dem Anodenschlamm können Selen und Edelmetalle, zum Beispiel Gold, Silber, Platin, Palladium, durch weitere hydrometallurgische Verfahrensschritte gewonnen werden [4].

Im Gegensatz dazu scheidet sich reines Kupfer an der Kathode ab. Der Elektrolyt, angereichert mit Nickelionen, wird mit Hilfe von unlöslichen Bleianoden in der Entkupferungsanlage entkupfert. Das Nickel wird als Nickelsulfat gewonnen. Tabelle 2-1 zeigt die chemische Analyse einer Kathode [1].

Tabelle 2-1: Chemische Analyse Kathode [1]

Cu [%]	Ag [ppm]	Se [ppm]	Te [ppm]	As [ppm]	Sb [ppm]	Pb [ppm]	Ni [ppm]	O₂ [ppm]	Bi [ppm]	S [ppm]
> 99,99	6 - 8	< 0,5	< 0,5	0,8	0,5	1,2	1,0	-	< 0,5	6 - 8

2.5 Gießerei

Die Kupferkathoden werden anschließend in vier Elektroöfen beziehungsweise in einem ASARCO-Schachtofen geschmolzen und halbkontinuierlich in Stranggussanlagen zu Formaten vergossen. Der Gießablauf ist in Kapitel 5.1 beschrieben [1].

3. Verhalten von Phosphor, Sauerstoff und Wasserstoff im Kupfer

Dieses Kapitel beschreibt das Verhalten bzw. die Auswirkung der Elemente Phosphor, Sauerstoff und Wasserstoff im Werkstoff Kupfer.

Zusätze von Phosphor und damit auch unterschiedliche zusammenhängende Gasgehalte beeinflussen die Eigenschaften des Kupfers zunehmend. Als Beispiel sei hier angeführt, dass mit steigendem Phosphorgehalt die elektrische Leitfähigkeit im Kupfer sinkt.

3.1 Eigenschaften des Phosphors im Kupfer

Eine vollständige Entfernung des Sauerstoffs aus der Schmelze ist mit den üblichen Verfahren nicht möglich. Die Erzeugung des sauerstofffreien Kupfers wird durch die Zugabe so genannter Desoxidationsmittel ermöglicht. Das für Kupfer am häufigsten verwendete ist Phosphor [15], [16].

Die Reaktion erfolgt nach folgender Gleichung:



Das entstehende P_2O_5 verbindet sich mit dem Cu_2O , so dass gut flüssige Phosphate entstehen. Zwischen dem Sauerstoff- und Phosphorgehalt besteht ein Gleichgewicht und somit kann sauerstoffhaltiges Kupfer auch geringe Phosphorgehalte aufweisen [17].

Desoxidationsmittel sollten aber zugleich eine entgasende Wirkung auf den gelösten Wasserstoff ausüben und damit als Dehydrierungsmittel wirken. Es zeigt sich, dass beispielsweise Phosphor und Lithium zugleich desoxidierend und dehydrierend wirken. Lithium bindet den Wasserstoff in Form von LiH ab, welches weiteres Cu_2O nach folgender Reaktion reduziert:



Bleibt das Lithium jedoch als LiH im Bad zurück, setzt es die Leitfähigkeit herab. Außerdem ist es ein teures Desoxidationsmittel. Der Preis für 1000 g Lithium (99,95 % Reinheit) beträgt circa 550 €. Weitere Angaben sind 7 g Lithium (> 99 % Reinheit), in einer 60 ml Ampulle mit Argon und Öl befüllt, um 40 \$. Der Preis für Phosphorpulver (99 % Reinheit) wird mit 43,90 € für 500 g angegeben [18], [19], [20], [21].

Unterschreitet der Sauerstoffgehalt während des Kupfergusses 0,005 % O_2 , führt dies zu porösen Guss. Verhindert werden kann dieser Effekt mit einem starken Überschuss eines

Dehydrierungsmittels, wie z. B. Phosphor. Phosphor senkt die Viskosität des flüssigen Kupfers, ergibt einen porenfreien Guss und verleiht verbesserte mechanische Eigenschaften [18].

Weiters führen aber bereits geringe Zusätze an Phosphor und anderen Desoxidationsmitteln zu einer Herabsetzung der elektrischen Leitfähigkeit, siehe dazu Abbildung 3-1. Die Widerstandserhöhung hängt davon ab, ob sich die Zusätze im Grundmetall unter Bildung von Mischkristallen lösen oder als neue Phasen ein heterogenes Gefüge bilden. Zumeist führen bei einer Mischkristallbildung bereits kleine Zusammensetzungen zu einer ausgeprägten Veränderung der Eigenschaften. Sind mehrere Elemente im festen Kupfer gelöst, so wird die beobachtete Widerstandserhöhung durch die Summe der Einzeleffekte erzielt. Eine Verminderung des Leiterquerschnitts erfolgt bei den heterogenen Gefügebestandteilen aufgrund ihres Teilchenvolumens. Im Mischkristallbereich setzen Elemente wie Phosphor die Leitfähigkeit stark herab [15], [22].

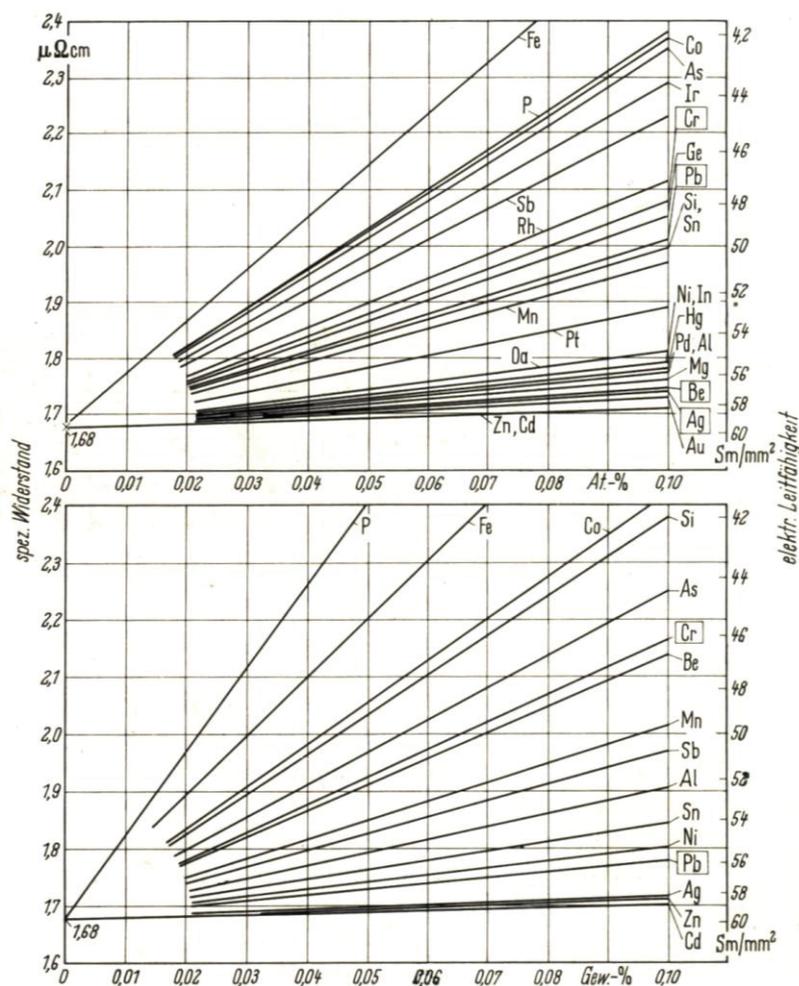


Abbildung 3-1: Widerstandserhöhung des Kupfers durch Beimengungen [17]

Der Einfluss des Phosphors auf die Leitfähigkeit kann durch Zusätze von Kalzium verbessert werden, welches mit dem Desoxidationsmittel eine in Kupfer unlösliche Verbindung bildet [18].

Abbildung 3-2 zeigt wiederum den Einfluss des Phosphors. Ein Gehalt von bereits 0,042 % P setzt sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch die Wärmeleitfähigkeit um etwa 20 % herab. Mit einer Temperaturerhöhung sinkt die Wärmeleitfähigkeit des reinen Kupfers, während sie bei phosphordesoxidiertem Kupfer ansteigt [15].

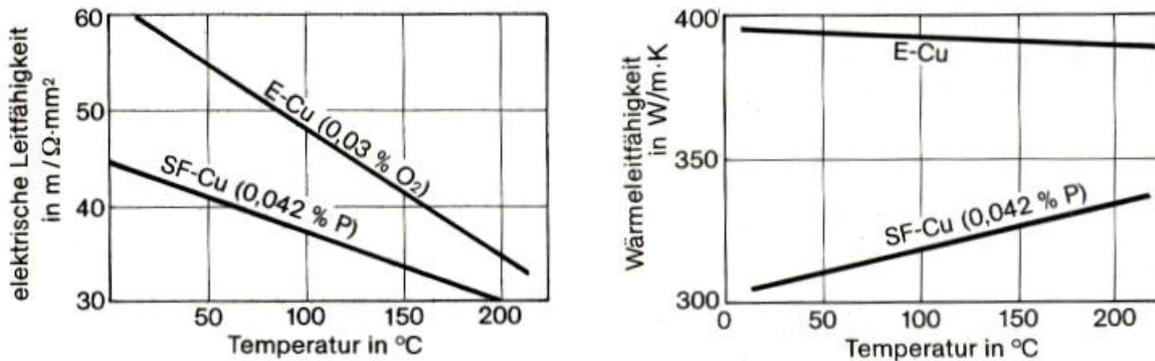


Abbildung 3-2: Einfluss der Temperatur und des Phosphors auf elektrische Leitfähigkeit (linkes Bild) und Wärmeleitfähigkeit (rechtes Bild) [15]

Des Weiteren nimmt mit zunehmendem Phosphorgehalt der Dichtewert des Kupfers ab. Verstärkt tritt dieser Effekt bei einem Gehalt von 0,1 % Phosphor ein (Abbildung 3-3) [17].

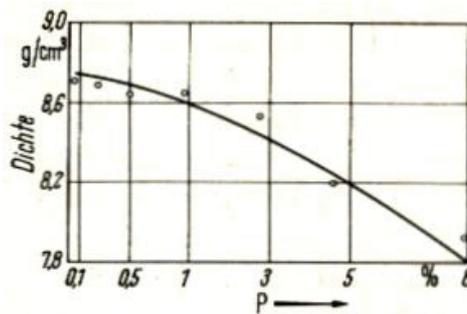


Abbildung 3-3: Dichte der Kupfer-Phosphor-Legierungen in Abhängigkeit vom Phosphorgehalt [17]

3.2 Sauer- und Wasserstoff

Wasserstoff wird beim Lösungsvorgang atomar aufgespalten. Sauerstoff löst sich hingegen als Kupfer(I)-oxid gut in der Kupfer-Schmelze, allerdings wenig im festen Metall [5].

In den folgenden Unterkapiteln 3.2.1 - 3.2.3 wird näher auf die beiden Elemente eingegangen.

3.2.1 Löslichkeitskurve von Wasserstoff in festen und flüssigen Kupfer

Die gelösten Gase in der Metallschmelze haben einen Einfluss auf das Erstarrungsgefüge, da sie sich mit fallender Temperatur aufgrund der abnehmenden Löslichkeit ausscheiden. Abbildung 3-4 zeigt die Wasserstofflöslichkeit in Kupfer nach Sieverts. Der Wasserstoffgehalt steigt sowohl im festen als auch flüssigen Kupfer mit zunehmender Temperatur an und nimmt beim Erstarren sprunghaft ab [17].

Nachfolgende Gleichung zeigt, dass die im flüssigen Kupfer gelöste Wasserstoffmenge m der Quadratwurzel aus dem Druck p proportional ist (c ist Konstante). Da der Wasserstoff im atomaren Zustand in das Metallgitter, genauer in Zwischengitterplätzen, eingelagert wird, gilt hier die Proportionalität zur Quadratwurzel des Partialdrucks gemäß Sieverts. Ansonsten ist nach dem Henry-Gesetz die Gaslöslichkeit dem jeweiligen Partialdruck des Gases proportional [5], [17].

$$m = \sqrt{p} \cdot c \quad (3-3) [17]$$

Der Wasserstoff ist selbst im festen Kupfer noch löslich. Dies führt zu bestimmten Verspannungen im Kristallgitter und zu einer verminderten elektrischen Leitfähigkeit im Gegensatz zu einem gasfreien Werkstoff. Die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit ist umso höher, je größer der Dichtewert ist. Die Entweichung des Wasserstoffs, aufgrund der starken Abnahme der Löslichkeit während der Erstarrung, verursacht porösen Guss und genauso eine Herabsetzung der elektrischen Leitfähigkeit [17], [18].

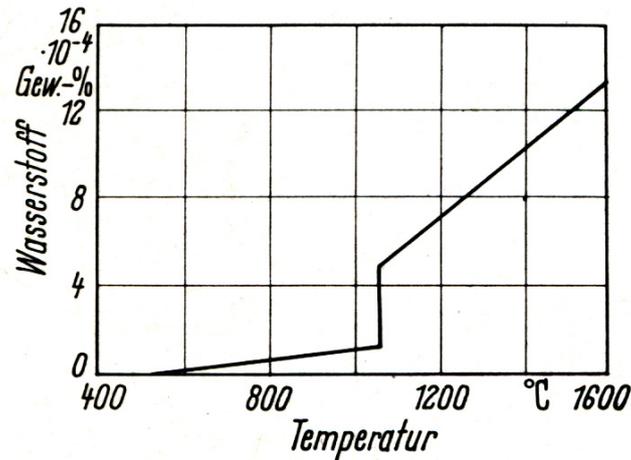


Abbildung 3-4: Wasserstofflöslichkeit in Kupfer (nach Sieverts) [17]

3.2.2 Abhängigkeiten von Sauerstoff und Wasserstoff im Kupfer

Abbildung 3-5 zeigt die Gleichgewichtsverhältnisse des Sauerstoffs und Wasserstoffs in Abhängigkeit des Druckes bzw. der Temperatur. Je höher der Sauerstoffgehalt, desto niedriger ist der Wasserstoffgehalt und umgekehrt. Zugleich tritt bei vermindertem Druck bzw. fallender Temperatur eine Herabsenkung der beiden Gasgehalte ein [15].

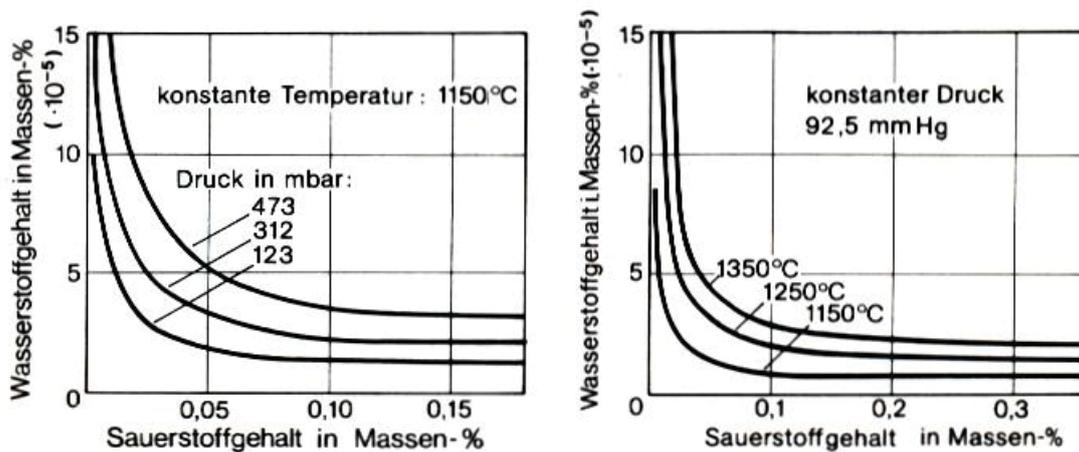
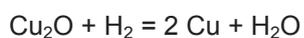


Abbildung 3-5: Gleichgewicht zwischen Sauer- und Wasserstoffgehalt in der Schmelze in Abhängigkeit vom Druck (linkes Bild) und von der Temperatur (rechtes Bild) [15]

Mit der nachfolgenden Gleichgewichtsreaktion ist ersichtlich, dass



(3-4) [5]

durch die genau eingestellten Parameter (Sauerstoffgehalt und Temperatur) sich die richtige Menge an Wasserdampf erreichen lässt, welche die Schwindung bei Erstarren des Metalls durch Bildung von Mikro-Gasporen ausgleicht. Diese Mikro-Gasporen entstehen bei geeigneter Wasserstoffkonzentration unter der Erstarrungshaut. Der Sauerstoffgehalt nimmt gegen Ende in Form von Cu_2O ab, der Wasserstoffgehalt hingegen zu. Der gebildete und unlösliche Wasserdampf entweicht. Wird an der Luft gegossen entsteht Kupfer(I)-oxid und bildet wiederum Wasserdampf. Durch diesen entstehen die bereits erwähnten Mikro-Gasporen. Bei zu hohen Wasserstoffkonzentrationen und damit auch Wasserdampfgehalten kann die Metalloberfläche aufgrund der groben Poren konvex erstarren [5].

Die Dichte im gegossenen Zustand ist im Wesentlichen von dem Gasgehalt bzw. der Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Sauerstoff und Wasserstoff abhängig. Mit steigendem Sauerstoffgehalt nimmt der Wasserstoffgehalt des Kupfers ab, die Dichte hingegen zu [17].

3.2.3 Wasserstoffkrankheit

Kupfersorten mit einem Sauerstoffgehalt unter 0,001 % sind gegen den Angriff von Wasserstoff resistent, womit keine Wasserstoffkrankheit zu befürchten ist [17].

Da in den folgenden beschriebenen Versuchen dieser kritische Sauerstoffwert stets unterschritten wird, erfolgt hier nur eine kurze Erläuterung.

Die Wasserstoffkrankheit tritt auf, wenn sauerstoffhaltiges Kupfer in einer wasserstoffhaltigen Atmosphäre geglüht wird. Der unlösliche Wasserdampf, der sich aus dem diffundierten Wasserstoff und dem Sauerstoff des Kupfer(I)-oxids bildet, sammelt sich unter hohem Druck an den Korngrenzen. Dies verursacht Riss- und Porenbildung und das Metall wird brüchig [5].

4. Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt verschiedene Behandlungsarten, welche derzeit in der Industrie Verwendung finden. Dabei werden auch verschiedene Systeme aus der Aluminiumindustrie herangezogen, da diese Ähnlichkeiten aufweisen bzw. auch gegebenenfalls neue Möglichkeiten aufzeigen.

4.1 Behandlungen aus der Aluminiumindustrie

In den Unterkapiteln sind die unterschiedlichen Behandlungsarten zu finden, die jeweils die Anzahl der nichtmetallischen Einschlüsse verringern. Angeführt seien Filtration, Spülbehandlung, Sedimentation, Flotation und elektromagnetische Abscheidung. Unter dem Überbegriff „Blockage“ fällt die Filtration, wobei die Schmelze durch ein Medium mit kleinerer Porengröße als die der Einschlüsse durchgeleitet wird. Bei einer Sedimentation erfolgt das Trennen der Einschlüsse von der Schmelze durch Ausnutzung des Dichteunterschieds. Interception beschreibt den Effekt, dass aufgrund der Strömung die Einschlüsse mitgerissen und durch einen Sammler aufgefangen werden. Die Flotation ist eine Kombination des Sammelns und Einleiten eines Gases. Sobald die Gasblasen und Partikel an die Oberfläche aufgestiegen sind, werden diese abgeführt. Ein elektromagnetisches Feld wird bei der elektromagnetischen Abscheidung angebracht. Das Feld wirkt auf die Schmelze, nicht aber auf die Einschlüsse. Durch die Agglomeration vergrößert sich das Partikel und es tritt eine Vergrößerung ein. Dies geschieht durch verschiedene Mechanismen. Bei einer flüssigen Phase beispielsweise befinden sich die makroskopisch kleinen Partikel ständig in chaotischer Bewegung und kollidieren dadurch miteinander. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels der Agglomeration kleinste Partikel entzogen werden können. Die größte Menge an Einschlüsse werden mit der Filtration bzw. zusätzlich zuvor aufgrund der Sedimentation reduziert [23].

4.1.1 Rotorsysteme

Bei dieser Entgasungsart ist eine große Anzahl an unterschiedlichen Möglichkeiten gegeben, welche nachfolgend beschrieben werden.

4.1.1.1 Hycast-System

Dieses System ist ein Impeller mit drei Rotoren und einem Durchsatz von 70 t pro Stunde. Bei großen Gießanlagen sind drei Rotoren notwendig, um den entsprechenden Durchsatz zu erreichen [24].

Die Abbildung 4-1 zeigt die Entgasungseinheit bestehend aus dem Rohr für die Gaszuführung und dem Rotorschaft. Der Rotor dient als zentrifugale Pumpe, welche die Schmelze durch den Boden in den Schaft saugt und anschließend wieder zurück in das Bad durch die seitlich angebrachten Löcher leitet. Dies geschieht mittels des Druckunterschieds zwischen dem Metall, in den seitlich angebrachten Löchern, und der Schmelze außerhalb des Drehkörpers. Im Vergleich zu den herkömmlichen Impellern saugt der HA-Rotor eine geringere Metallmenge bei gleicher Drehzahl ein. Durch den Kontakt des Metalls mit dem Gasstrom im Schaft und den anschließenden Austritt aus den seitlichen Löchern ist eine Gasblasenerzeugung gewährleistet. Außerdem ist in Abbildung 4-1 die parabolische Grenzfläche, die sich zwischen dem Metall und der Flüssigkeit im Schaft bildet, zu sehen [24].

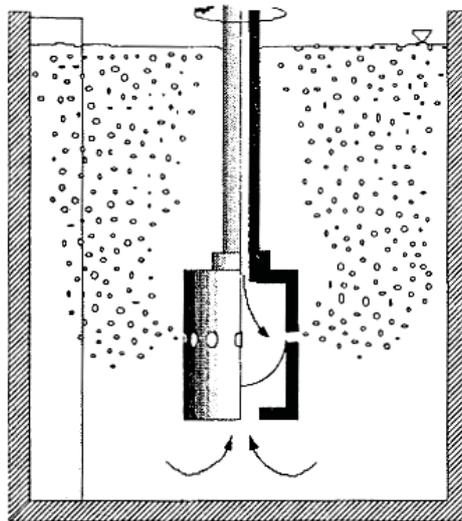


Abbildung 4-1: Prinzip des HA-Rotors [24]

Der maßgebliche Vorteil dieses Rotors ist in der schnellen Rotordrehzahl aber zugleich langsamen Badbewegung nahe der Oberfläche zu finden. In Abbildung 4-2 ist das durch den Impeller erzeugte Strömungsfeld zu sehen. Mit höherer Rotorgeschwindigkeit steigt die Pumprate und die Blasengröße sinkt. Die Pumprate verkleinert sich wiederum mit höherem Volumenstrom [24].

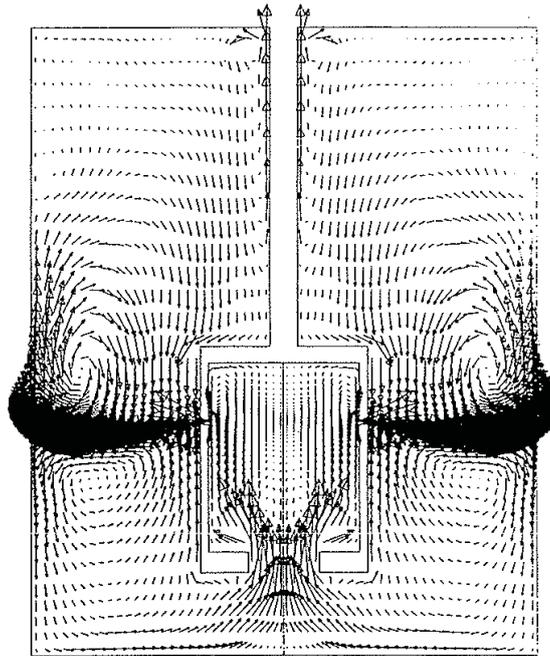


Abbildung 4-2: Erzeugte Strömung eines HA-Rotors aus einem Simulationsmodell [24]

Eine weitere Ausführung wird nachfolgend beschrieben, wobei der Rotor feine Gasbläschen erzeugt und durch die nicht vorhandenen Rotorblätter keine Turbulenzen erzeugt werden (Abbildung 4-3) [25].

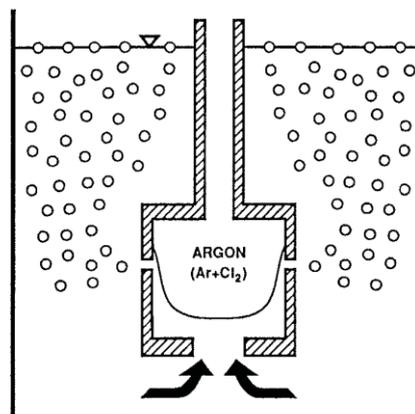


Abbildung 4-3: Rotordesign [25]

Die Pumpleistung liegt bei 40 t pro Stunde, wodurch eine gute Durchmischung erreicht wird. Der Strömungsverlauf ist in der nachfolgenden Abbildung 4-4 dargestellt. Das Bild stammt aus einer FLUENT-Simulation und zeigt, dass der Rotor eine obere und untere Strömung erzeugt. Auch hier ist zu sehen, dass einerseits eine gute Durchmischung herrscht, aber keine oberflächlichen Turbulenzen erzeugt werden. Durch Erweiterungen besteht die Möglichkeit im Rotor einen Plasmalichtbogen zu zünden [25].

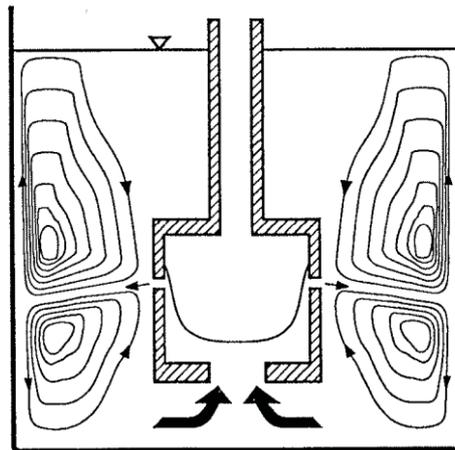


Abbildung 4-4: Erzeugter Strömungsverlauf mit dem Rotor [25]

4.1.1.2 ALPUR™-System

Câbleries de Lens ist Frankreichs führender Kabelerzeuger und verarbeitet die Werkstoffe Kupfer und Aluminium. Der dort zum Einsatz kommende Rotor findet seine Anwendung während des Aluminiumabgusses. Abbildung 4-5 zeigt, dass der Impellereinsatz nach den Gießöfen und vor dem Gießrad stattfindet. Vor der Spülgasbehandlung wird das Kornfeinungsmittel ATi5B zugeführt. Durch deren Zugabe wird die heterogene Verfestigung verbessert und ein strukturiertes Material mit gleichgerichteten Körnern erreicht. Dies führt zu einer höheren Dehnungsfestigkeit und Zähigkeit. Typische Zugaben in der Aluminiumindustrie bestehen aus Aluminium, 1 bis 10 % Titan und 0,1 bis 5 % Bor oder Kohlenstoff [26], [27].

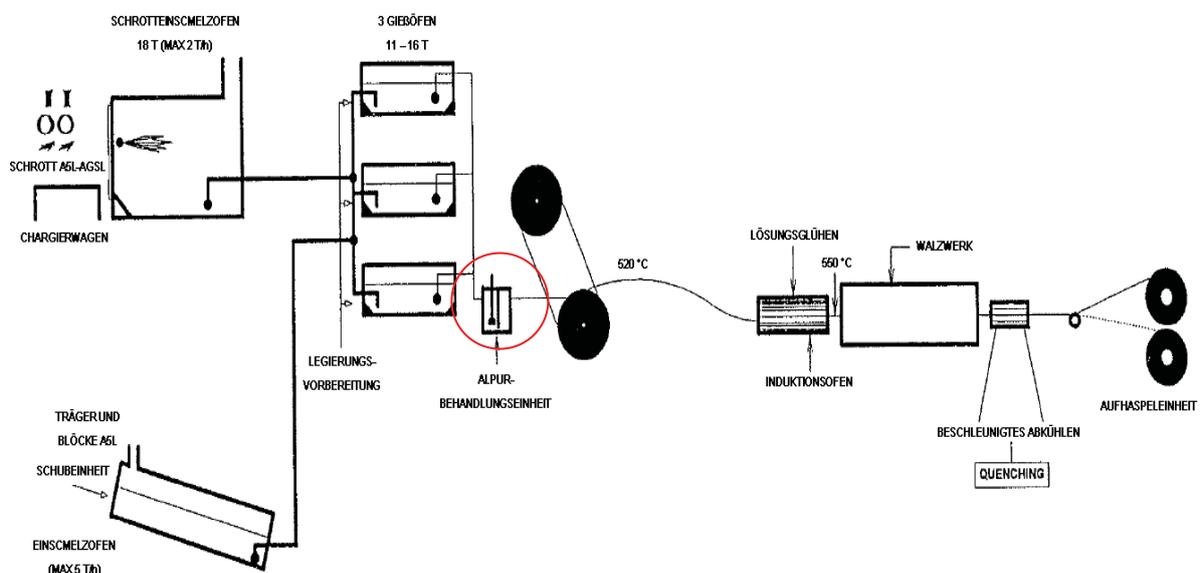


Abbildung 4-5: Produktionskette bei Câbleries de Lens [26]

Ziel ist es, mit dem Impeller die Wasserstoffmenge, genauso wie den Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen, zu minimieren. Mit dieser Entgasungseinheit, bestehend aus einem Graphitrotor und -schaft, wird ein Gasgemisch aus Argon und Chlor in das Bad eingeleitet. Der Argonstrom beträgt 3 Nm³/h und der des Chlors 25 NI/h. Der patentierte Alpur-Rotor ist in Abbildung 4-6 dargestellt [26].

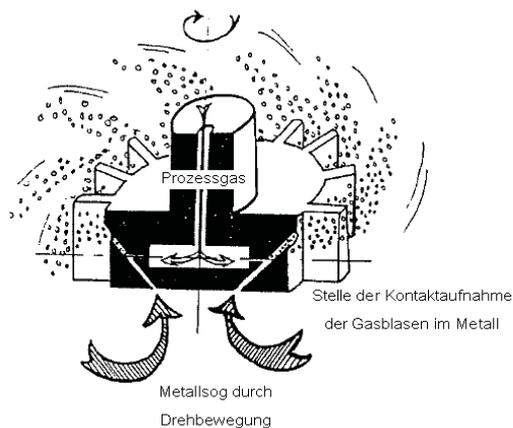


Abbildung 4-6: Darstellung des ALPURTM-Rotor [26]

Die Behandlungseinheit ist in zwei Kammern geteilt (Abbildung 4-7). In der Behandlungskammer befindet sich der Rotor und in der Abflusskammer ist ein Heizstab installiert, der aus Siliziumkarbid besteht [26].

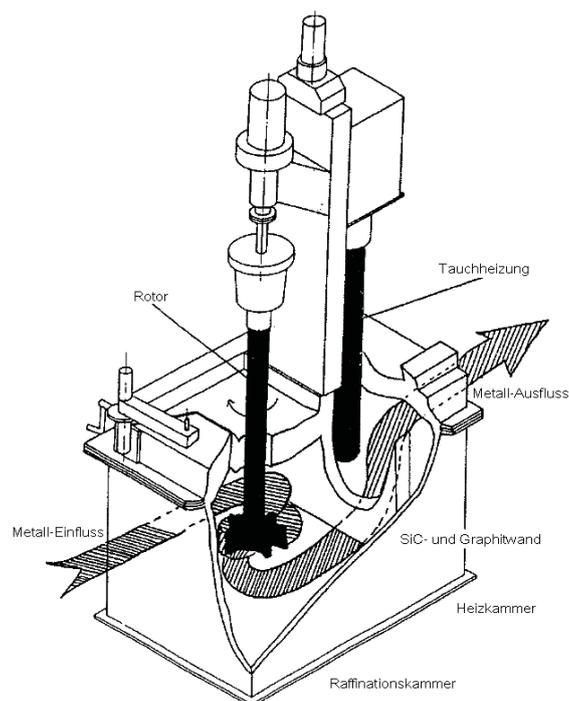


Abbildung 4-7: Darstellung des ALPURTM S1000 [26]

Der Vergleich des vorherigen Filtersystems und des nun eingesetzten Impellers zeigt, dass mit dem Rotor höhere Reinheiten bei gleichbleibenden Kosten erzielt werden. Ebenso wurde von den Anwendern die Bedienerfreundlichkeit geschätzt bzw. konnten keine Nachteile durch den begrenzten Chloreinsatz vermerkt werden [26].

Eine weitere Beschreibung basiert auf den Aufbau des ALPUR-Prozess, wurde aber von Aluminium Pechiny weiterentwickelt. Diese Erneuerungen wären [28]:

- Kippvorrichtung um den Behälter zu entleeren
- einfaches Reinigungssystem um die Krätze zu entfernen
- neues Heizsystem mit einem elektrischen Tauchsieder

In der folgenden Abbildung 4-8 ist der ALPUR-Rotor dargestellt. Durch einen Schaft (4) wird das Behandlungsgas dem Rotor zugeführt. In diesem leiten kleine radial angeordnete Kanäle (1) das Gas in die Schmelze (5) weiter. Die Kanäle (2), welche in einem 45° Winkel angebracht sind, befördern die Schmelze zum Gasaustrittspunkt (3). Dies führt zu einer Vermischung des Gases mit dem Metall. Bei einer ausreichenden Gasaustrittsgeschwindigkeit und den damit verbundenen Volumenstrom wirken die Kanäle in (3) als Düsen. Das Behandlungsgas ist auch hier ein Gemisch aus Argon und 0 - 5 % Chlor [28].

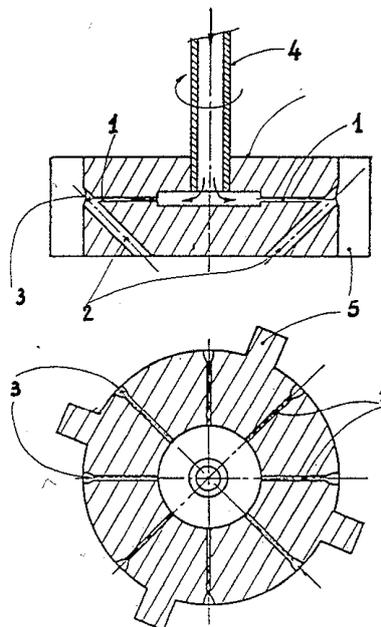


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des ALPUR-Rotors [28]

Die ALPUR-Entgasungseinheit zeigt seine Vorteile im leichten Entleeren des Behälters, dem einfachen Positionieren und Installieren der Anlage und den geringen Erhaltungskosten [28].

4.1.1.3 RDU-System

Mit der Rapid degassing unit (RDU) sollen geringe Gas- und Partikelgehalte erreicht werden. Eingesetzt wird dieser Rotor unter anderem bei Commonwealth Aluminium. Anfangs konnte bei einer 3105 Legierung eine Gasgehaltreduktion von 51,4 % erreicht werden. Nach zwei Jahren Einsatzzeit wurde klar, dass die Effektivität nicht nur von den Parametereinstellungen am Gerät abhängig ist, sondern auch von der Badtemperatur, der Legierungsqualität und des anfänglichen Wasserstoffgehalts. Der Rotor (Abbildung 4-9) erfüllt zwei Aufgaben. Einerseits Badbewegungen zu erzeugen und andererseits feine Gasbläschen zu bilden. Weiters ist zu sehen, dass die Anbringung des Rotors an einem Schaft erfolgt und beide aus Graphit bestehen [29].

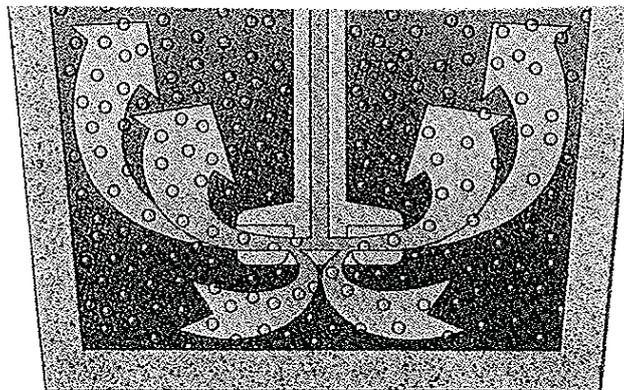


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des RDU-Rotors [29]

Commonwealth Aluminium arbeitete mit Foseco an der Instandhaltung bzw. Weiterentwicklung, welches zu Verbesserungen der Qualität und geringere Kosten führte [29].

4.1.1.4 ACD-System

Der Alcan Compact Degasser, kurz ACD, zeigt seine Vorteile bei Metallmengen von ca. ein bis drei Tonnen. Daher findet der ACD seinen Einsatz in der Gießrinne zwischen Ofen und Gießanlage. Dabei sind mehrere Rotoren in Serie geschaltet, die durch Wehre getrennt sind und damit als eigene Behandlungskammer gelten (Abbildung 4-10). Es wird damit auch eine weitere Oxidation des Aluminiums vermieden. Nach der Behandlung kann der ACD ohne Schwierigkeiten von der Gießrinne entfernt werden [30].

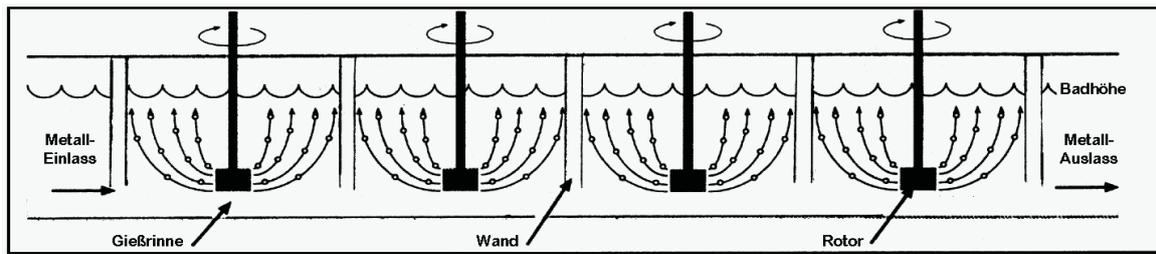


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung der Multi-Rotor ACD-Einheit [30]

Die Rotoren bestehen aus Graphit und haben eine Lebenszeit von ca. 100 Abgüssen bzw. 250 Stunden Verweilzeit im flüssigen Metallbad. Die ACD-Einheit zeichnet sich durch die geringflächigen Bodenmaße, der Einfachheit des mechanischen und elektrischen Aufbaus und der vollständigen Automatisierung aus [31].

4.1.1.5 SNIF-System

Das Spinning Nozzle Inert Flotation System, kurz SNIF genannt, ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Der Ofen hat die Abmessungen $1,3 \cdot 1,3 \cdot 2,5$ m. Auf dem Deckel, der zugleich den Ofen abdichtet, sind die Rotoren angebracht [32].

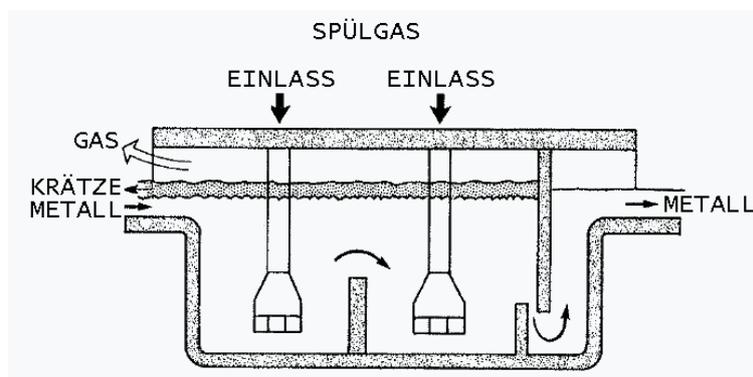


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung des SNIF-Systems [32]

Nachfolgende Abbildung 4-12 zeigt den Schaft, der den Rotor antreibt. Der Schaft ist von einer stationären Hülse umgeben, die im unteren Teil einen Stator darstellt. Die kleinen Gasbläschen, mit einer Größe zwischen 1 und 10 mm, werden zwischen Schaft und Rotor in das Metallbad eingeblasen [32].



Abbildung 4-12: Spinddüse des SNIF [32]

4.1.2 Spüldüsen und Filtration

Grundsätzlich muss zwischen Kuchen- und Tiefbettfiltration unterschieden werden. Außerdem sind des öfteren Spülgaseinrichtungen mit Filteranlagen kombiniert, das in den beiden Unterkapiteln veranschaulicht ist.

Abbildung 4-13 zeigt die Wirkungsweise eines Tiefbettfilters. Das flüssige Metall fließt durch ein poröses Medium, welches die Partikel zurückhalten soll. Die Höhe des Filters kann von 2 cm bis 1 m variieren. Die Wirksamkeit Einschlüsse zurückzuhalten, hängt von der Porengröße und der Höhe ab [33].

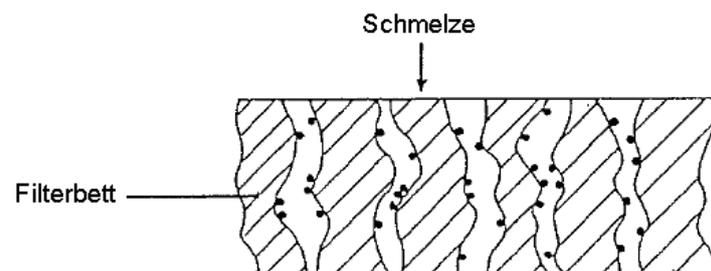


Abbildung 4-13: Schematische Darstellung der Tiefbettfiltration [33]

In der folgenden Abbildung 4-14 sind unterschiedliche Filtersysteme zu sehen [33].

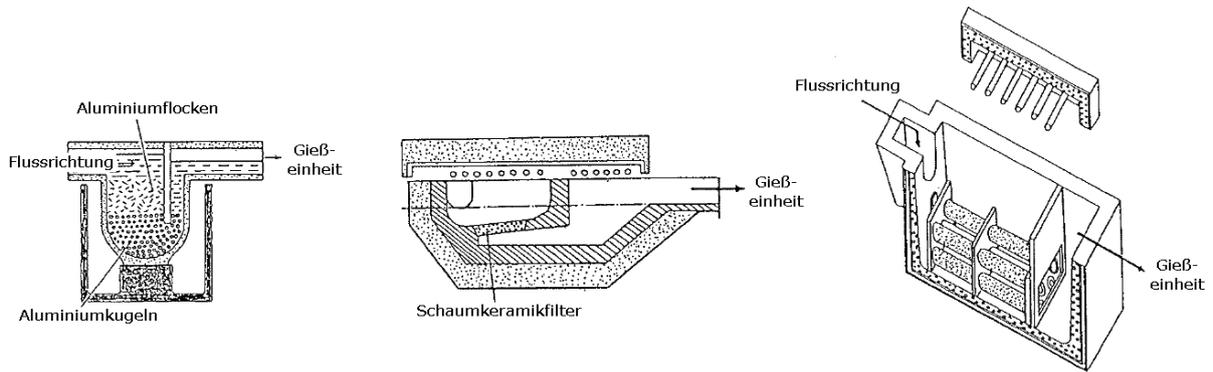


Abbildung 4-14: Schematische Darstellung eines Tiefbettfilters (links), Keramik-Schaum-Filter (mitte) und eines Rohrfilters (rechts) [33]

4.1.2.1 MINT-System

Der melt in-line treatment (MINT) Prozess wird nach dem Ofen und vor der Gießanlage eingesetzt. Entwickelt wurde er von Consolidated Aluminium. Versuche haben gezeigt, dass mit dem MINT-System die Gehalte an Wasserstoff, Lithium und nichtmetallische Einschlüsse reduziert werden können. Folgende Abbildung 4-15 stellt die Entgasungseinheit dar. Das flüssige Metall aus dem Ofen wird durch einen spiralförmigen Kanal in den sogenannten Reaktor geleitet. Ist das Metall am Reaktorboden angelangt, verlässt es diesen. Im Gegenzug wird in den konisch geformten Reaktorteil das Prozessgas in Form kleiner Bläschen eingeleitet. Das Inertgas verlässt den Reaktor im Gegenstrom zum Metall und führt damit zu einer Reduzierung des Gasgehalts im Metall. Neben den Spüldüsen findet ein Einsatz von Keramikfiltern statt [34].

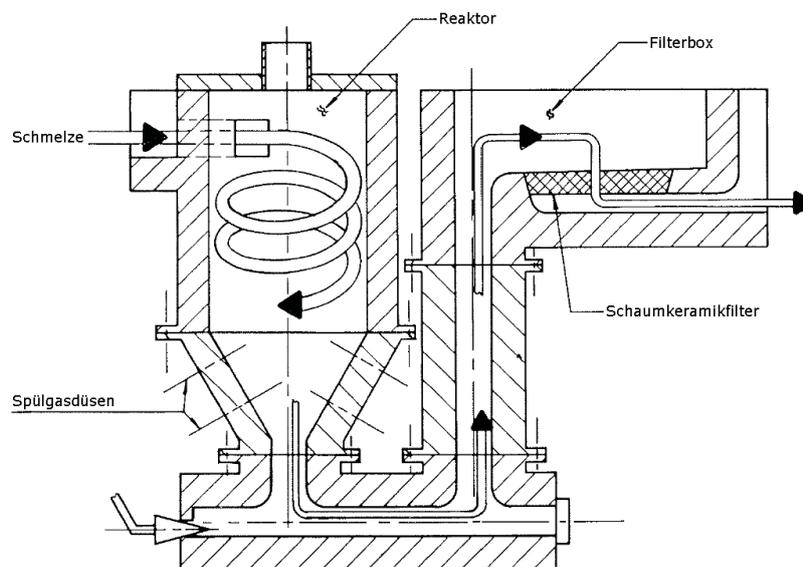


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung des MINT-Systems [34]

4.1.2.2 MCFS-System

Das Herzstück des Multicast Filtration Systems (MCFS) ist die Multicast Filter Assembly (Abbildung 4-16), welche in einem Halteofen angebracht ist. Diese ist dreidimensional, bestehend aus gebundenen Partikeln und stellt ein formfestes poröses Medium dar [35].

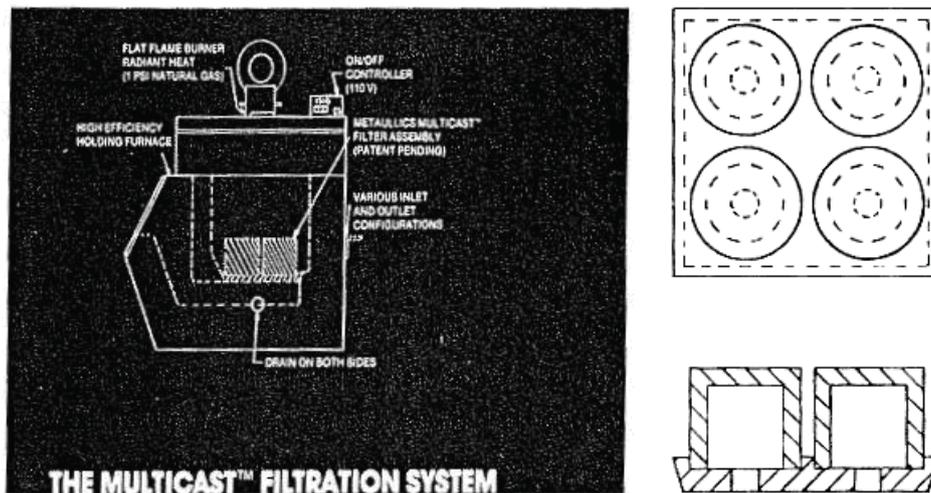


Abbildung 4-16: Schematische Darstellung des MCFS-System (links) und der Multicast Filter Assembly (rechts) [35]

Die Multicast Filter Assembly besteht aus Filterrohren, genauer Plattenfilter, die in einer Tassenform zusammengesetzt sind. Die Vorteile sind in der erhöhten Filterfläche bzw. Durchsatz zu finden. Der Filter erfährt mehrere Einsätze. Nach jeder Behandlung wird der gebildete Filterkuchen am Filter durch ein Spülen mit Inertgas abgetrennt [35].

4.1.3 Elektromagnetische Abscheidung

Durch das Anbringen eines magnetischen Feldes kann die Reinheit der Aluminiumschmelze erhöht werden (siehe Abbildung 4-17). Es können damit Einschlüsse im Mikrometerbereich entfernt werden [36].

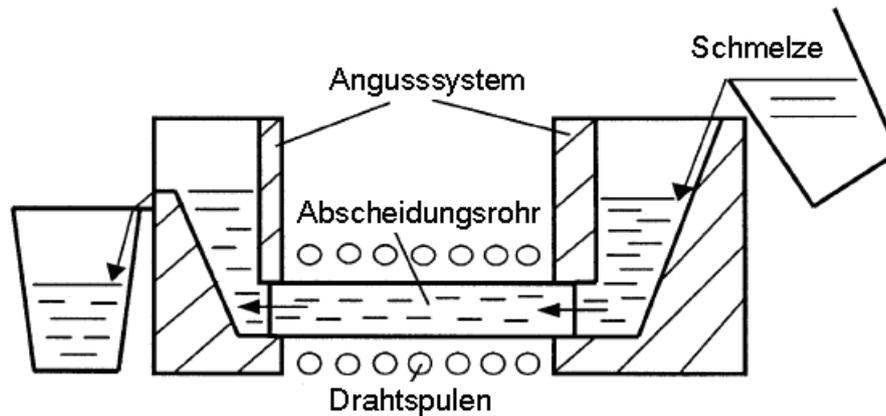


Abbildung 4-17: Darstellung der elektromagnetischen Vorrichtung bei einem kontinuierlichen Prozess [36]

Drahtspulen zur Anbringung des magnetischen Feldes umwickeln das Abscheidungsrohr, welches aus vier Kanälen besteht, die mit gesintertem Gips ummantelt sind. Die Öffnungen können rund bzw. quadratisch sein (siehe Abbildung 4-18) [36].

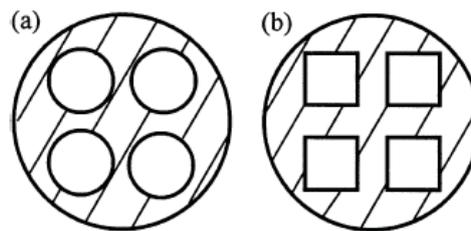


Abbildung 4-18: Querschnitt der Abscheidungsrohre mit runden (a) bzw. quadratischen Kanälen (b) [36]

Versuche ergaben, dass die Effektivität bei kontinuierlichen Prozessen geringer war als bei diskontinuierlichen bzw. geschlossenen Schmelzbadbehandlungen. Des Weiteren zeigen bei zuletzt genannter Behandlung quadratische Kanäle eine höhere Wirksamkeit als runde [36].

4.2 Behandlungen aus der Kupferindustrie

In diesem Unterkapitel wird auf die verschiedenen Behandlungsmethoden aus der Kupferindustrie eingegangen, wobei häufig diverse Vakuumanlagen zu finden sind (Kapitel 4.2.1). In Kapitel 4.2.2 sind weitere Behandlungsarten mit Filtersystemen, Spülgasanlagen und Kohlenstoff beschrieben.

4.2.1 Vakuumbehandlung

Um die aufgelösten flüchtigen Gase im Oxygen Free Copper (OFC) reduzieren zu können, ist die Vakuumbehandlung die effektivste Methode. Mit dieser Technologie lässt sich aufgrund der daraus resultierenden geringen Porosität des Kupfers Normen der ASTM-F-68 Class 1 erreichen. Analysen aus der Gaschromatographie zeigen, dass der gelöste Gasgehalt im Gegensatz zum herkömmlich abgegossenem OFC-Kupfer um 50 % verringert werden kann. Mit der Vakuumentgasung sollen also möglichst wirkungsvoll die flüchtigen Gase und Porositäten reduziert werden. Die Anlage besteht aus einem Schmelzofen, Halteofen und einer Gießmulde. Kupferkathoden werden in dem Schmelzofen einchargiert und aufgeschmolzen. Mittels Vakuumpumpen fließt das flüssige Kupfer in den Halteofen und weiter in die Gießmulde zum Abgießen. Das Gefüge ist in Abbildung 4-19 dargestellt. Verglichen mit dem herkömmlichen Gießen weist es keine Porositäten auf. Es zeigt sich, dass der Wasserstoffgehalt und die Porositäten reduziert werden können [37].

Eine anschließende Oberflächenbehandlung kann unter anderem durch einen Ionenbeschuss mit Argon erfolgen. Damit kann ein Wasser- und Sauerstoffgehalt um weniger als die Hälfte im Gegensatz zum herkömmlich gegossenen OFC-Kupfer erreicht werden [37].

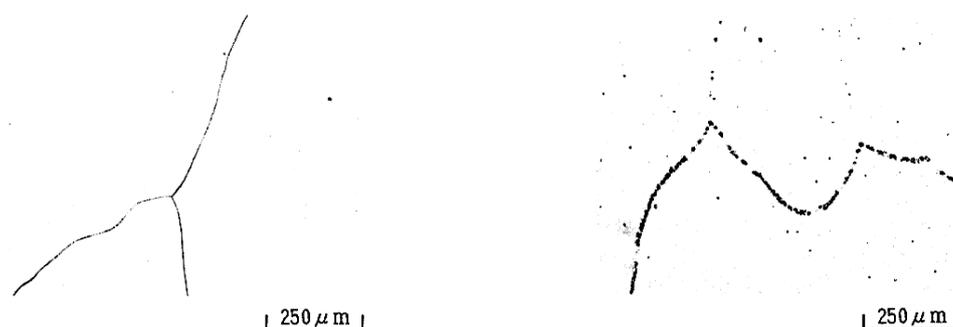


Abbildung 4-19: Darstellung des mit Vakuum behandelten Kupfers (links) und des herkömmlich abgegossenen Kupfers (rechts) [37]

Der für die folgende Apparatur (Abbildung 4-20) geeignete Werkstoff muss bereits dehydriert sein. Zum Einsatz kommt dafür hochreines sauerstofffreies Kupfer mit einem Gehalt von 99,99 % und größer. Um Entgasungseigenschaften zu besitzen, beinhaltet es 1 bis 15 ppm Zr, maximal 3 ppm Sauerstoff und 0,2 bis 0,5 ppm Wasserstoff, womit auch eine Wärme- und elektrische Leitfähigkeit gewährleistet ist. Der Grund des Zirkongehalts liegt darin, dass die Dehydrierung wesentlich einfacher und besser verläuft. Die Zugabe in das hochreine, sauerstofffreie Kupfer erfolgt durch Zulegieren von Zirkon, da dieses eine hohe Affinität zu Sauerstoff hat und diesen abbindet. Der Wasserstoffgehalt senkt sich durch Ausgasen. Weniger als 1 ppm Zirkon bewirkt keine Abbindung des Sauerstoffs und mehr als 15 ppm reduziert den Entgasungseffekt bezüglich des Wasserstoffs beträchtlich. In Abbildung 4-20 sind der Schmelzofen (1), das Abflussrohr (2), der Verteiler (3), der Legierungsapparat (4), das Gießrohr (5), die Kokille (6), die Abdeckung mit Graphitpartikeln (7), eine abgedichtete Gasquelle (8) und schlussendlich der Barren (9) zu erkennen [38].

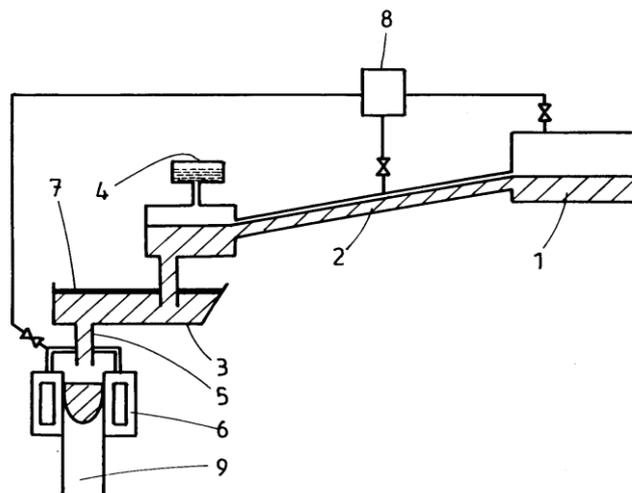


Abbildung 4-20: Schematische Darstellung der Vakuumeinheit [38]

Um dieses hochreine Kupfer herstellen zu können, werden zuerst Kupferkathoden mit einer Reinheit von 99,99 % in einem Schmelzofen und einer CO-N₂-Atmosphäre erschmolzen. Die Schmelze fließt über das Abflussrohr in einer weiterhin vorherrschenden CO-N₂-Atmosphäre in den Verteiler. Bevor das Metall den Verteiler erreicht, wird über den Legierungsapparat das Zirkon zulegiert. Im Verteiler erfolgt das Abdecken des Metallbades mit Graphitpartikeln, um eine Oxidation zu vermeiden. Das Kupfer gelangt über das Gießrohr in die Kokille, die mit CO-N₂-Gas umspült ist und zu Barren vergossen wird [38].

Nachfolgende Tabelle 4-1 zeigt einen Vergleich der unterschiedlichen Behandlungsarten. Dabei werden Werte der vorliegenden Erfindung, Vergleichswerte und der konventionellen Art gegenübergestellt. Die entnommene Probengröße der Barren entsprach den Maßen 25 mm · 25 mm · 8 mm. Andere Probenmaße wurden für konventionelle Art herangezogen, welche einen Durchmesser von 20 mm und eine Höhe von 4 mm hatten [38].

Tabelle 4-1: Vergleich der unterschiedlichen Behandlungsarten [38]

Vakuum-Apparatur		Zusammensetzung				Entgasungsrate (Pa · l / sec · cm ²)
		Reinheit Elektrolytkupfer (%)	Zr (ppm)	O ₂ (ppm)	P (ppm)	
Vorliegende Erfindung	1	99,998	3	1,8	-	176,89 · 10 ⁻¹¹
	2	99,998	4	2,0	-	288,61 · 10 ⁻¹¹
	3	99,998	3	1,7	-	311,22 · 10 ⁻¹¹
	4	99,998	1	0,7	-	897,75 · 10 ⁻¹²
	5	99,998	7	1,8	-	1194,34 · 10 ⁻¹²
	6	99,998	12	2,0	-	342,10 · 10 ⁻¹¹
	7	99,998	14	2,7	-	284,62 · 10 ⁻¹¹
	8	99,998	6	1,2	-	1299,41 · 10 ⁻¹²
	9	99,998	11	1,5	-	969,57 · 10 ⁻¹²
	10	99,998	10	2,0	-	134,33 · 10 ⁻¹¹
Vergleichs- werte	1	99,998	7	5,0*	-	825,93 · 10 ⁻¹⁰
	2	99,998	0,6*	1,8	-	359,10 · 10 ⁻¹⁰
	3	99,998	18 *	1,2	-	1102,57 · 10 ⁻¹¹
Konventionelle Art	1	99,998	-	2,0	3,1	167,58 · 10 ⁻¹⁰
	2	99,998	-	1,5	2,8	1186,36 · 10 ⁻¹¹
	3	99,998	-	2,5	-	258,02 · 10 ⁻¹⁰
* Werte sind außerhalb des Bereichs der Erfindung						

Alle Probenstücke wurden zum Entgasen und Ausheizen eine Stunde lang bei 500 °C und unter einer Vakuumatmosphäre von $266 \cdot 10^{-5}$ Pa beansprucht. Danach erfolgte eine weitere Behandlung, wobei die Parameter mit 500 °C und $133 \cdot 10^{-10}$ Pa festgelegt wurden [38].

Die Ergebnisse in Tabelle 4-1 zeigen, dass die Entgasungsrate bei der vorliegenden Erfindung am geringsten ist. Dadurch wird ein schnelleres Austreten des Wasserstoffs ermöglicht. Die Resultate der Vergleichswerte können nicht herangezogen werden, da die Gehalte des Zirkons und Sauerstoffs unter bzw. über den geforderten Werten liegen [38].

Mit der nachfolgenden Apparatur (Abbildung 4-21) ist ein kontinuierliches Entgasen möglich, wobei das Metall dafür in eine Vakuumkammer geführt wird. Zuvor passiert das Kupferbad eine erste Kammer, welche mit der Behandlungskammer durch eine Röhre am Grund des Bodens verbunden ist. Nach der Vakuumbehandlung gelangt das Metall in die Gießkammer. Es sind weitere Apparaturen bekannt, in denen zwei Vakuumkammern angebracht sind, bzw. wird in eigens optimierten Öfen eine Vakuumbehandlung durchgeführt. Durch Einsatz solcher Vakuumapparaturen kann der Wasserstoffgehalt auf kleiner 1 ppm reduziert und gleichzeitig ein Anstieg des Sauerstoffs unterbunden werden. In Abbildung 4-21 ist die Vakuumapparatur dargestellt, welche die Einlasskammer (10) und die Induktionskanäle (11) zeigt, die die Schmelze in die erste Kammer (20) leiten. Der Zu- (15) und Abfluss (16) steuern das flüssige Kupfer in die Gießkammer (13). Die beiden Rohre (15 und 16) führen das Metall aus der Vakuumkammer (17) ab bzw. zu. Fünf Rohre (18) dienen dazu, das Vakuum zu erzeugen. Die erste Kammer (20) und die Gießkammer (13) sind durch einen Damm (12) getrennt. Das Metall findet seinen Weg nur über die Vakuumkammer (17) solange die maximale Badhöhe (21) am Trenndamm (12) nicht erreicht wird. Sollte aber das Maximum überschritten werden, führt der Weg der Schmelze aus der ersten Kammer (20) direkt in die Gießkammer (13). Dies kann bei einem Ausfall der Vakuumkammer (17) ausgenutzt werden. Zuschläge können über (23) zugeführt werden. Zur Temperaturführung ist an der aufsteigenden bzw. abfallenden Röhre (15, 16) ein Brenner (19) angebracht. Am Boden der Gießkammer (13) ist ein Gießrohr (14) installiert. Aufgrund des geringeren Drucks in der Vakuumkammer steigt das Metall in der Röhre (16) in die Behandlungskammer zur Entgasung und fließt anschließend über (16) in die Gießkammer [39].

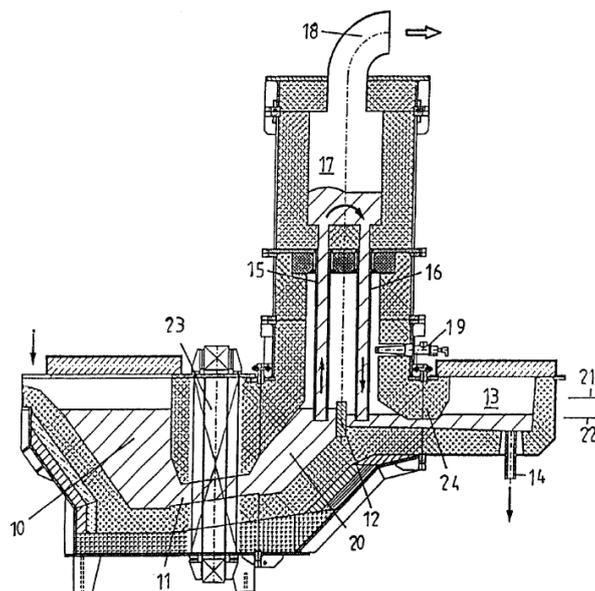


Abbildung 4-21: Schematische Darstellung der Apparatur [39]

Eine weitere Vakuumapparatur ist eine feuerfest ausgekleidete Entgasungskammer (4), in der das geschmolzene Metall eintritt (Abbildung 4-22). Die Kammer (4) ist leicht entfern- und abziehbar [40].

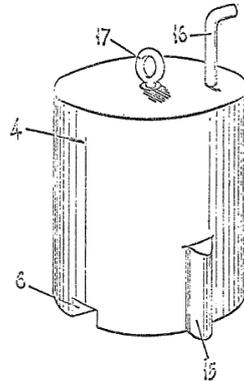


Abbildung 4-22: Schematische Darstellung der Entgasungskammer [40]

Die glockenähnliche Entgasungskammer (4) besitzt einen Einlasskanal (5), der in einen relativ flachen, feuerfest ausgekleideten Behälter (7) führt (Abbildung 4-23). Darin ist eine Vakuumpumpe mit Leitung (16) installiert. Soll eine Vakuumbehandlung erfolgen, tritt das geschmolzene Metall durch den atmosphärischen Druck über eine Einlassöffnung (6) in die evakuierte Kammer (4). Während der Behandlung kann das Bad durch elektromagnetische Induktion von Spulen (8) umgerührt werden. Das Metall fließt dabei in Richtung der dargestellten Pfeile (10) (Abbildung 4-23). Wenn die niederfrequenten, mehrphasigen Spulen (8) keinen direkten Kontakt mit der Vakuumkammer (4) haben sollen, ist es möglich, eine Metallhülle (20) aus nichtmagnetischem Werkstoff anzubringen. Zusätzlich kann zum Schutz der Spulen (8) ein Hitzeschild (9) eingebracht werden. Eine Rippe (11) führt das flüssige Metall nach oben in den Bereich des elektroinduktiven Rührens. Durch das Rühren kann eine Baderwärmung erfolgen. Wird dieser Effekt ausgenutzt, sollten die Spulen (8) im Feuerfest-Material des Behälters (4) angebracht werden und nicht außerhalb der Metallhülle. Über die Auslassöffnung (12) und einen Kanal (13) verlässt das entgaste Metall die Vakuumkammer (4). Der Kanal (13) führt zur Gießanlage, welche nicht abgebildet ist. Um eine Oxidation des Metalls im Kanal (13) zu verhindern, sollte dieser mit Schutzgas umspült werden. Die Vorsprünge (14, 15) verhindern, dass das Metall nur durch den Ringraum (19) ohne Vakuumbehandlung durchfließt. Zusätzlich können am oberen Ende der Entgasungskammer Heizelemente installiert werden. Eine wirkungsvollere Entgasung kann durch Zugabe pulverisierter Kohle am oberen Ende der Entgasungskammer (4) und bzw. oder inerte Gase nahe des Einlasses (6) erfolgen. Am Ende des Verfahrens dient ein Auge (17) zum Anheben der Kammer (4). Durch einen entfernbaren Stopfen (18) kann am Beginn des Verfahrens ein höheres Badniveau eingestellt werden [40].

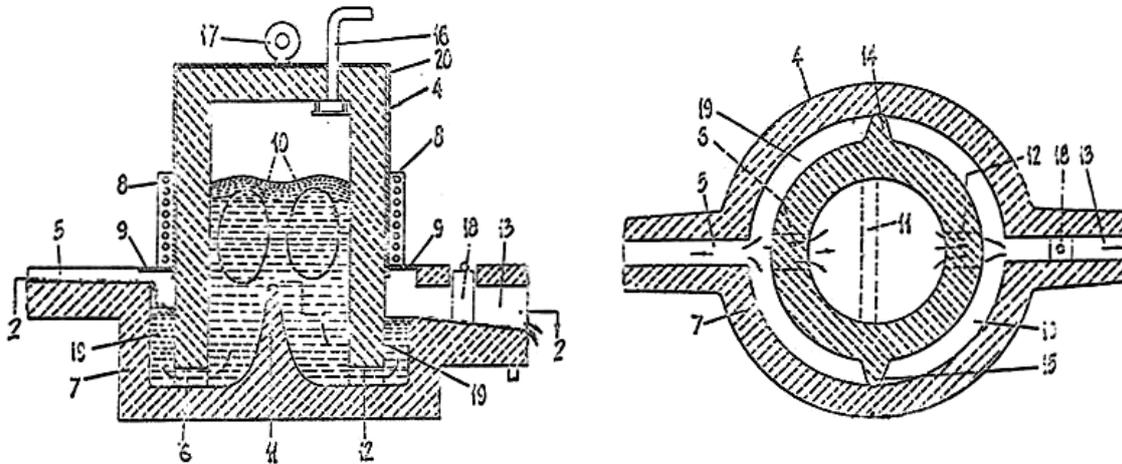


Abbildung 4-23: Darstellung der Entgasungskammer von vorne (links) und Grundriss (rechts) [40]

In der folgenden Anlage tritt das geschmolzene Metall (1) aus dem Schmelztiegel, hier nicht dargestellt, durch den Einlass (2) in den Vorratstiegel (3) (Abbildung 4-24). Dabei ist ein kontinuierliches Vergießen möglich. Mit der Induktionsherdstelle (4) lässt sich die gewünschte Temperatur einstellen. Eine Düse (7), welche unter einem Absperrorgan (6) installiert ist, leitet das geschmolzene Metall (1) in einen Verteiler (5) und weiter in die Kokille (8) um einen Block (11) zu gießen. Über dem Tiegel (3) sind zwei Vakuumkammern (91, 92) angebracht. Ihnen werden Vakuumentgasungsmittel (9) zugeführt. Die Kammern (91, 92) bestehen aus feuerfestem Material, haben an der unteren Seite Öffnungen (93, 94) und sind von niederfrequenten Induktionsspulen umgeben (95, 96). Die Ventile (101, 102) verbinden die Kammern (91, 92) mit einer Vakuumpumpe (nicht dargestellt). Die Verbindung mit dem Inertgasvorrat ist durch die Ventile (111, 112) gewährleistet. Durch das Öffnen (101) und das Schließen des Ventils (102) wird ein Teil des geschmolzenen Metalls (1) in die Vakuumkammer (91) gepumpt. Erfolgt die Öffnung (112) und die Schließung des Ventils (111), wird ein Teil des geschmolzenen Metalls (1) aus der Vakuumkammer (92) abgeführt. Die Entgasung findet in der Kammer (91) statt, das Entweichen des Metalls in Kammer (92) und das Einleiten des Inertgases durch das Ventil (112). Somit kann das Verfahren in abwechselnden Intervallen durch das Schließen bzw. Öffnen der Ventile (101, 102, 111 und 112) gesteuert werden. Die Induktionsspulen (95, 96) erhitzen nicht nur das Metall, sondern halten eine Badbewegung durch elektromagnetische Kräfte aufrecht. Die Behandlung in Kammer (91) beträgt circa zwei Minuten, sobald etwa 66,66 Pa (0,5 Torr), erreicht sind. Um eine Badbewegung im Bereich (5) zu verhindern, sollten die Öffnungen (93, 94) schlitz- oder bohrungsartige Formen aufweisen und kleiner als der Innendurchmesser der Kammern (91, 92) sein [41].

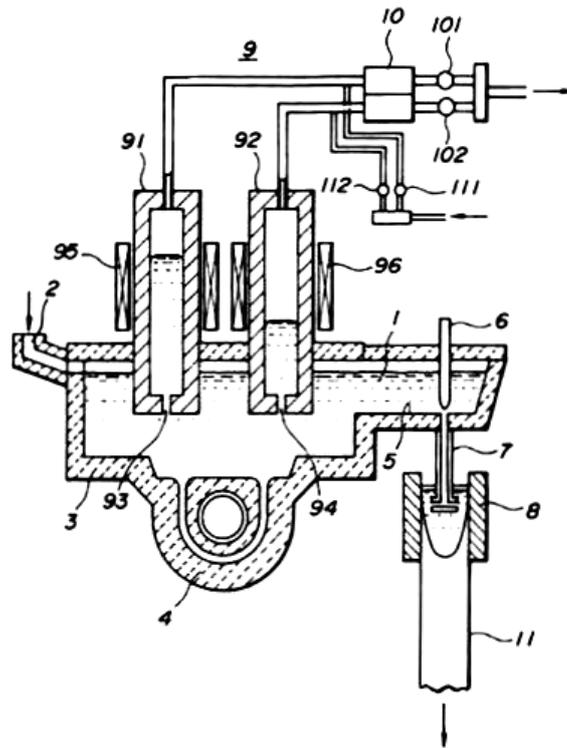


Abbildung 4-24: Schematische Darstellung der Apparatur [41]

Die Abbildung 4-25 stellt den Verlauf des Wasserstoffs gegenüber der Zeit und des Drucks bei der Behandlung eines sauerstofffreien Kupfers mit der soeben beschriebenen Behandlungsart dar. Es zeigt sich, dass die Verfahrensdauer mit circa einer Minute und 66,66 Torr bzw. mit circa 119,988 Pa und fünf Minuten ausreicht. Die beschriebene Apparatur kann bei herkömmlichen Gießanlagen ohne Änderungen an der Konstruktion verwendet werden [41].

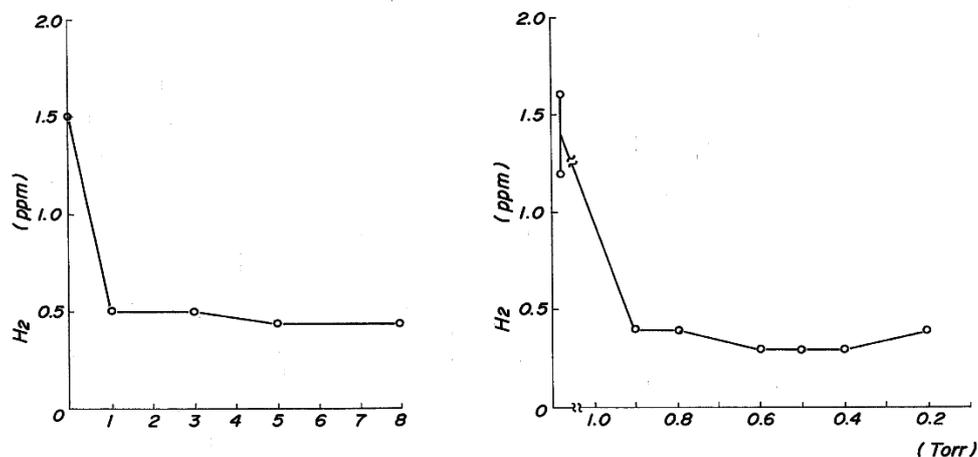


Abbildung 4-25: Verlauf des Wasserstoffs gegenüber der Zeit bei 66,66 Pa (0,5 Torr) (links) und dem Druck bei 5 Minuten (rechts) [41]

4.2.2 Filter- und Spülgasbehandlungen sowie Einsatz von Kohlenstoff

Die folgende Abbildung 4-26 zeigt den Verteiler (11) mit dem eingebauten Keramikschaumfilter (15). Das Kupfer, welches am Einlass (Abbildung 4-26 links) eingeführt wird, durchfließt den Filter und verlässt den Verteiler durch den Auslassspund (13) zum Strangguss. Perforierte Rohre (14) leiten das inerte oder reaktive Gas ein und dieses behandelt die Schmelze bzw. reinigt die Filter. Eine Vakuumatmosphäre wird durch (16) eingeleitet und entgast damit das Kupfer. Als Abdichtung dient ein Deckel (12) [42], [43].

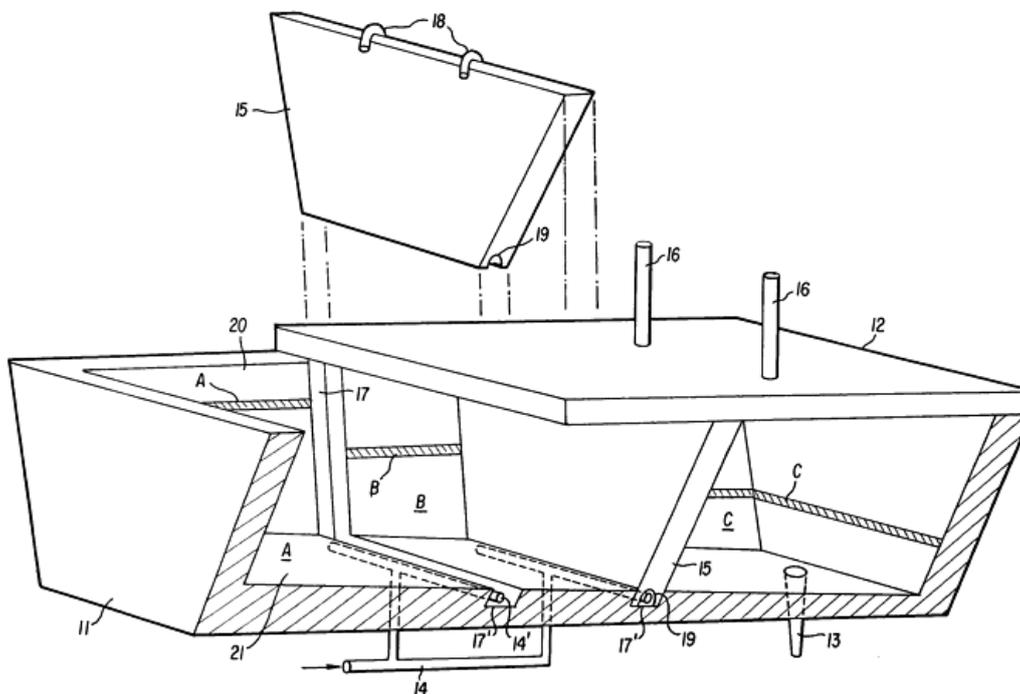


Abbildung 4-26: Schematische Darstellung des Verteilers [42], [43]

Die Filter bestehen aus metallischen Oxiden und Phosphaten (z. B. Aluminiumoxid und -phosphat in der Aluminiumindustrie) und sollen das Kupferoxid auflösen. Der gelöste Sauerstoff wiederum bindet die gelösten Metalle und Nichtmetalle, wie z.B. Eisen und Kalzium, ab. Durch die Form und den vorgesehenen Führungsschienen (17) an der Verteilerwand (20) ist eine einfache Installation und Positionierung möglich und durch den Einsatz zweier Filter können drei Kammern (A, B, C) gebildet werden. Die Handgriffe (18) tragen ebenso zur Erleichterung bei. In Abbildung 4-26 ist der Filter 90° zur Strömungsrichtung des Metalls angebracht. Der Winkel kann aber 30° bis 150° betragen. Diese unterschiedlichen Anbringungen tragen dazu bei, die effektive Filterfläche zu

vergrößern, oder die Lebenszeit zu erhöhen. Jeder Filter hat eine Porendichte von 25 bis 35 Poren pro linearen inch (= 2,54 cm) und einen Volumenanteil der Hohlräume von ungefähr 75 - 95 (vorzugsweise 85 - 95 %.) Das Einleiten des Gases unter dem Filter führt zu einem zweifachen Nutzen. Einerseits reinigen die Gasbläschen die Filterfläche, sobald sie diese durchwandern, andererseits erfolgt durch die Filter eine bessere Durchmischung des Gases mit dem Metallbad [42], [43].

Diese folgende Apparatur (Abbildung 4-27) dient dazu, die Oberflächenqualität des gegossenen Kupfers wesentlich zu verbessern. Bei Kupferqualitäten mit niedrigem Sauerstoffgehalt kann der Wasserstoff zu Poren führen und dies beeinträchtigt, wie bereits erwähnt, die Qualität. Der Sauerstoffgehalt dieser Kupferqualitäten beträgt maximal 20 ppm Sauerstoff, bevorzugt aber 1 bis 10 ppm. Der Wasserstoff unterschreitet die 1 ppm Grenze [44].

Abbildung 4-27 zeigt eine schematische Darstellung der gesamten Einheit, welche aus einem Schmelzofen (A), einem Sickerofen (B), einer Gießmulde (C), einer Gießanlage (D), einer Schere (E) und einer Verlegeeinheit (F) besteht. Der Schmelzofen (A) hat zumeist eine zylindrische Form, unter dem sich mehrere Brenner befinden (nicht abgebildet). Während der Verbrennung herrscht reduzierende Atmosphäre, die durch ein Gemisch aus Erdgas und Luft erreicht wird. Nach diesem Vorgang ist das Kupfer desoxidiert [44].

Das Kupfer durchläuft nach dem Schmelzofen (A) nur kurz den Sickerofen (B), welcher lediglich dazu dient das Temperaturniveau des flüssigen Metalls zu halten, bevor es in die Gießmulde (C) gelangt [44].

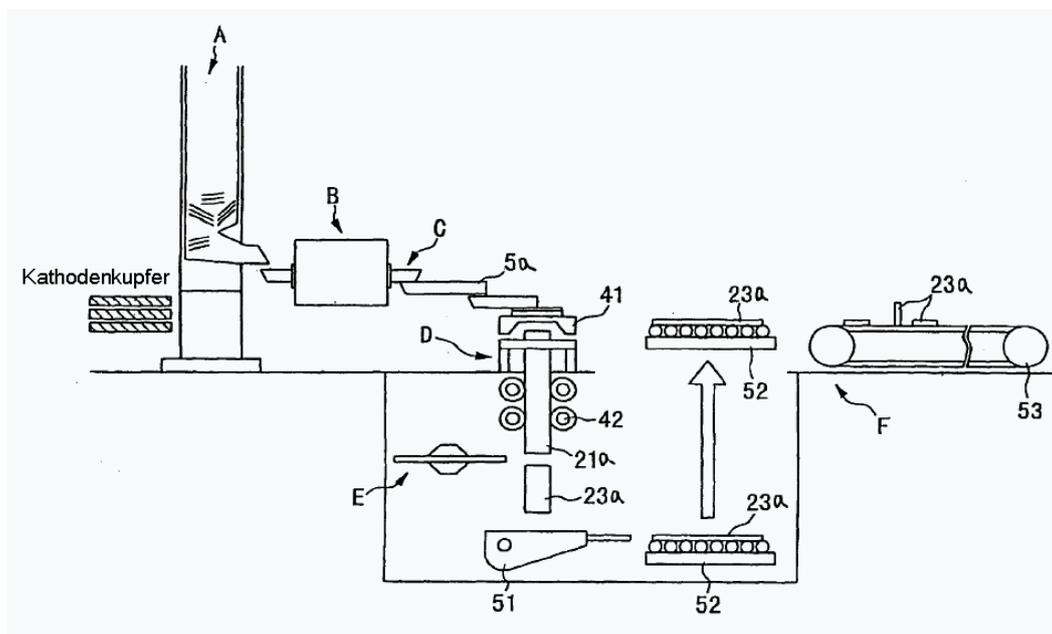


Abbildung 4-27: Schematische Darstellung der Anlage [44]

In der Gießmulde (C) herrscht eine nicht oxidierende Atmosphäre. Nachfolgende Abbildung 4-28 zeigt eine detaillierte Darstellung der Gießmulde. Als Abdichtung der Mulde (C) dient ein Deckel (8) und die nichtoxidierende Atmosphäre erfolgt durch Einblasen von Stickstoff und Kohlenmonoxid bzw. dem Inertgas Argon. In der Gießmulde (C) sind Rührsysteme (33), so genannte Dämme (33a - d) installiert, um eine Entgasung des Kupfers zu ermöglichen. Die Dämme befinden sich an unterschiedlichen Positionen, (33a) am Deckel, (33b) am Boden, (33c) und (33d) an den seitlichen Wänden, womit auch die Fließrichtung bestimmt wird (siehe Abbildung 4-28 rechts). (32) zeigt die Badoberfläche. In erster Linie erfolgt mit dem Rührsystem (33) eine Dehydrierung, jedoch kann damit auch der Sauerstoff entweichen. Weiters könnten die Dämme beispielsweise aus Kohlenstoff bestehen, womit eine Desoxidation eingeleitet wird [44].

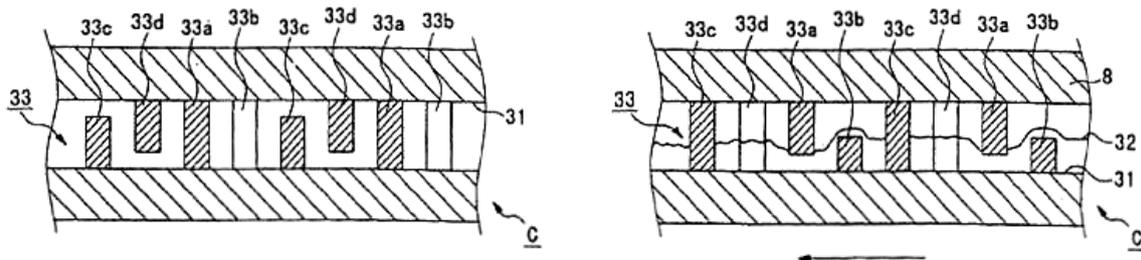


Abbildung 4-28: Detaillierte Darstellung der Gießmulde von oben (links) und seitlich (rechts) [44]

Die Entgasung findet bereits in der Gießmulde statt und nicht erst im Verteiler (5a). Dies könnte sonst zu einer ungewollten Badbewegung durch die eingeleiteten Gasbläschen führen, was sich auch noch in der Gießanlage (D) auswirken könnte. Nach der Gießanlage kann das abgossene Kupfer durch beispielsweise eine fliegende Schere (E) in die gewünschte Dimension gebracht werden. Die Verlegeeinheit (F) besteht aus einem Korb (51), Lift (52) und einem Förderband (53) [44].

In einer weiteren Anlage (Abbildung 4-29) durchläuft das flüssige Metall mehrere Keramikschaumfilter, wobei gleichzeitig eine Entgasung durch das Einleiten eines Gases mittels Spülsteinen erfolgt. Über jedem Spülstein ist eine Vakuumröhre angebracht, die das Gas aus der Schmelze führen soll [45].

In Abbildung 4-29 ist die Apparatur (10) mit der Behandlungskammer (20) dargestellt. Das zu behandelnde Metall wird durch ein Rohr (12) eingebracht und verlässt die Kammer wiederum durch ein Rohr (14), das einem Ausguss gleicht. Nach dem Austritt des behandelten Metalls durch (14) gelangt dieses in die kontinuierliche Gießmaschine (nicht dargestellt). Die Brenner (22) gewährleisten eine kontrollierte Temperaturführung bzw. dienen auch zum Aufheizen

der Kammer. Mit dem Kanal (24) erfolgt die Regulierung der Gasatmosphäre bezüglich Zusammensetzung und Druck oberhalb der Schmelze (18). Um die Badoberfläche (18) vor einer Oxidation zu schützen, wird Kohlenwasserstoff eingeleitet. Während der Behandlungsdauer muss das flüssige Kupfer (16) mehrere Filter (30a - 30e) passieren, welche immer feiner werden, je näher das Metall (16) zum Auslass (14) gelangt. Die Filter (30a) und (30b) haben eine Porengröße von 10 - 30 Poren pro Quadratzoll (= 6,4516 cm²), (30c) und (30d) 25 - 35 Poren pro Quadratzoll und Filter (30e) hat 30 - 50 Poren pro Quadratzoll. Stickstoff, als Behandlungsgas, gelangt über die Spülsteine (40a - c) und deren Leitungen (42a - c) in das Bad. Aufgrund der unzähligen Poren, die eine Größe von 40 - 70 Mikrometer haben, wird der Stickstoff in Form von Gasbläschen in das Bad eingeblasen. Damit die Bläschen aus dem Bad schneller und einfacher entweichen, wurden oberhalb der Spülsteine Vakuumröhren (50a - c) und Abzüge (52a - c) installiert. Der Vorteil dieser Apparatur liegt darin, dass nicht in der Behandlungskammer (20) selbst ein Vakuum angebracht werden muss, sondern dass dies mittels der mehrfach installierten Vakuumröhren erlangt wird, wodurch eine einfachere Prozesssteuerung möglich ist. Insgesamt sind 30 Filter, 40 poröse Spülsteine und 50 Vakuumröhren vorhanden. Die Anzahl der verschiedenen Behandlungsapparaturen kann variiert werden [45].

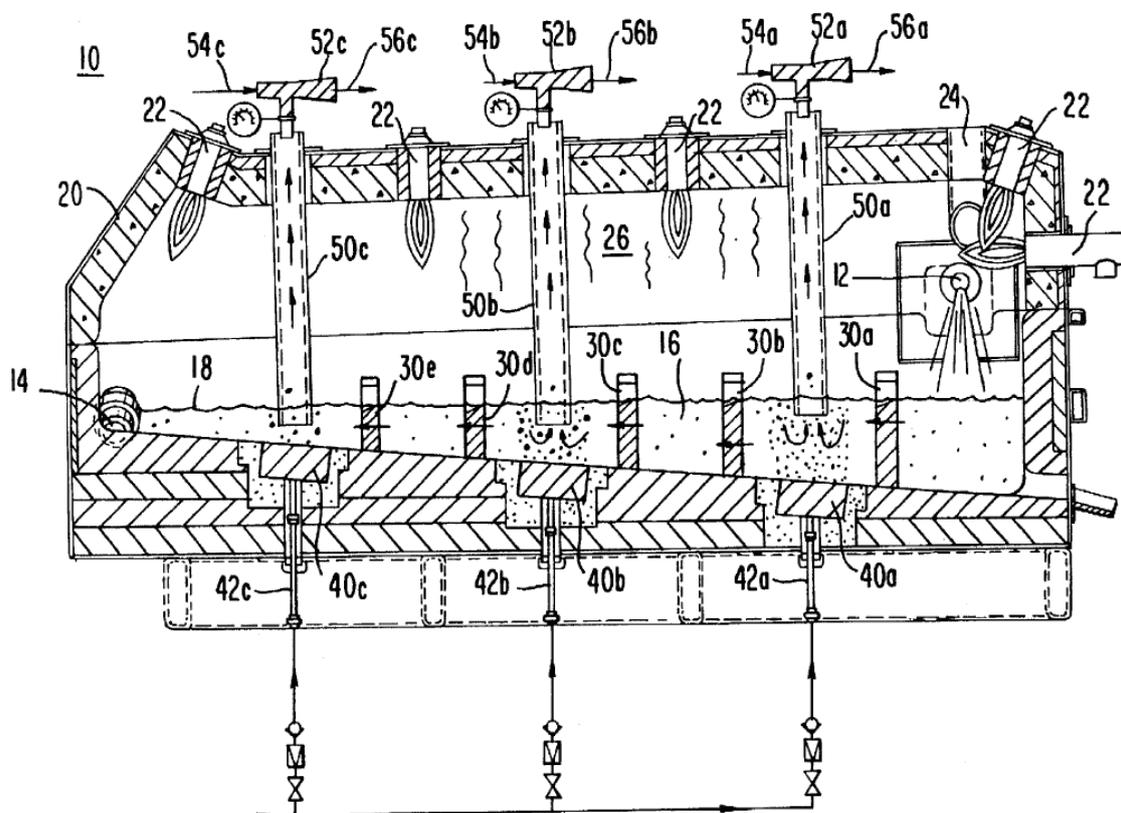


Abbildung 4-29: Schematische Darstellung der Anlage [45]

Nachfolgend wird ein Rotorsystem (Abbildung 4-31) beschrieben. Mit dem Einblasen von Gasen ist ein bedeutenderer Einfluss auf die Desoxidation zu vermerken als mit einer bloßen Abdeckung durch Graphit (siehe Abbildung 4-30) [46].

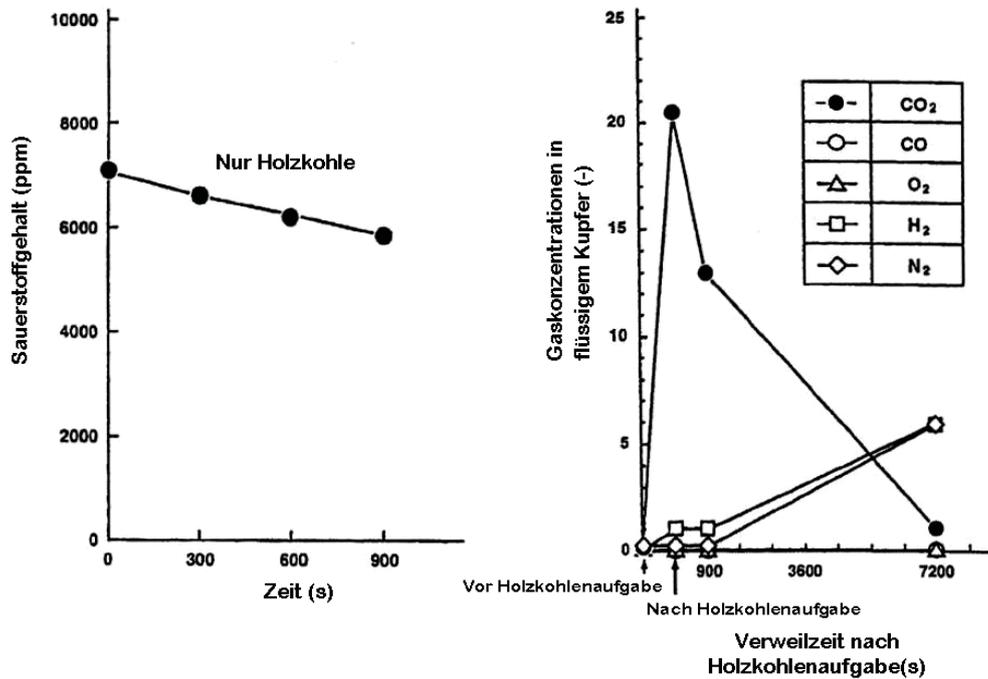


Abbildung 4-30: Sauerstoffverlauf (links) und weitere Gasverläufe (rechts) durch Abdeckung mit Holzkohle [46]

Es sind drei verschiedene Methoden bei einer Kupfermenge von 350 kg verglichen worden. Dabei zeigt sich als effektivste die „rotary shearing blow method“, siehe dazu Abbildung 4-31 [46].

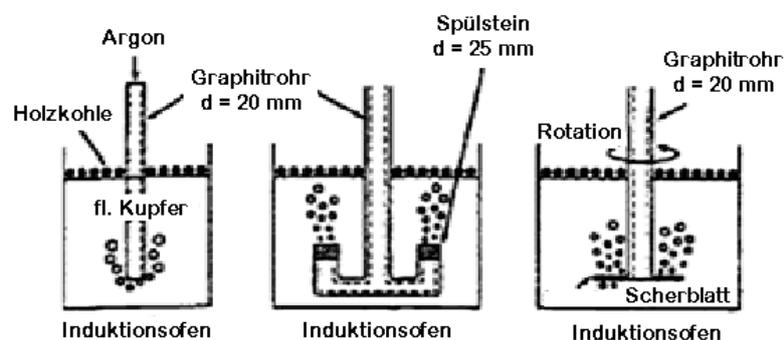


Abbildung 4-31: Darstellung verschiedener Rotoren, unter anderem der Shear blade Rotor (rechts) [46]

Mit der „rotary shearing blow method“ konnte in 600 Sekunden der Sauerstoffgehalt von 9500 ppm auf 18 ppm reduziert werden (Abbildung 4-32) [46].

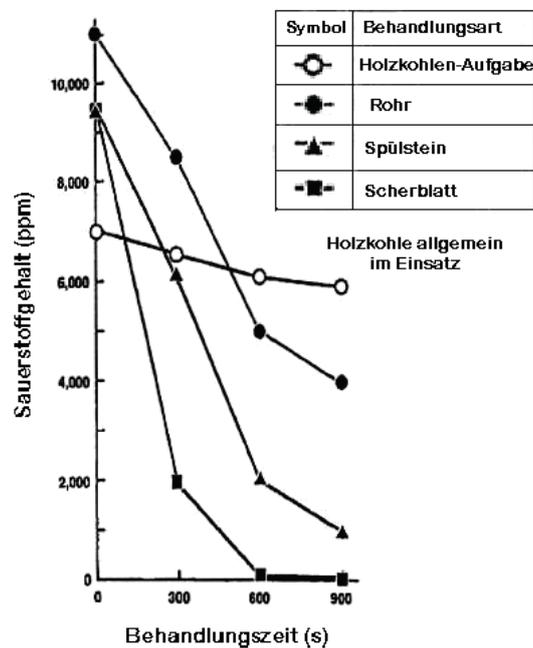


Abbildung 4-32: Effekt durch das Einblasen von Argon [46]

Als diese Behandlungsart für kommerzielle Zwecke vor dem Gießen in der Pfanne eingesetzt wurde, sank der Sauerstoffgehalt von 150 ppm auf 10 ppm und der Wasserstoffgehalt von 0,7 ppm auf 0,1 ppm [46].

Die Reduktion durch Verwendung von Gas ist die meist studierte bzw. erforschte Technik, die Reduzierung mittels Graphit hingegen die meist verwendete. Der Kohlenstoff hat ein hohes thermodynamisches Potenzial um den gelösten Sauerstoff im flüssigen Kupfer zu reduzieren. Durch den Einsatz von Kohlenstoff, z. B. in Form von Graphitstäben, -partikel, -filter oder Abdeckmittel, kann auch oxygen-free-copper (OFC) hergestellt werden. Abbildung 4-33 zeigt die Versuchsanlage. Es wurde dafür bereits raffiniertes Kupfer mit einem analysierten CuO-Pulver vermischt, um einen Sauerstoffgehalt von 0,5 Gew.-% zu erreichen. Die Erschmelzung von jeweils 600 g erfolgte in einem MgO-Tiegel (8). Dieser Tiegel wurde in einem Al₂O₃-Reaktionsgefäß (2) geführt. Des Weiteren waren für diese Anlage eine Stickstoffzufuhr (1), R-Type-Thermoelemente (3), ein Gasfilter (4), ein Infrarot CO/CO₂-Analysegerät (5), ein Datenerfassungssystem (6) und elektrische Heizelemente (9) von Nöten. Abwechselnd fand versuchsweise eine Reduzierung mit zwei Graphitstäben a 6,3 mm Durchmesser (a) bzw. Graphitplatten mit einem Durchmesser von 43 mm und einer Höhe von 14 mm (b) statt [47].

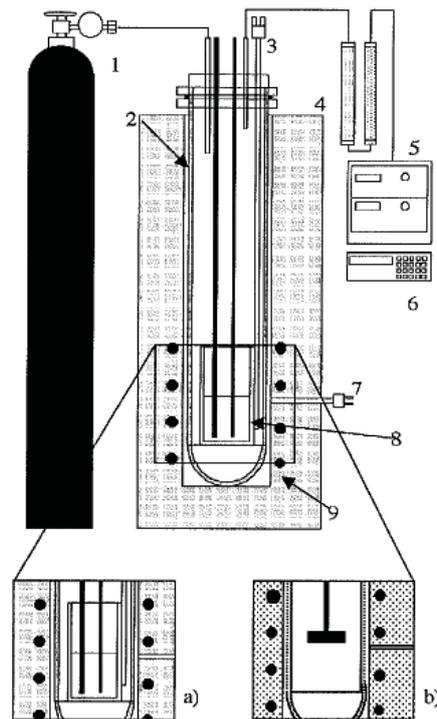
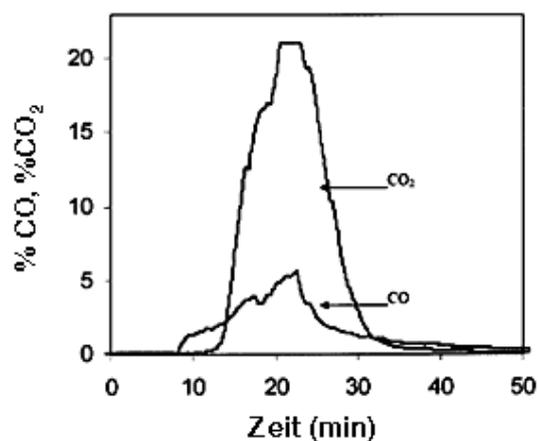


Abbildung 4-33: Schematische Darstellung der Versuchsanlage [47]

Stickstoff wird mit einem Volumenstrom von $2300 \text{ cm}^3/\text{min}$ eingeleitet und sobald das Kupfer erschmolzen ist, erfolgt das Eintauchen der jeweiligen Graphitausführung. Sobald laut Analysegerät die Abgasmenge an $\text{CO}_{(\text{g})}$ und $\text{CO}_{2(\text{g})}$ gegen null geht, werden die Graphitstäbe bzw. -platten aus dem Bad gehoben. In Abbildung 4-34 ist der Verlauf des CO und CO_2 dargestellt [47].

Abbildung 4-34: Darstellung des CO- und CO_2 -Verlaufs während des Einsatzes der Graphitstäbe bei 1473 K [47]

Nachfolgende Abbildung 4-35 zeigt den Sauerstoffverlauf während der Behandlung mit den Graphitstäben bzw. der -platten bei 1473 K. Mit den Graphitstäben sind geringere Sauerstoffgehalte erreichbar. Wird beides, die Graphitstäbe und eine schwimmende Graphitplatte, gleichzeitig eingesetzt, so verläuft die Reaktionsrate 1,6-mal schneller ab als bei alleinigem Gebrauch der Graphitstäbe [47].

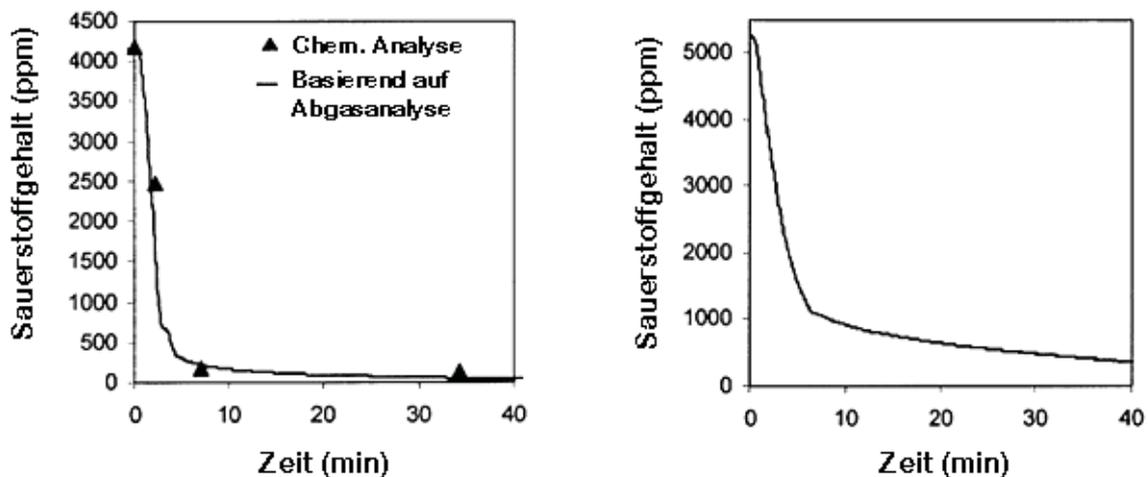


Abbildung 4-35: Darstellung des Sauerstoffverlaufs im flüssigen Kupfer bei 1473 K während des Einsatzes der Graphitstäbe (links) und der Graphitplatten (rechts) [47]

Die Versuche ergaben, dass die Geschwindigkeitsrate bei 1473 K und Einsatz der Graphitstäbe $3,3 \cdot 10^{-4}$ m/s bzw. der Graphitplatte $2,0 \cdot 10^{-4}$ m/s beträgt. Die Aktivierungsenergie beträgt 54 kJ/mol. Die Geschwindigkeitskonstante ist somit von den geometrischen Bedingungen abhängig. Dies kann unter anderem dadurch belegt werden, dass die Stäbe eine schnellere Reaktionsgeschwindigkeit als die Platten aufweisen und die Kombination beider Graphitausführungen die rascheste Entgasung verursacht [47].

4.2.3 Vergleich verschiedener Behandlungsmethoden aus der Kupferindustrie

In diesem Unterkapitel werden drei Methoden gegenübergestellt. Die erste ist die Desoxidation mit Lithium im Ofen und dem Abgießen unter einer Schutzgasatmosphäre. Die zweite Methode ist das Vakuumverfahren und die dritte das Schmelzen unter Schutzgasatmosphäre und dem Abdecken mit einer Holzkohleschicht [48].

Bei der ersten Technologie wurde das Bad auf 1185 - 1205 °C in einem 400 kg Induktionsofen erwärmt und nach einer Probennahme das Lithium zugegeben, siehe dazu Abbildung 4-36. Das Desoxidationsmittel ist in Mengen von 0,004 - 0,010 % aufgelöst worden [48].

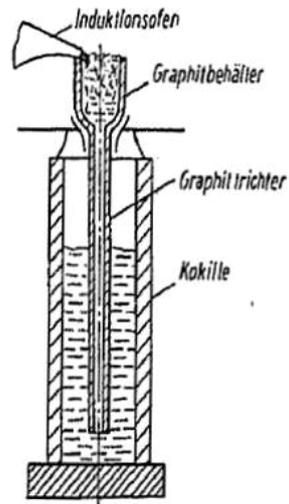


Abbildung 4-36: Schematische Darstellung des Gießverfahrens von sauerstofffreien, mit Lithium desoxidiertem Kupfer [48]

Das Metall gelangt durch einen Graphittrichter in die gusseiserne Kokille, deren Innenwände mit einer Russ-Petroleummischung bestrichen sind. Durch Verbrennung dieser Mischung entsteht während des Gießens in der Kokille eine Schutzatmosphäre. Die Badoberfläche im Trichter wird mit Holzkohle bedeckt [48].

Die mit dieser Methode abgegossenen Blöcke weisen einen kompakten Aufbau und nur jenen Sauerstoffgehalt auf, der im Lösungsbereich des festen Kupfers liegt. Während dieser Versuche konnten keine Korrosionsspuren über die Kupferdesoxidation bemerkt werden [48].

Nachfolgende Abbildung 4-37 stellt eine Makrostruktur des mit Lithium desoxidierten sauerstofffreien Kupfers dar [48].

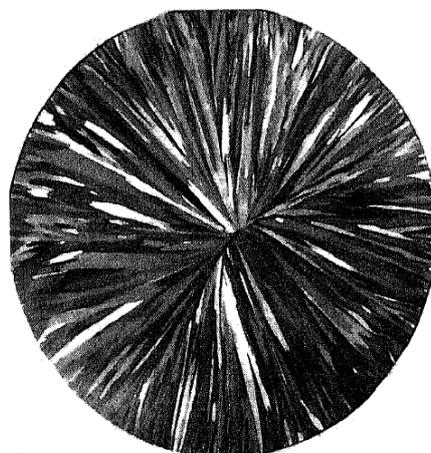


Abbildung 4-37: Die Makrostruktur eines mit Lithium desoxidierten Kupferblechs \varnothing 130 [48]

Nachfolgend wird die zweite mögliche Methode mit der Vakuumbehandlung beschrieben. Abbildung 4-38 stellt die Anlage dar, welche aus einem 500 l Vakuumbehälter besteht, in dem ein Induktionsofen mit Tiegelvolumen von 4 l und ein Vakuumpumpenaggregat installiert sind. Die Pumpen erzeugen eine Druckminderung von $133,32 \cdot 10^{-5}$ Pa [48].

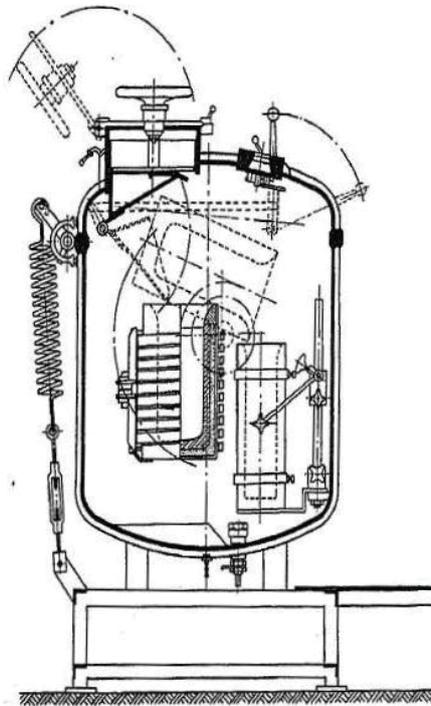


Abbildung 4-38: Schematische Darstellung der Anlage [48]

Folgende Tiegelarten wurden für die Versuche eingesetzt [48]:

- Tiegel aus graphitisierter Kohle
- Graphit-Schamottetiegel mit 60 % Graphitgehalt
- Schamottetiegel
- Korundtiegel; das Metall wurde in Graphitkokillen vergossen

Bei den Versuchen herrschten stets die gleichen Bedingungen, wobei drei Kupferarten als Einsatzmaterial dienten [48]:

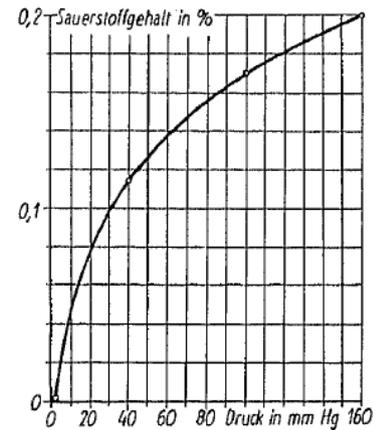
- Kupferkathoden großer Reinheit (99,99 % Cu-Gehalt)
- Kupferblöcke mit einem Cu-Gehalt 99,96 % und 0,035 % O₂-Gehalt
- Elektrolytkupfer, oxidiert bis zu 0,75 % O₂-Gehalt

Während des Versuches erfolgte stets eine Druck- und Temperaturmessung. Der Sauerstoff wurde wie in der ersten Methode mikroskopisch bestimmt [48].

Es fanden vier Versuchsserien statt, wobei in der ersten reine Kupferkathoden in Schamottetiegeln bei verschiedenen Drücken zum Einsatz kamen (Tabelle 4-2). Dabei zeigt sich, dass mit einer Erhöhung des Vakuums der Sauerstoffgehalt sinkt. Bei 0,133 Pa kann sauerstofffreies Kupfer gegossen werden [48].

Tabelle 4-2: Ergebnisse der ersten Versuchsserie über Schmelzen von Kupferkathoden in Schamottetiegeln bei verschiedenen Drücken (links) und empirisch festgelegte Abhängigkeit der Oxidation des geschmolzenen Kupfers vom Druck und bei 1230 °C (rechts) [48]

Schmelze Nr.	Aufwärmen von Schmelzgut bis zur Schmelztemp.		Schmelzen des Einsatzes		Aufwärmen des Metallbades			Sauerstoffgehalt im Barren %	Dichte g/cm ³
	Zeit min.	Druck in mm Hg	Zeit min.	Druck in mm Hg	Zeit min.	Temp. °C	Druck in mm Hg		
1	23	160	20	160	12	1215	160	0,20	8,8
2	20	160	25	160	12	1220	160	0,20	8,65
3	28	100	25	100	12	1220	100	0,17	8,78
4	20	40	30	40	12	1230	40	0,11	8,72
5	20	40	33	40	12	1225	40	0,12	—
6	19	1	20	1	15	1235	1	Spuren < 0,0035 sauerstofffrei	8,79
7	17	$3-10 \cdot 10^{-2}$	21	$4-8 \cdot 10^{-2}$	12	1240	10^{-1}	Spuren < 0,0035 sauerstofffrei	8,93
8	25	$2-9 \cdot 10^{-2}$	31	$1-5 \cdot 10^{-2}$	12	1230	$5 \cdot 10^{-2}$	Spuren < 0,0035 sauerstofffrei	8,87
9	20	$1-7 \cdot 10^{-2}$	28	$10^{-2}-8 \cdot 10^{-2}$	12	1235	$10^{-2}-8 \cdot 10^{-2}$	Spuren < 0,0035 sauerstofffrei	8,91



Für die zweite Serie kamen abermals reine Kupferkathoden allerdings in Graphit-Schamottetiegel zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen aufgrund des gegenwärtigen Kohlenstoffs im Tiegel eine starke Reduktionswirkung auf das Metallbad (Tabelle 4-3). Durch die Anwesenheit von Kohlenstoff reicht bereits ein Vakuum von 133 Pa (1 mm Hg) aus um sauerstofffreies Kupfer herstellen zu können [48].

Tabelle 4-3: Ergebnisse der zweiten Versuchsserie über Schmelzen von Kupferkathoden in Graphit-Schamottetiegeln [48]

Schmelze Nr.	Aufwärmen von Schmelzgut bis zur Schmelztemperatur		Schmelzen des Einsatzes		Aufwärmen des Metallbades			Sauerstoffgehalt im Barren %
	Zeit min.	Druck in mm Hg	Zeit min.	Druck in mm Hg	Zeit min.	Temp. °C	Druck in mm Hg	
10	35	100	30	100	15	1220	100	0,09 – 0,10
11	22	40	13	40	15	1200	40	0,06 – 0,08
12	32	1	25	1	15	1220	1	sauerstofffrei
13	20	1	15	1	10	1210	1	“
14	20	$2-4 \cdot 10^{-1}$	30	$1-3 \cdot 10^{-1}$	60	1230	$2 \cdot 10^{-1}$	“
15	40	$1-5 \cdot 10^{-2}$	20	$3-6 \cdot 10^{-2}$	30	1250	$4-5 \cdot 10^{-2}$	“
16	45	$2-4 \cdot 10^{-2}$	25	$2-5 \cdot 10^{-2}$	5	1240	$5 \cdot 10^{-2}$	“
17	20	$2,5-4 \cdot 10^{-2}$	35	$2 \cdot 10^{-1}$	5	1250	$5 \cdot 10^{-2}$	“

Elektrolytkupfer mit einem Sauerstoffgehalt von bis zu 0,75 % galt als Einsatz für die dritte Versuchsserie, wobei die Dissoziation des im Kupfer gelösten Cu_2O untersucht werden soll. Das Einschmelzen des Kupfers erfolgte in Korundtiegel (Vakuum $133,32 \cdot 10^{-4}$ Pa). Als Abdeckung diente eine Asbestscheibe mit einer Öffnung von 40 mm Durchmesser, damit sich ein dünner Mantel von Kondensationsdämpfen bilden konnte. Um eine Oxidation zu verhindern, fand eine 16 Stunden lange Kühlung der Ofeneinrichtung statt. Das Metall erstarrte inzwischen im Tiegel und anschließend wurde der im Kupfer und Kondensat enthaltene Sauerstoff gemessen (Tabelle 4-4). Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Sauerstoffgehalt im Metall nicht gesenkt werden konnte und der Gehalt im Kondensat 0,06 % O_2 beträgt. Die Dissoziation des Cu_2O verläuft demnach langsam und deutet darauf hin, dass eine Vakuumbehandlung bezüglich Desoxidation hier keine Wirkung zeigt [48].

Tabelle 4-4: Ergebnisse der dritten Versuchsserie über die Desoxidation von oxidiertem Kupfer unter Vakuum [48]

Schmelze Nr.	Dauer der Schmelze min.	Aufwärmen des Metallbades			Sauerstoffgehalt im Barren %	Dichte der dünnen Schicht an den Tiegelwänden mm	Sauerstoffgehalt der kondensierten Dämpfe %
		Zeit min.	Temp. °C	Druck in mm Hg			
18	20	30	1250	$6 \cdot 10^{-2}$	0,75	–	–
19	30	40	1200	$8 \cdot 10^{-4}$	0,75	0,05	0,16
		70	1200	$2 \cdot 10^{-4}$			
		90	1220	$2,5 \cdot 10^{-4}$			
20	15	35	1200	$3 \cdot 10^{-4}$	0,75	0,06	0,35
		60	1220	$2,5 \cdot 10^{-4}$			
		120	1230	$2,5 \cdot 10^{-4}$			
		180	1250	$3 \cdot 10^{-4}$			
		240	1250	$3 \cdot 10^{-4}$			

Kupfersorten mit unterschiedlichem Sauerstoffgehalt wurden in der vierten Versuchsserie der zweiten Methode erschmolzen. Die Ergebnisse in Tabelle 4-5 geben an, dass bei Anwesenheit von Kohlenstoff und einem Vakuum von 133,32 Pa eine weitestgehende Desoxidation erreicht werden kann [48].

Tabelle 4-5: Ergebnisse der vierten Versuchsserie über die Desoxidation oxidierten Kupfers mit Kohle unter Vakuum [48]

Schmelze Nr.	Schmelzgut Sauerstoffgehalt %	Tiegel	Aufwärmen der Charge		Schmelzen des Einsatzes		Aufwärmen des Metallbades			O_2 -Gehalt im Barren %	Bemerkungen
			Zeit min.	Druck in mm Hg	Zeit min.	Druck mm Hg	Zeit min.	Temp °C	Druck mm Hg		
22	0,035	Graphit	28	$7 \cdot 10^{-1}$	20	1	12	1200	1	sauerstofffrei	
23	0,75	Graphit	35	$4 - 10 \cdot 10^{-1}$	5	Pumpe ausgesch.	10	–	110 stieg	0,009	Sehr stürmische Reaktion
24	0,75	Graphit-Schamotte	35	$2 - 9 \cdot 10^{-1}$	15	Pumpe ausgesch.	12	–	$5 \cdot 10^{-1}$	0,40	Stürmische Reaktion. Nach dem Verschmelzen wurde die Pumpe ausgeschaltet
25	oxidierte Kathoden	Graphit-Schamotte	48	$5 - 8 \cdot 10^{-1}$	20	1	10	–	160	0,09	Der Druck wurde erhöht zur Beruhigung des kochenden Metallbades

Bei der dritten Methode wird das Halbstranggießen von Kupfer in einem Ruß-Induktionsofen beschrieben. Im Gießkasten des Ofens befindet sich ein Trichter und Stöpsel aus Graphit (Abbildung 4-39). Die Abdichtung der Ofenklappe besteht ebenfalls aus Graphit. Ofen und Gießkasten sind mit einer Quarzmasse ausgemauert. Der Kristallisator besteht aus Kupfer und im Inneren aus einer Chromschicht von 0,10 - 0,12 mm Stärke. In diesen Versuchen wurden auch Kristallisatoren mit einer Doppelschicht aus Kupfer (7 - 8 mm Stärke) und Graphit (4 mm Stärke) und unterschiedlichen Längen (160 mm und 250 mm) eingesetzt. Der Kristallisator kühlt den erstarrten Strang und bei Verlassen des Kristallisators taucht der Strang ins Wasser. Die Gießgeschwindigkeit kann durch die hydraulische Vorrichtung leicht reguliert werden [48].

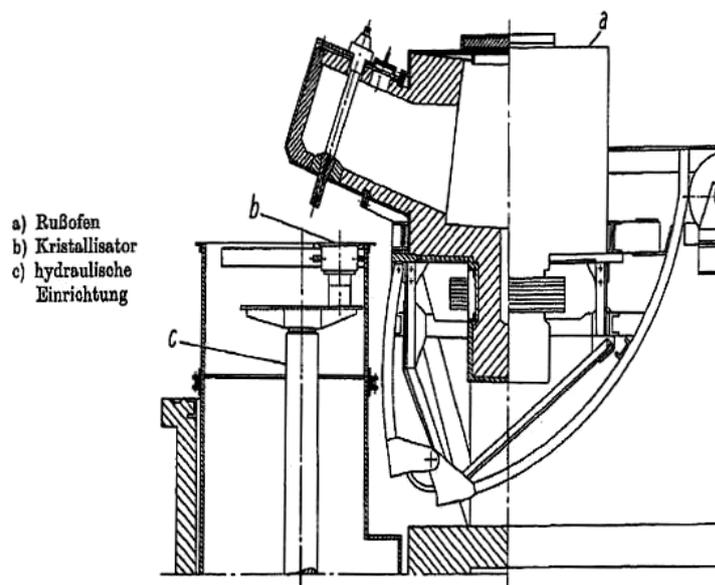


Abbildung 4-39: Schematische Darstellung der Einrichtung für halbkontinuierliches Gießen von sauerstofffreiem Kupfer [48]

Eine Holzkohlenschicht gewährt Schutz vor einer Oxidation des Kupfers. Frühere Versuche mit einer Schutzgasatmosphäre mittels Stickstoff ergaben schlechtere Ergebnisse bezüglich des Sauerstoffgehalts. Ein Graphitrohr leitet das Metall aus dem Ofen in den Kristallisator. Dort wird das Metall mit einer dünnen Rußschicht bedeckt und als weiterer Schutz mit einer reduzierenden Ergasflamme beaufschlagt. Das Gas wurde durch ein thoroidales Gasrohr über dem Kristallisator eingeleitet, siehe dazu Abbildung 4-40 [48].

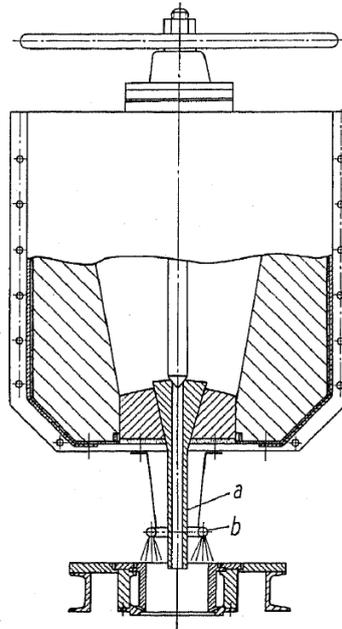


Abbildung 4-40: Schematische Darstellung des Rußofens und des Kristallisators mit dem Graphitrohr (a) und dem thoroidalen Gasrohr (b) [48]

Die Temperatur des Bades im Ofen betrug 1210 - 1225 °C, im Kristallisator 1100 - 1120 °C. Die unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten sind in Tabelle 4-6 angegeben. Der Kühlwasserverbrauch wird mit 145 - 190 l/min bei einer Austrittstemperatur von 44 - 45 °C und der Rußverbrauch zur Abdeckung im Kristallisator mit 0,25 kg/t bei runden (130 mm Ø) und 0,67 kg/t bei flachen Querschnitten (130 · 300 mm) angegeben [48].

Tabelle 4-6: Die Gießgeschwindigkeit von Kupfersträngen in mm/min [48]

Querschnittformat des Stranges	Typ des Katalisators	
	aus Kupfer, h = 160	aus Kupfer, h = 250
rund ø 130 mm	150 - 180	200 - 250
rund ø 180 mm	110 - 130	140 - 175
rund ø 270 mm wire-bars	-	105 - 120
105 x 105 mm flach	180 - 220	250 - 300
130 x 300 mm flach	-	130 - 170
130 x 200 mm	-	140 - 170

Die Ergebnisse und Erfahrungen zeigen, dass die mit dieser Methode abgegossenen Blöcke hohe metallurgische Qualität und dabei eine hohe Dichte aufweisen und keine mechanische Oberflächenbearbeitung bei den Press- und Walzverfahren benötigen. Die mikroskopischen Untersuchungen belegen, dass durch den Kohlenstoff kein Sauerstoff oberhalb seines Lösungsbereiches im festen Kupfer ist. Nachfolgende Abbildung 4-41 stellt die Makrostruktur eines Stranges von 180 mm Durchmesser dar [48].



Abbildung 4-41: Makrostruktur eines Kupferblockes mit einem Durchmesser von 180 mm [48]

Zusammenfassend kann gesagt werden [48]:

- Die Desoxidation mit Lithium ergibt gute Erfolge. Es weist eine starke Affinität zum Sauerstoff auf und durch die Verbindung mit Wasserstoff kann ein porenfreier Guss erzielt werden. Die Zugabe des Lithiums ist aber sorgfältig zu kontrollieren.
- Mit Vakuumschmelzen ist eine vollkommene Entfernung der nicht gebundenen Gase möglich und das Kupfer wird vor Oxidation geschützt. Die Erzeugung von sauerstofffreiem Kupfer kann bei einem Vakuum von $133,32 \cdot 10^{-2}$ Pa erfolgen. Mit dieser Behandlung sind auch hohe Dichtewerte erzielbar.
- Verbesserungen der Vakuumbehandlung können durch den Einsatz von Kohlenstoff erfolgen. In kurzer Zeit kann bereits bei einem Vakuum von 133,32 Pa sauerstofffreies Kupfer produziert werden.
- Eine einfache Herstellung des sauerstofffreien Kupfers ermöglicht das Halbstranggießen mit Einsatz von Kohle. Die Kosten sind dabei gering und es lassen sich hohe Dichtewerte erreichen. Ebenso zeichnet sich das damit gegossene Kupfer durch eine glatte und saubere Oberfläche aus. Mit diesem Verfahren kann sowohl sauerstofffreies Kupfer als auch Kupferlegierungen gegossen werden.

4.3 Verwendete Spülbehandlungen

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden der eingesetzte Impeller und Bodenspüler näher beschrieben.

4.3.1 Impeller

Der eingesetzte Impeller wurde von der Firma Foseco GmbH entwickelt. Die FDU-XSR-Rotoren aus Grafit werden mit den jeweiligen Grafitschäften an FDU-Entgasungsgeräten eingesetzt. FDU-Anlagen können zur Behandlung von Aluminium-, Magnesium- und Kupferschmelzen verwendet werden. In der folgenden Abbildung 4-42 ist ein Rotor dargestellt [50].

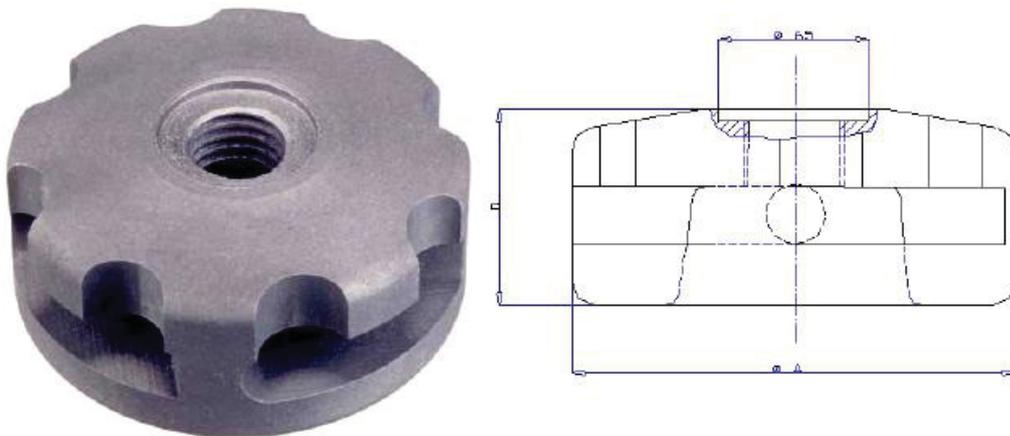


Abbildung 4-42: Darstellung eines FDU-XSR-Rotor [50]

Die patentierten Grafitrotoren der Foseco GmbH erzeugen durch Rotation sehr feine Spülgasblasen bei gleichmäßiger Verteilung über den Querschnitt des Ofens. Durch die Pumpwirkung der Rotoren wird die Schmelze auch unterhalb des Rotors angesaugt und gereinigt. Im oberen Teil des Rotors sind Turbo-Cuts eingearbeitet. Diese verkleinern oder zerschlagen die Gasblasen weiter, und die Blasenoberfläche erhöht sich bei gleichbleibendem Volumen. Abbildung 4-43 stellt einen Vergleich bei unterschiedlicher Drehzahl im Wassermodellversuch dar. Dabei ist ersichtlich, dass bei höherer Drehzahl eine noch größere Baddurchmischung und Sogwirkung entsteht. Beschreibungen der Firma Foseco GmbH sind zu entnehmen, dass bei verminderter Drehzahl der Verschleiß der Grafitteile geringer ist. Andererseits verringern sich bei erhöhter Drehzahl die Behandlungszeit und der Temperaturverlust der Schmelze [50], [51].



Abbildung 4-43: Vergleich von 350 U/min (linkes Bild) und 500 U/min (rechtes Bild) [52]

Diagramm 4.1 stellt einen aufgezeichneten Versuch der Foseco GmbH dar. Es zeigt einen Verlauf der Wasserstoffkonzentration bei Aluminium und gilt daher nur zur Veranschaulichung. Der Verlauf der orangen Linie wird mit dem Vorläufermodell SPR erzielt, der violette mit dem verwendeten Modell XSR. Bei beiden Rotoren steigt anfangs der Wasserstoffgehalt mit anschließender Entgasung. Weiters ist ein konstanter Temperaturverlauf festzuhalten.

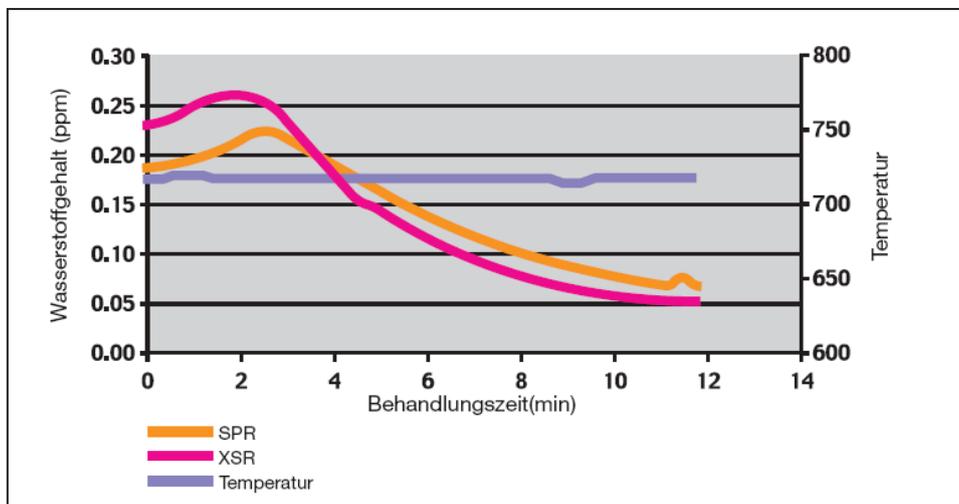


Diagramm 4.1: Entgasung, gemessen mit ALSPEK-H-Wasserstoffsensoren [51]

4.3.2 Bodenspüler

Für die Versuche fanden zwei Spülkegel von der Firma Zakłady Magnezytowe „ROPCZYCE“ S.A. mit der Bezeichnung HM3/500 ihren Einsatz. Der poröse Stein ist von einem Stahlmantel mit der Stahlsorte OH18N9 umgeben. Der Mantel verhindert eine vorzeitige Gasdiffusion in das umgebende Feuerfestmaterial. Durch den porösen Stein wurde Stickstoff zur Minimierung des Sauerstoffs- und Wasserstoffsgehalts eingeleitet. Abbildung 4-44 zeigt die Maße des verwendeten Spülelementes [53].

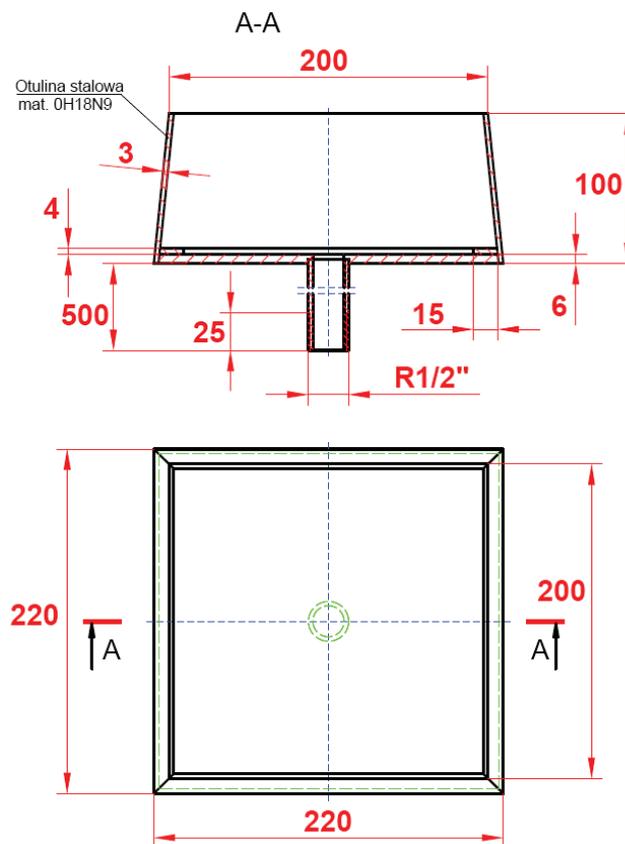


Abbildung 4-44: Maße eines Spülkegels in mm [53]

5. Experimentelle Untersuchungen

Es wurden sowohl Versuchsreihen als auch Einzelversuche mit und ohne Spülbehandlung durchgeführt. Das Einleiten des Inertgases Stickstoff in das Kupferbad erfolgte mit einem Bodenspüler oder einem Impeller. Abbildung 5-1 stellt eine vereinfachte Darstellung eines Gießofens im Montanwerk Brixlegg AG dar.

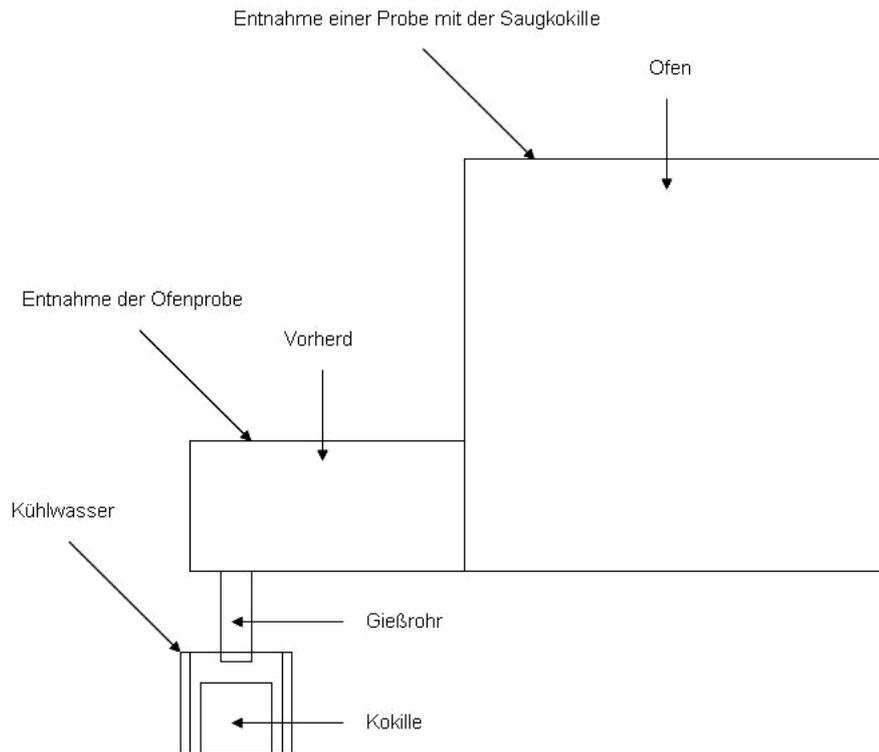


Abbildung 5-1: Vereinfachte Vorderansicht eines Gießofens

Folgende Proben wurden für die Auswertung herangezogen:

- Ofenprobe: Die Entnahme aus dem flüssigen Kupfer erfolgte am Vorherd. Die abgekühlte Probe zeigt den Gehalt der unterschiedlichen Elemente im festen Kupfer.
- Saugkokille: Die Probe wurde mit Hilfe einer Saugkokille für den Wasserstoffgehalt im flüssigen Kupfer aus dem Ofen entnommen.
- Bolzenprobe: Diese lieferte die Analyse der Zusammensetzung, ebenso die des Sauer- und Wasserstoffgehalts, aus einem bereits abgekühlten und abgegossenen Bolzen. Es erfolgte damit auch eine Dichtemessung.

Die in der Tabelle 5-1 angegebenen Kupferqualitäten dienen für die Durchführung der Versuche. Die Qualitäten OFN und P 40 können in Bezug auf den Sauerstoffgehalt miteinander verglichen werden (alle weiteren angegebenen Qualitäten für Einzelversuche). Für jeden Versuch gilt, dass die Abweichungen der Gasgehalte, aufgrund der Messtoleranzen der Analysegeräte, bei den Sauerstoffproben $\pm 1,5$ ppm und bei den Wasserstoffproben $\pm 0,4$ ppm betragen. Alle Versuche wurden während des Gießbetriebs in der Gießerei durchgeführt, in der die nachfolgend beschriebenen Qualitäten zu 7 Meter langen Bolzen vergossen wurden.

Tabelle 5-1: Kupferqualitäten [49]

Bezeichnung	Gehalte	Leitfähigkeit [Sm/mm ²]	Merkmale	Anwendungen
OF 101 certified	Cu $\geq 99,99$ %; P ≤ 3 ppm; O < 8 ppm	$\geq 58,6$	beständig gegen Wasserstoff- versprödung; für spezielle Anwendungen;	Supraleitern, Hochleistungs- übertragungs- kabel, Mikro- elektronik, Spez. Anoden, Magnet- feld- und elektr. Röhren
OF 100	Cu $\geq 99,98$ %; P < 10 ppm; O < 10 ppm	58,29	-	Elektronik, Schaltanlagen, Anoden
OFN	Cu $\geq 99,96$ %; P 10 - 20 ppm	≥ 58	beständig gegen Wasserstoff- versprödung;	Elektronik, Schaltanlagen
P 40	Cu $\geq 99,98$ %; P < 40 ppm	≥ 57	gute Umformbar- keit, Schweiß- und Lötbarkeit;	Elektrotechnik
Ag 0,04	Cu $\geq 99,93$ %; Ag ca. 0,04 %; O 50 - 400 ppm	58	in der Regel ca. 200 ppm O; sauerstoffhaltige, silberhaltige Qualität;	Schweißkontakte und -elektroden, Stromschienen und -verteiler, Kühlrippen, Fahrdraht- leitungen

5.1 Vorgänge während des Chargierens und des Abgusses

Sobald der Abguss des zuletzt gegossenen Bolzens erfolgt ist, beginnt das Auffüllen des Ofens mit Kupferkathoden. Währenddessen wird durch Zulegieren von Phosphor die Qualität für den nächsten Abguss eingestellt. Die Kathoden werden mit Hilfe eines Kranes in die Öffnung am Ofendeckel nachchargiert, siehe Abbildung 5-2.

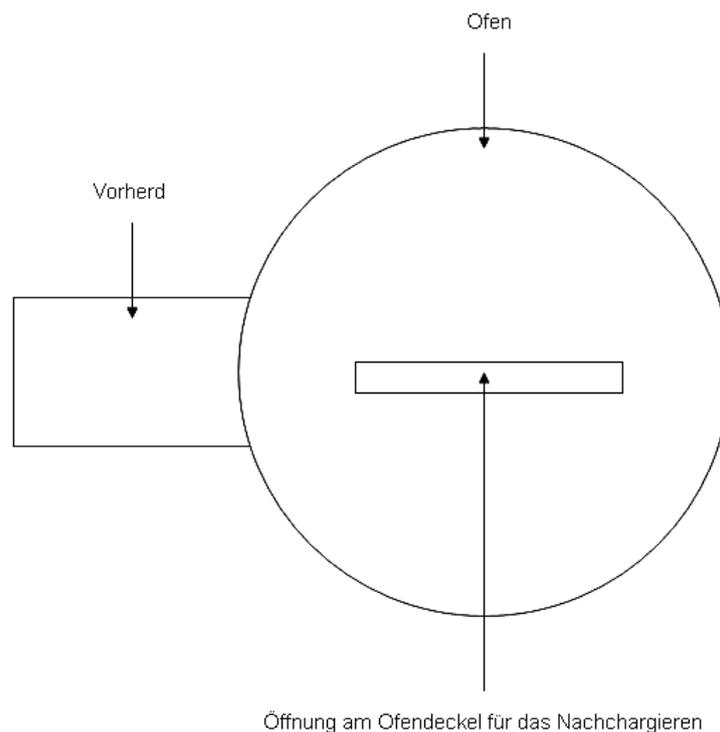


Abbildung 5-2: Grundriss eines Gießofens

Die folgende Aufzählung beschreibt den Gießbetrieb in Reihenfolge der wichtigsten Arbeitsschritte:

- Auffüllen des Ofens und Schmelzen des Einsatzes
- Legierungs- und Temperatureinstellung der Schmelze
- Vorbereiten des Gießstandes bzw. der Kokille (eventuell Umrüsten)
- Anfahren des Stranges
- Kontinuierlicher Abguss
- Gießende und Ausfahren des Stranges bei einer Länge von ca. 7 m

Versuchsreihe für das Abgießen ohne Spülbehandlung:

Diese Versuchsreihe dient dazu, Vergleichswerte mit den bereits erwähnten Spülgasbehandlungen zu erhalten. Dabei wurde der Verlauf des Wasserstoffs und Sauerstoffs bei normalem Gießbetrieb aufgezeichnet. Die Durchführung erfolgte stets bei OFN-Qualitäten und verschiedenen Temperaturen. Dabei gilt es, die vorgegebene Temperatur während des gesamten Abgusses einzuhalten, siehe Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Darstellung der Versuchsreihe ohne Spülbehandlung

Versuch	T ± 10 [°C]
3303/10	1120
3303/11	1120
3303/12	1120
3303/13	1150
1629/4	1150
3303/14	1150
3303/15	1150
3306/5	1200
3306/6	1200

Die nicht in diesem Kapitel dargestellten Versuche sind im Anhang in Abschnitt 12.1 zu finden. Als Befüllungs- und Nachsetzmaterial kamen Kathoden zweiter Klasse zum Einsatz (siehe Kapitel 5.2).

Diagramm 5.1 bis Diagramm 5.3 zeigen die möglichen Verläufe der gemessenen Gasgehalte während eines Abgusses. Aus Diagramm 5.3 sind zusätzlich die Dichte- und Gasgehalte in den Bolzenproben ersichtlich.

Am Beginn des Versuches 3306/6, siehe Diagramm 12.6, zeigt sich ein außerordentlich hoher Sauerstoffgehalt, da kurz vor dem Abguss das Gießrohr „einfro“. Um das Rohr und den Stutzen wechseln zu können, musste das Bad im Bereich des Rohres von der abdeckenden Kohle freigemacht werden, womit das flüssige Kupfer nicht mehr vor der Umgebungsluft geschützt war.

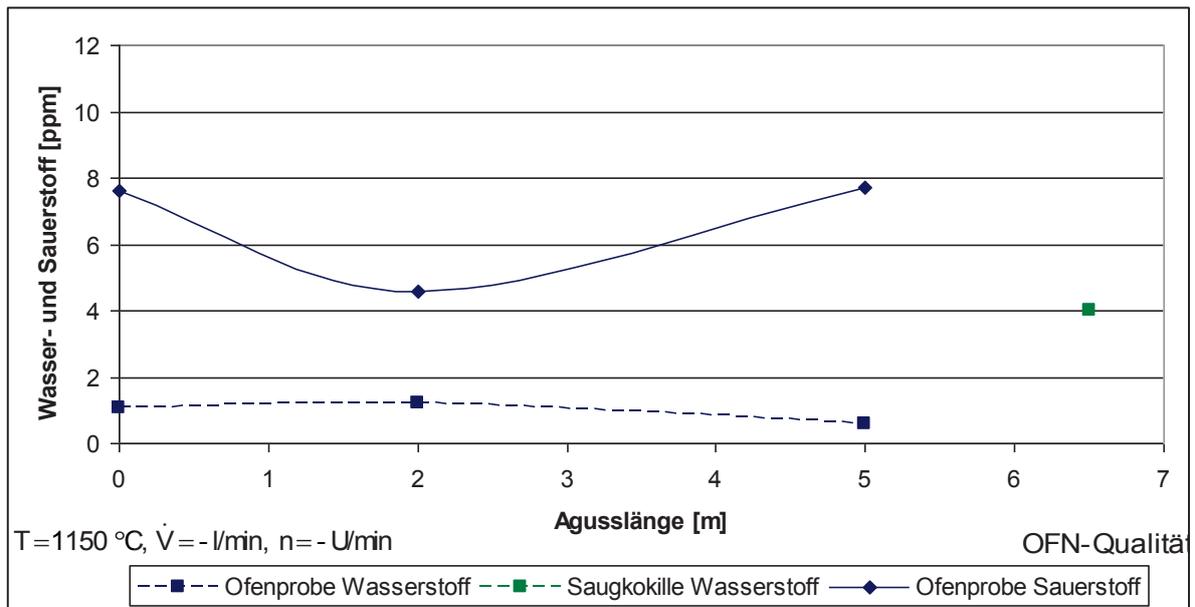


Diagramm 5.1: Versuch 3303/13; Abguss

In Diagramm 5.2, sowie Diagramm 5.1 sind gegenläufige Sauerstoff- und Wasserstoffverläufe erkennbar. Dies entspricht den Angaben aus der Literatur. Genauso ist der Wasserstoffgehalt im flüssigen Kupfer höher als im bereits abgekühlten und damit festen Kupfer (siehe dazu Saugkokille und Ofenprobe).

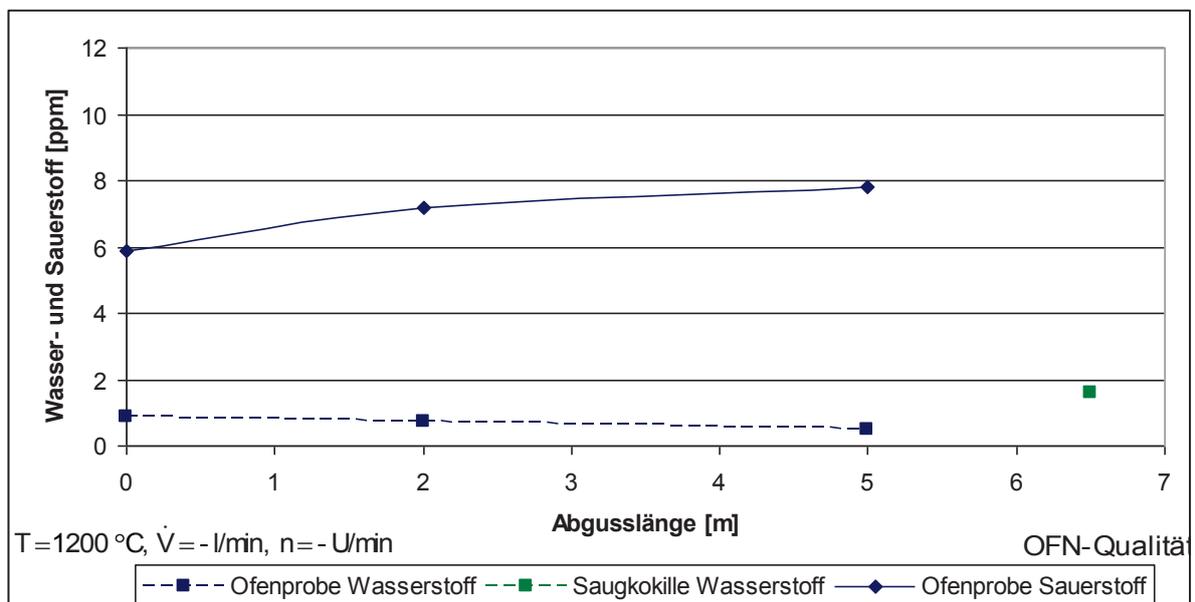


Diagramm 5.2: Versuch 3306/5; Abguss

Für Diagramm 5.3 gilt ähnliches bezüglich des Sauerstoff- und Wasserstoffverlaufs wie in Diagramm 5.2. Sauerstoff und Wasserstoff verlaufen indirekt proportional über die Abgusslänge und die Bolzenproben weisen niedrigere Gehalte als die Ofenproben und letztere wiederum geringere Gehalte als die Proben der Saugkokille auf. Es werden Dichtegehalte von mindestens $8,92 \text{ g/cm}^3$ erzielt.

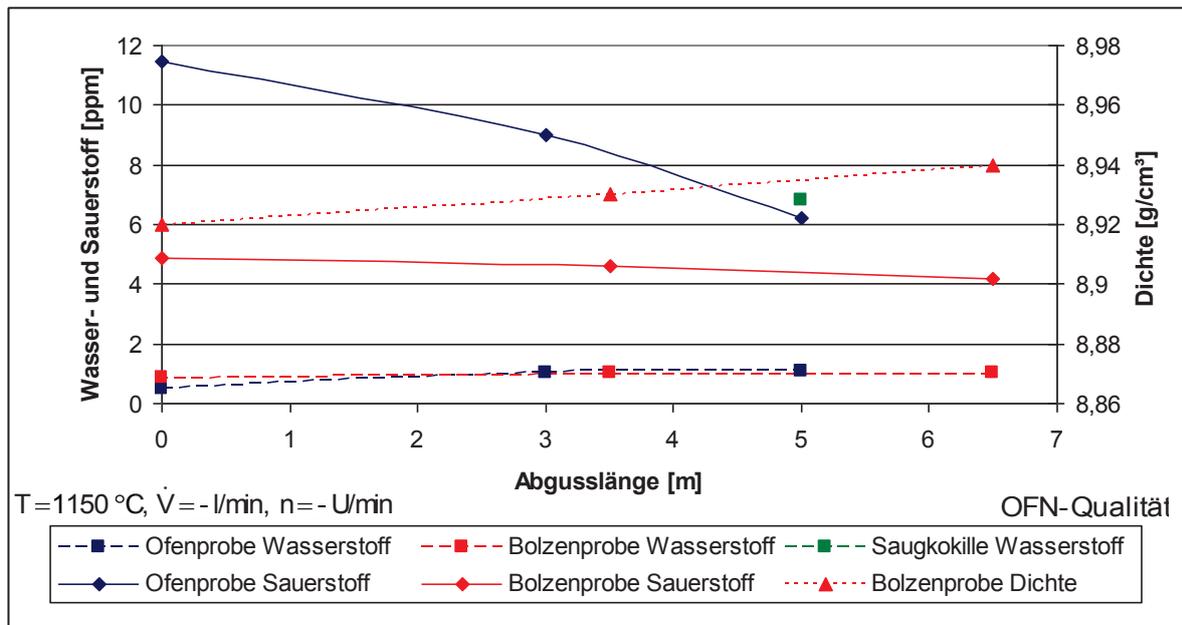


Diagramm 5.3: Versuch 1629/4; Abguss

5.2 Vergleich der Kathodenoberflächenqualität

Wie bereits erwähnt, werden die Kupferkathoden zum Befüllen der Öfen chargiert und zur Regelung der Temperatur nachgesetzt. Dabei spielt die Kathodenoberfläche eine wichtige Rolle, die von der gewünschten Kupferqualität abhängig ist. Sind Sorten mit niedrigem Sauerstoffgehalt erwünscht, müssen „gute Kathoden“ eingesetzt werden, siehe Abbildung 5-3.



Abbildung 5-3: Darstellung einer „guten Kathode“

Der Einsatz von „schlechten Kathoden“ ist bei hohen Sauerstoffgehalten erlaubt, dargestellt in Abbildung 5-4.



Abbildung 5-4: Darstellung einer „schlechten Kathode“

Der Unterschied der beiden Kathodenqualitäten zeigt sich an deren Oberfläche. Gute Kathodenqualität bedeutet eine glatte Oberfläche, während eine raue und mit „Knospen“ versehene für schlecht deklariert wird. Es besteht die Gefahr, dass durch die Knospen bzw. Riefen Sauerstoff in das Bad nachgeliefert wird.

Verlauf des Wasserstoffgehalts vor und nach dem Einchargieren:

Dieser Versuch zeigt den Verlauf des Wasserstoffgehalts beim Nachsetzen während des Abgießens einer OF 101 Certified-Qualitäten. Die Temperatur des Kupferbades betrug 1160 °C. Die erste Probe wurde eine halbe Minute nach Chargieren der Kathode entnommen und die zweite zehn Minuten danach, siehe Diagramm 5.4. Es ist zu erkennen, dass ab dem Zeitpunkt des Nachsetzens der Wasserstoffgehalt im flüssigen Kupfer stetig sinkt.

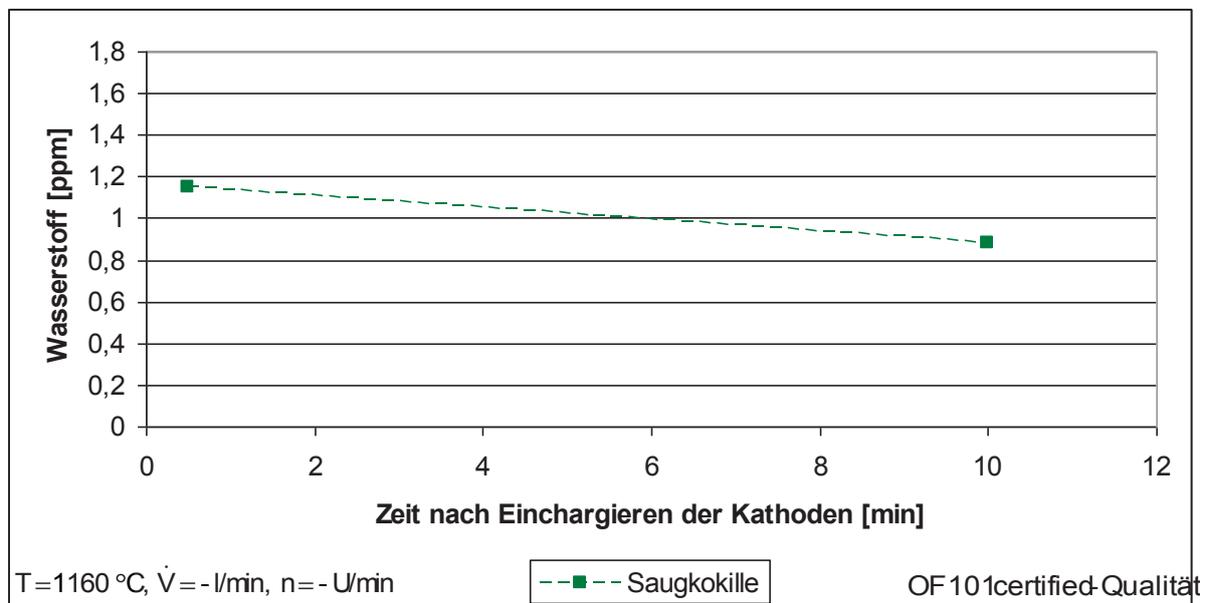


Diagramm 5.4: Verlauf des Wasserstoffes vor und nach dem Chargieren bei einer Temperatur von 1160 °C

5.3 Vorgänge während des Abgusses in der Kokille

In der Kokille und im Ofen herrscht dieselbe Metallzusammensetzung. Lediglich beim Anfahren bis zu circa einer Gießlänge von 1 Meter können sich Abweichungen ergeben. Gründe dafür sind die in Wasser eingelegte Papierschnur und das anfangs unbedeckte und damit ungeschützte Kupferbad in der Kokille, siehe Kapitel 5.1. Damit könnten in der Kokille höhere Wasser- und Sauerstoffgehalte als im Ofen vorliegen.

Einzelversuche zur Bestimmung des Gasgehalts in der Kokille:

Mit diesen beiden Einzelversuchen sollte der Zustand beim Angießen in der Kokille während des Abgusses einer OFN-Qualität bestimmt werden, wobei geringe Sauerstoffgehalte gefordert sind. Damit lässt sich wiederum gut ein unerwünschter erhöhter Gasgehalt am Beginn des Abgusses feststellen. Die Proben wurden direkt in der Kokille in der unten angeführten Reihenfolge entnommen, siehe Abbildung 5-5:

- Am Beginn des Abgusses und noch vor der Rußaufgabe
- Bei einer Stranglänge von 0,6 m
- Bei Gießende, somit einer Gießlänge von 7 m

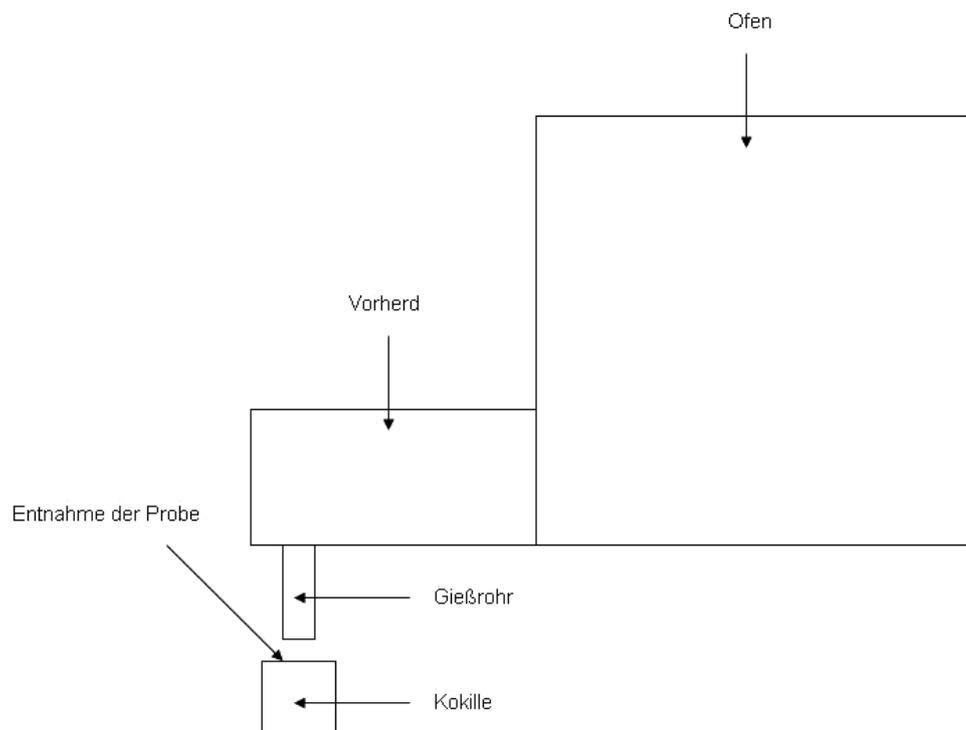


Abbildung 5-5: Seitenansicht der Probenentnahme aus der Kokille

Ebenso wurden Bolzenproben entnommen und analysiert, sowie Dichtemessungen durchgeführt. Um das Verhalten des Gases im normalen Gießablauf beobachten zu können, fand keine Vorgabe der Abgustemperatur statt. Der Gießvorgang beginnt meist bei einer höheren Temperatur (1170 °C) und ab dem ersten abgegossenen Meter pendelt sich die Temperatur bei 1150 °C ein. Die Tabelle 5-3 stellt den jeweiligen Dichteverlauf der beiden Versuche dar.

Tabelle 5-3: Dichtewerte der beiden Versuche 2626/24 und 2626/25

Abgusslänge	Versuch	
	2626/24	2626/25
0,5 m	8,93	8,72
3,5 m	8,93	8,93
6,5 m	8,94	8,94

Diagramm 5.5 und Diagramm 5.6 zeigen den Verlauf der Gasgehalte der beiden Einzelversuche.

Diagramm 5.5 weisen beim Anfahren des Abgusses einen sehr hohen Sauerstoffgehalt und einem dementsprechend niedrigen Wasserstoffgehalt auf. Der Sauerstoffgehalt sinkt aber kontinuierlich auf kleiner 20 ppm bis zum ersten Meter der Abgusslänge.

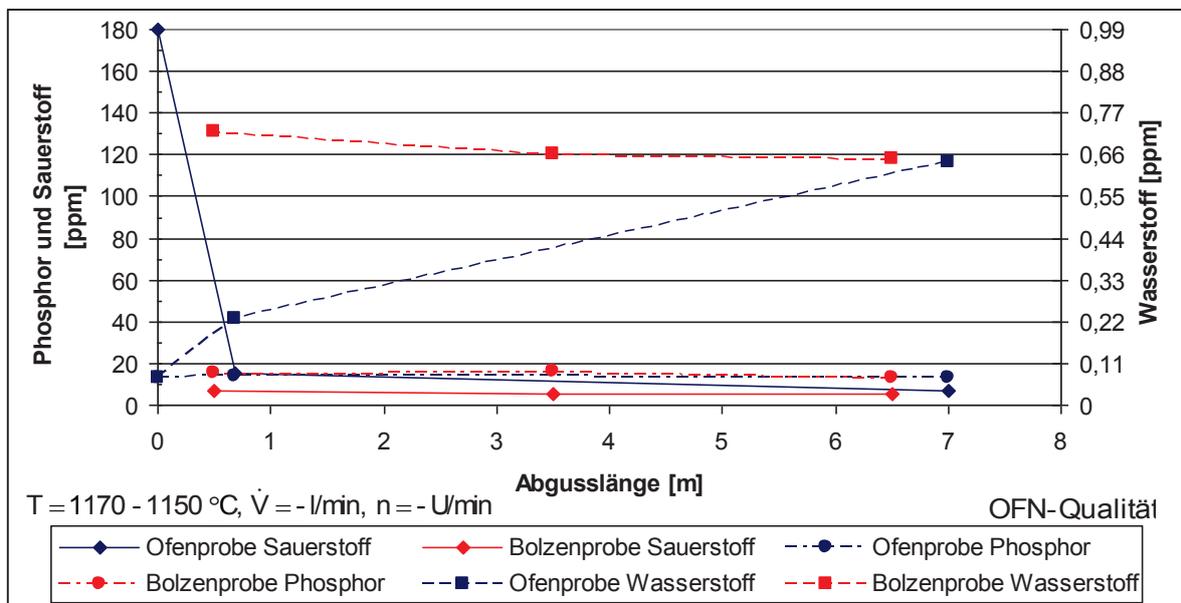


Diagramm 5.5: Versuch 2626/24; Abguss

Im Gegensatz zu Diagramm 5.5 ist in Diagramm 5.6 ein geringerer Sauerstoffanfangsgehalt ersichtlich. Die Verläufe sind aber in beiden Diagrammen ähnlich und der Phosphorgehalt verläuft annähernd konstant über die Abgusslänge.

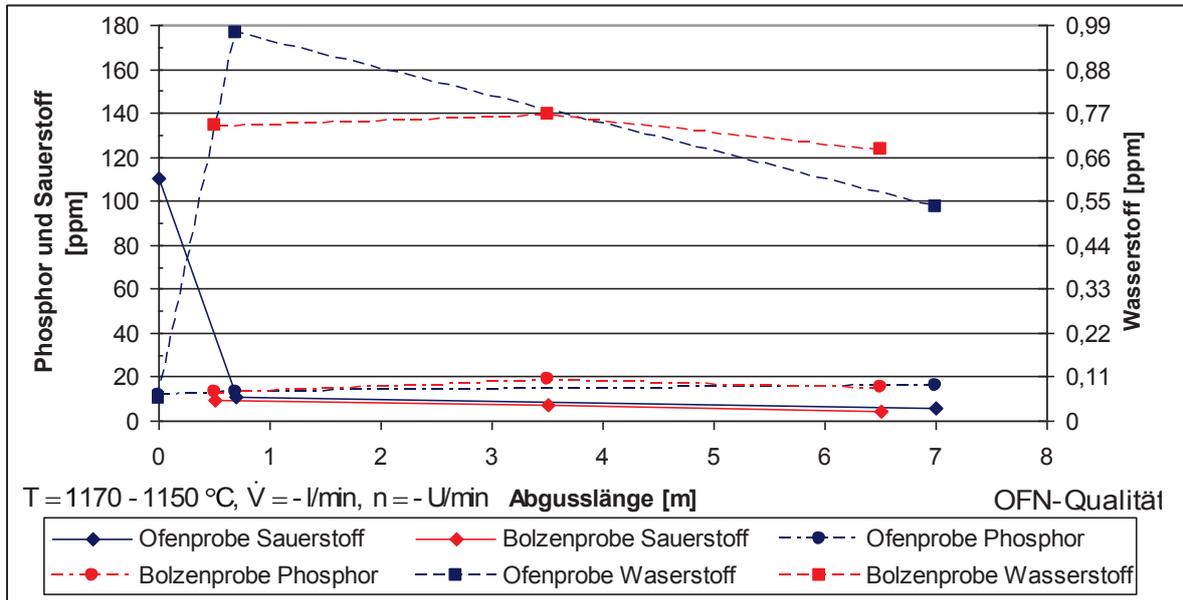


Diagramm 5.6: Versuch 2626/25; Abguss

5.4 Vorgänge während des Abgusses mit dem Impeller

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung der Handhabung des eingesetzten Impellers und anschließend eine Erklärung der damit durchgeführten Versuche.

5.4.1 FDU-XSR-Rotor

Die folgende Abbildung 5-6 zeigt im Allgemeinen die Montage und Handhabung des Impellers im Montanwerk Brixlegg AG (Grafitrotor nicht sichtbar). Vor der Behandlung mit dem Impeller wird der Ofen mit Kathoden befüllt. Beim ersten Einsatz und nach längeren Unterbrechungen wurde der Rotor stets vorgewärmt. Wie hier ersichtlich, befindet sich dafür der Rotor für circa eine Minute knapp oberhalb der Holzkohledecke und wird anschließend langsam in das Bad eingetaucht. Rotor und Schaft sind durch eine Führung mit einer Antriebswelle verbunden und diese gesamte Anlage ist mit dem Ofendeckel verschweißt, womit eine funktionstüchtige Anbringung gewährleistet ist. Die Führung ist mittels einer Abdeckung geschützt. Der blaue Schlauch dient zur Spülung des Ofendeckels, der silberfarbene gewährleistet hingegen die Stickstoffzufuhr für den Rotor.

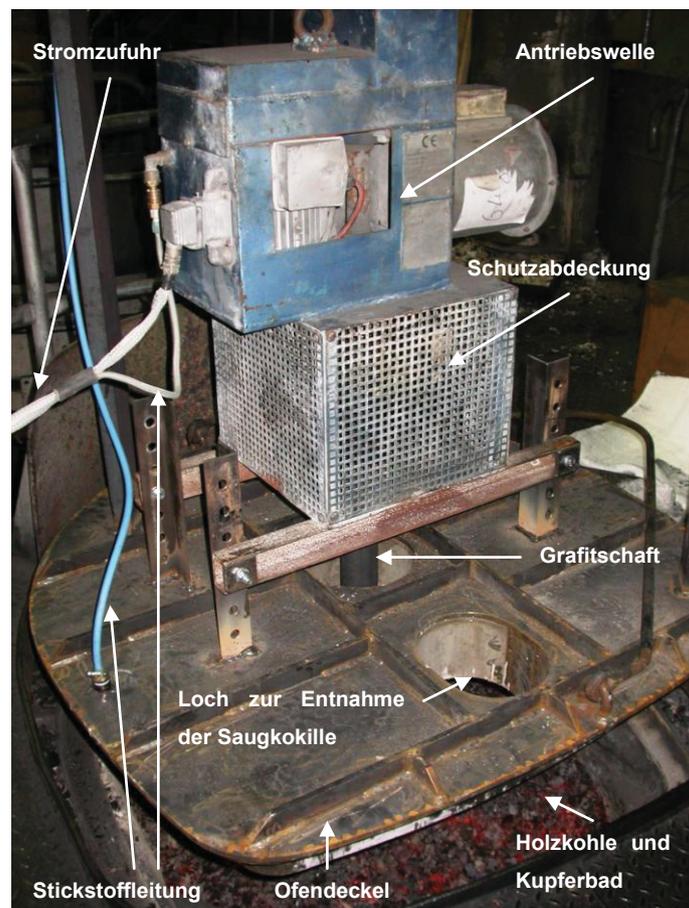


Abbildung 5-6: Montage und Anbringung des Impellers

Kurz nach dem Einsatz sind Rotor und Schaft in Abbildung 5-7 ersichtlich. Bemerkbar ist noch ein leichtes Glühen der beiden Grafitbauteile. Ebenfalls ist eine Veränderung des Querschnitts bereits nach dem ersten Abguss zu erkennen. Mit fortlaufendem Einsatz nahm die Verjüngung zu und führte schlussendlich im 27. Einsatz zu einem Bruch des Schaftes an besagter Stelle. Insgesamt wurden 34 Bolzen bei einem Impellereinsatz abgegossen. Dabei kamen ein Rotor und zwei Schäfte zur Verwendung.

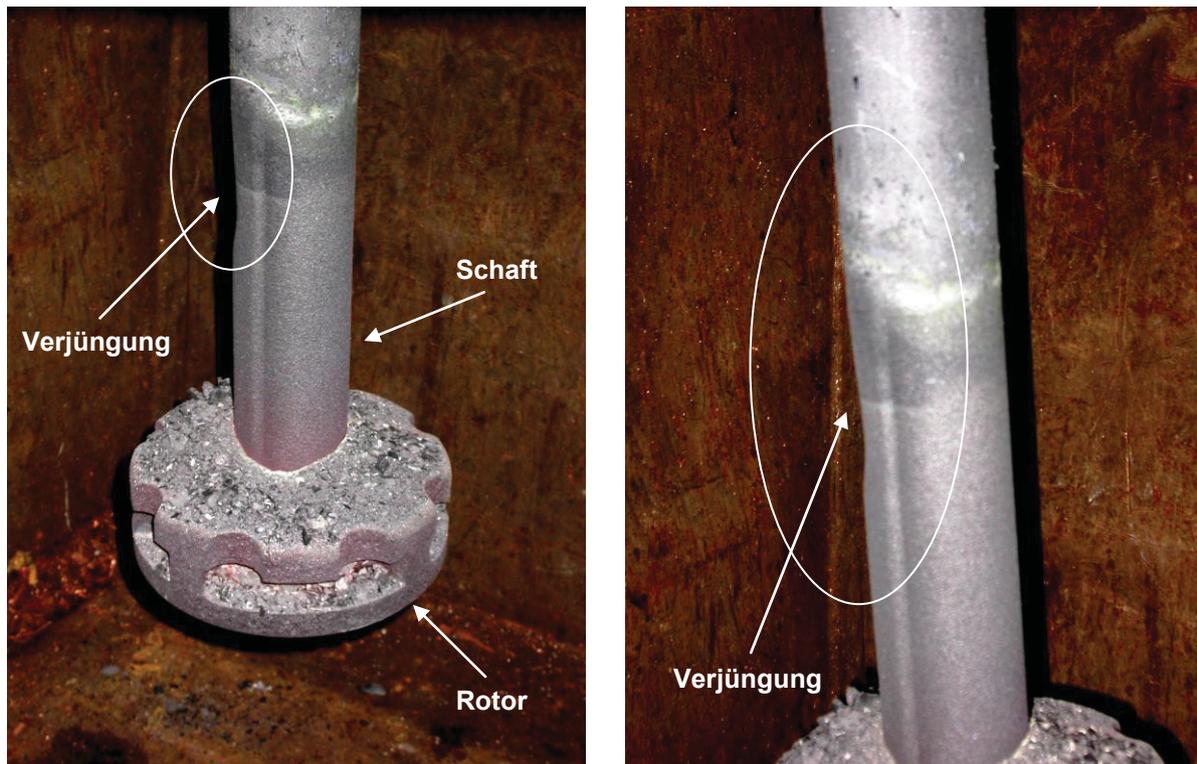


Abbildung 5-7: Rotor und Schaft kurz nach Einsatz und Veränderung des Querschnitts

Im Ruhezustand wird der Impeller ungefähr 20 m vom Ofen abgestellt. Das heißt, er muss jeweils vom bzw. zum Einsatzort zu- oder abgestellt werden. Dies erfolgt mit demselben Kran, welcher die abgegossenen Bolzen zur Säge transportiert. Am Impeller selbst können die Parameter Volumenstrom [l/min] und Drehzahl [U/min] verändert werden.

5.4.2 Vorversuche mit dem Impeller

Diese Vorversuche dienen dazu, die Eigenschaften und Handhabung des Impellers zu erlernen. In Tabelle 5-4 sind die unterschiedlichen Parameter dargestellt.

Tabelle 5-4: Darstellung der Vorversuche mit dem Impeller

Versuch	T ± 10 [°C]	\dot{V} [l/min]	n [U/min]	Qualität
2469/9	1150	40	450	Ag (0,04) (OF)
2469/13	1150	40	450	Ag (0,04) (OF)
3469/4	1150	40	450	P 40
3469/6	1150	40	450	P 40

Die nicht in diesem Kapitel angeführten Versuche sind im Anhang in Abschnitt 12.2.1 zu finden. Die Einsatzdauer des Impellers betrug stets 18 Minuten. Die Vorversuche zeigen, dass während der Spülzeit die Gasmenge im Bad sinkt. Die Ausnahme stellt Versuch 3469/4 dar, abgebildet in Diagramm 12.9. Während des Gießens kann jedoch der Sauerstoffgehalt über die Zeit abgebaut werden (Diagramm 12.10). Zu beachten ist in diesem Diagramm auch, dass der zweite Messwert der Saugkokille eine Fehlmessung sein könnte. Dafür spricht der hohe Wasserstoffgehalt. Bei einem hohen Sauerstoffgehalt müsste der Wasserstoffgehalt niedriger sein (siehe Kapitel 3.2.2).

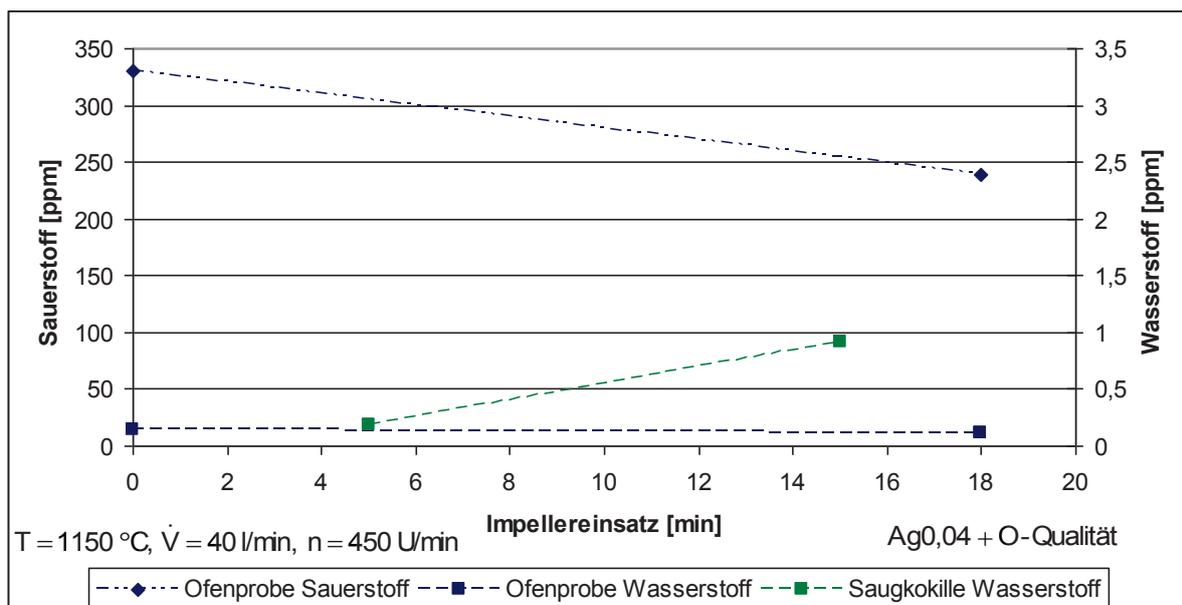


Diagramm 5.7: Versuch 2469/13; Impellereinsatz

Der Abguss des Versuches 2469/13 ist in Diagramm 5.8 dargestellt. Bei diesen hohen Sauerstoffwerten, die qualitätsbedingt sind, werden niedrige Wasserstoffwerte erreicht.

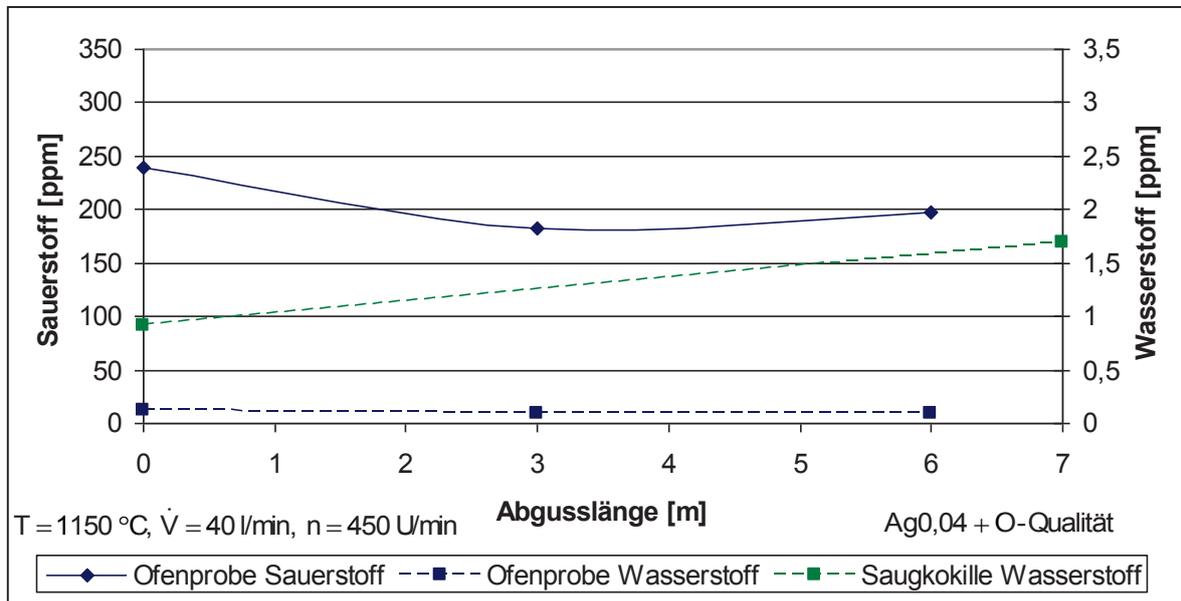


Diagramm 5.8: Versuch 2469/13; Abguss

Impellereinsatz und Abguss des Versuches 3469/6 sind in Diagramm 5.9 und Diagramm 5.10 abgebildet. Dieser Versuch fand beim Vergießen einer P 40-Qualität statt, welche geringe Sauerstoffgehalte fordert. Während des Impellereinsatzes kann der Sauerstoff nur in geringen Mengen abgebaut werden.

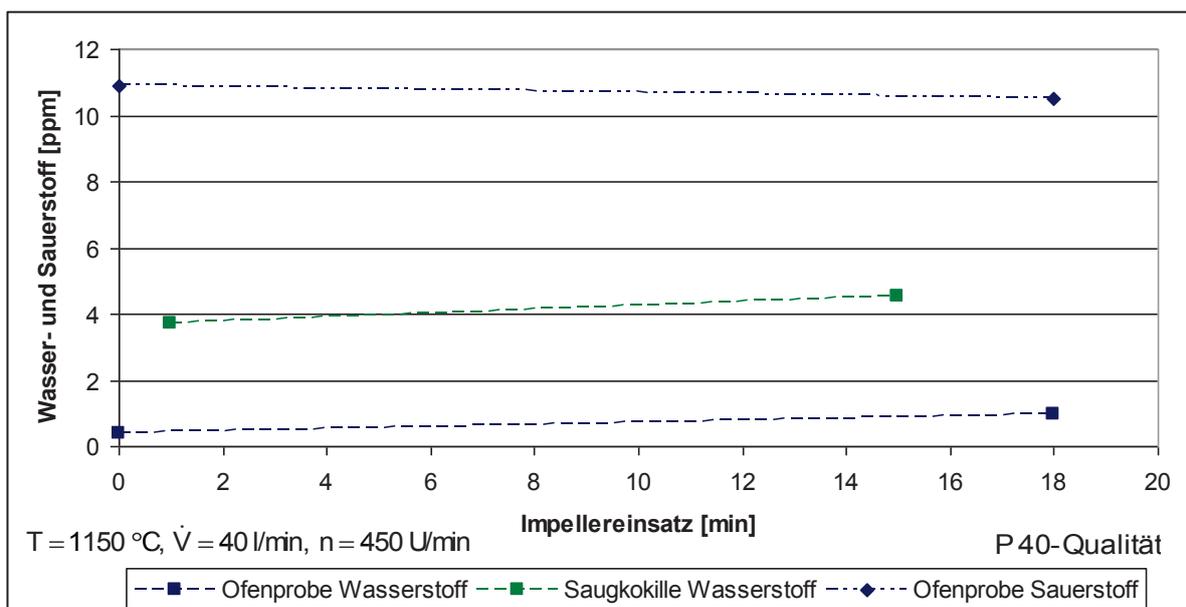


Diagramm 5.9: Versuch 3469/6; Impellereinsatz

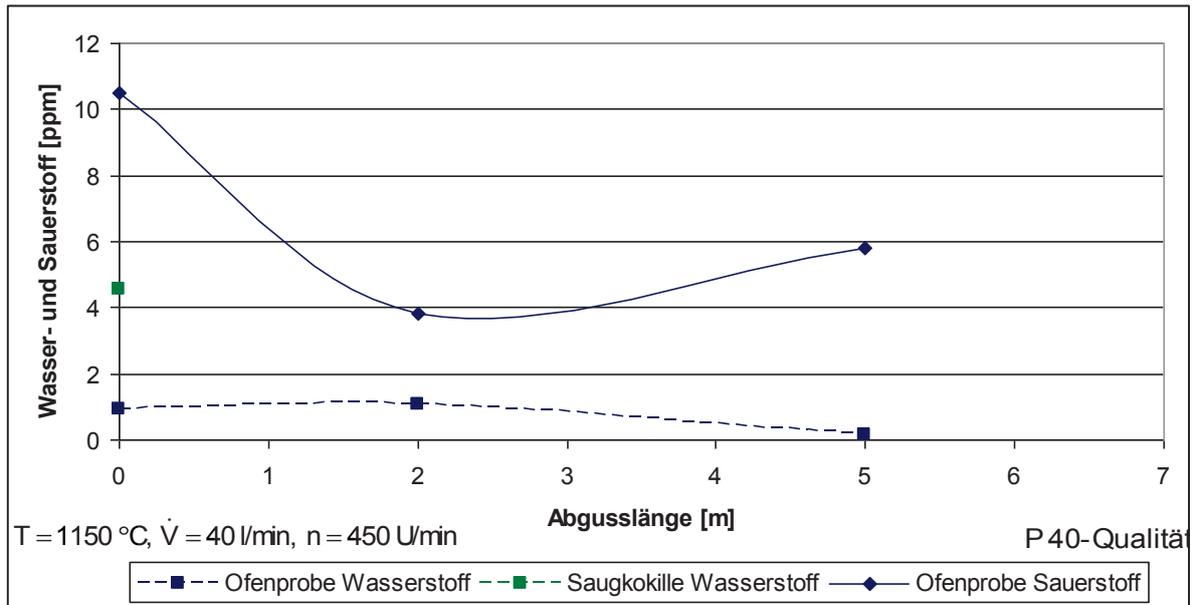


Diagramm 5.10: Versuch 3469/6; Abguss

5.4.3 Versuchsreihe mit dem Impeller

Im Rahmen einer Versuchsreihe erfolgte die Ermittlung der Betriebweise sowie die Wirkung des Impellers festzustellen. Dafür wurden drei Parameter festgelegt, deren Einstellungen für jeden Versuch verändert werden sollen und damit möglichst viele Extrema herbeigeführt werden können. Diese drei Einflussgrößen sind die Temperatur, der Volumenstrom und die Drehzahl. Die letzten beiden sind am Impeller einstellbar, die Temperaturregulierung erfolgt durch das Nachsetzen der Kathoden in den Ofen selbst. Der maximale Volumenstrom und die höchste Drehzahl dürfen nicht die Holzkohlendecke aufreißen, da sonst eine Sauerstoffzulieferung in das Bad nicht mehr verhindert werden kann. Die Versuchsreihe besteht aus dreizehn Einzelversuchen für die jeweilige Qualität OFN und P 40, dargestellt in Tabelle 5-5. Einsatzmaterial waren gute Kathoden und die Behandlungszeit des Impellers betrug stets 15 Minuten. Der Einsatz erfolgte unmittelbar vor dem Abguss.

Tabelle 5-5: Darstellung der Versuchsreihe mit dem Impeller

Versuch	T	\dot{V}	n	Qualität
N1/M1	niedrig	niedrig	niedrig	OFN/P 40
N2/M2	mittel	niedrig	mittel	OFN/P 40
M3/N3	hoch	niedrig	hoch	OFN/P 40
M4/N4	niedrig	mittel	mittel	OFN/P 40
N5/M5	mittel	mittel	hoch	OFN/P 40
M6/N6	hoch	mittel	niedrig	OFN/P 40
M7/N7	niedrig	hoch	hoch	OFN/P 40
N8/M8	mittel	hoch	niedrig	OFN/P 40
M9/N9	hoch	hoch	mittel	OFN/P 40
N10/M10	mittel	niedrig	niedrig	OFN/P 40
M11/N11	mittel	niedrig	niedrig	OFN/P 40
M12/N12	mittel	niedrig	niedrig	OFN/P 40
N13/M13	mittel	hoch	hoch	OFN/P 40

Die Versuche 10 - 12 wurden bei beiden Qualitäten mit den gleichen Einstellungen durchgeführt um Kontrollwerte zu erhalten. Nachstehende Tabelle 5-6 definiert die Bereiche niedrig, mittel und hoch für die drei Parameter Temperatur, Volumenstrom und Drehzahl.

Tabelle 5-6: Definition der Bereichsklassen für den Impeller

	T ± 10 [°C]	\dot{V} [l/min]	n [U/min]
niedrig	1130	30	350
mittel	1150	40	450
hoch	1190	50	500

Nachfolgend werden die Versuche N1 und M7 dargestellt. Alle weiteren befinden sich im Anhang in Kapitel 12.2.2. N1 und M7 wurden ausgewählt, da diese beiden bei gleicher Temperatur aber unterschiedlichem Volumenstrom und wechselnder Drehzahl die Eigenschaften des Impellers darstellen.

Der Gasverlauf während der Spülbehandlung kann stetig sinken (Diagramm 5.13) oder steigen (Diagramm 12.53). Weiters ist eine Veränderung des Wasserstoff- und Sauerstoffgehalts wie in Diagramm 12.39 oder Diagramm 12.11 zu bemerken.

Der Impellereinsatz während des Versuches N1 ist in Diagramm 5.11 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass der Sauerstoffgehalt gegen Ende zunimmt, der Wasserstoffgehalt bleibt annähernd konstant.

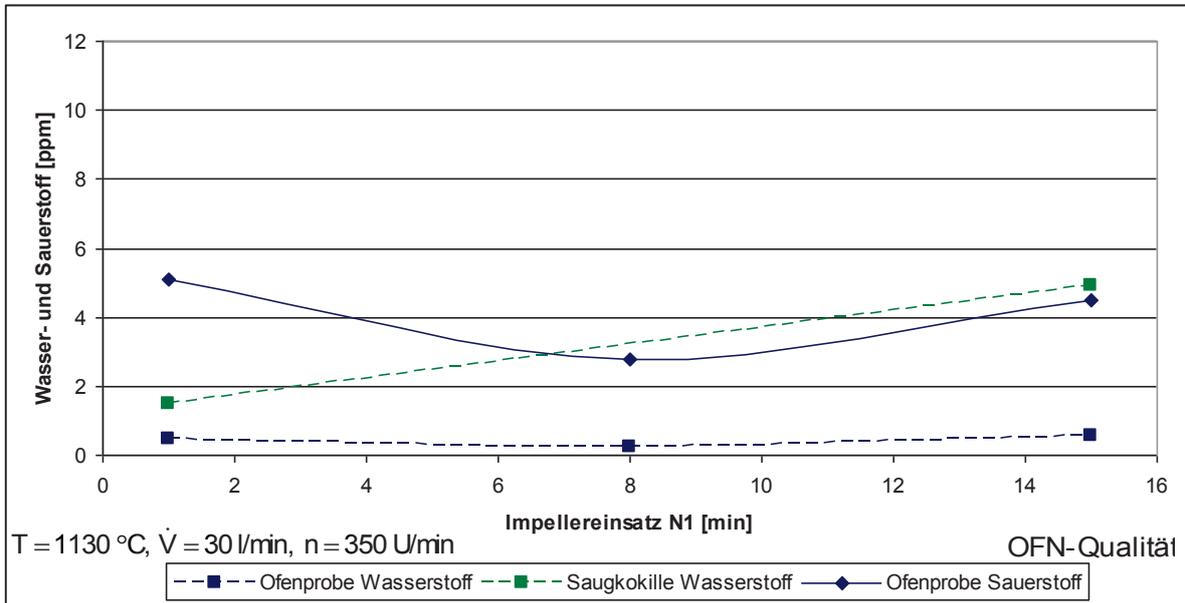


Diagramm 5.11: Versuch N1; Impellereinsatz

Während des Abgusses sinkt die Dichte auf $8,8\text{ g/cm}^3$ ab. Anfangs ist ein Anstieg des Sauerstoff- und Wasserstoffverlaufs zu vermerken (Diagramm 5.12).

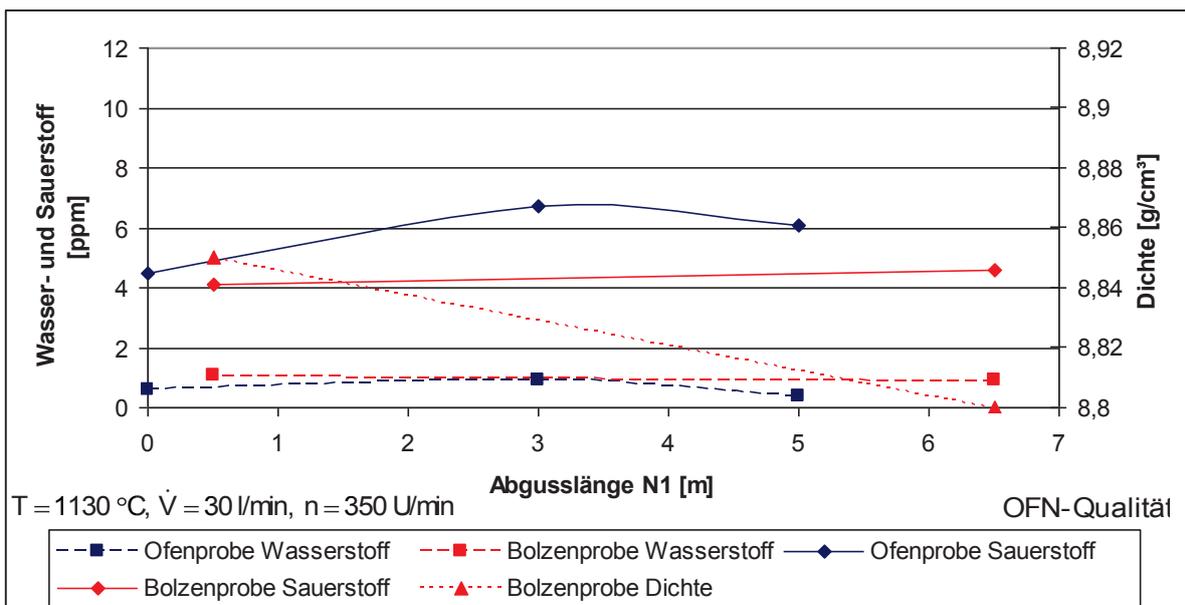


Diagramm 5.12: Versuch N1; Abguss

Im Gegensatz zu Versuch N1 sinkt in M7 der Sauerstoffgehalt stetig und auch der Wasserstoffgehalt sinkt ab der Hälfte der Impellereinsatzdauer (Diagramm 5.13).

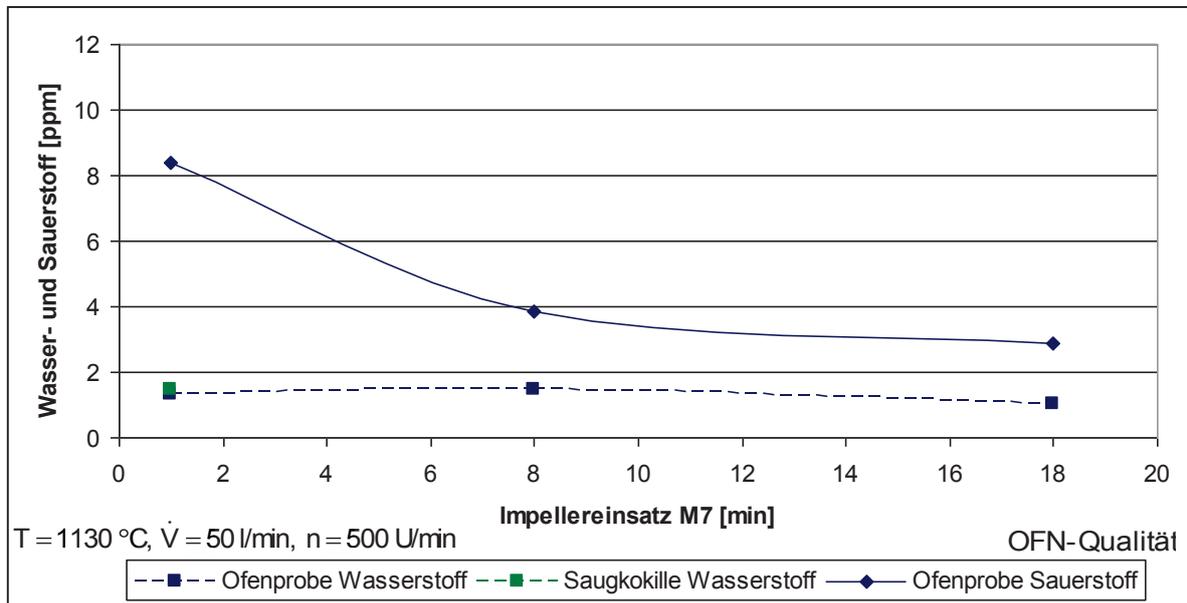


Diagramm 5.13: Versuch M7; Impellereinsatz

Diagramm 5.14 zeigt, dass der Sauerstoffgehalt bis zu einer Abgusslänge von ca. 3 m sehr stark steigt und der Wasserstoffgehalt sich nahezu konstant verhält.

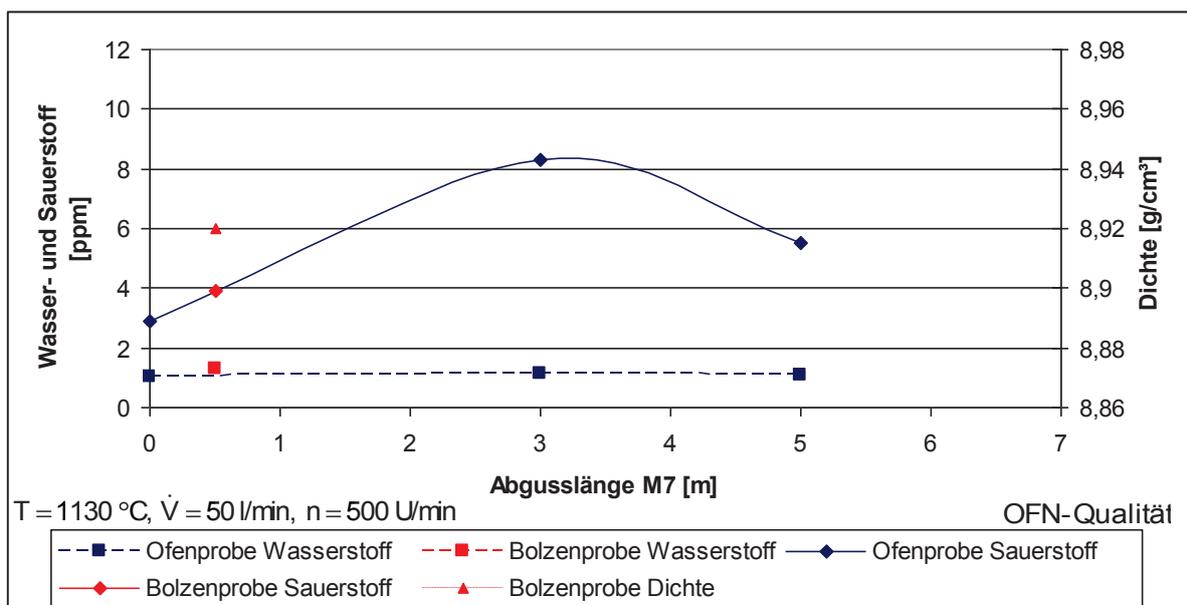


Diagramm 5.14: Versuch M7; Abguss

5.4.4 Einzelversuch mit dem Impeller und Calciumhexaborid

Dieser Einzelversuch wurde bei einer OF 100-Qualität und einer Einsatzdauer des Impellers von 15 Minuten durchgeführt. Die weiteren Parametereinstellungen sind entsprechend der Tabelle 5-7 definiert.

Tabelle 5-7: Darstellung der Parametereinstellungen

T ± 10 [°C]	\dot{V} [l/min]	n [U/min]
1150	40	450

Zur weiteren Senkung des Gasgehalts kam das Desoxidationsmittel Calciumhexaborid zum Einsatz. Dies erfolgte während der Behandlungszeit des Impellers in den nun angeführten Schritten (Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Darstellung der Zugabe des Calciumhexaborids

	Zugabemenge [g]	Einsatzdauer Impeller [min]
1. Zugabe	15	5
2. Zugabe	16	10

Um das vollständige Eintauchen des Desoxidationsmittels in das Kupferbad zu gewährleisten, wurde es in einem circa 20 cm langen Rohr ($d = 4$ cm, beidseitig verschlossen) über dem Ofendeckel eingeführt (siehe Abbildung 5-6). Aufgrund der vom Rotor erzeugten Badbewegung kommt es zur Durchmischung des Desoxidationsmittels im Bad. Die Versuchsergebnisse sind in Diagramm 5.15 und Diagramm 5.16 dargestellt.

Während des Impellereinsatzes sinkt der Sauerstoffgehalt mit linearem Verlauf auf ca. 5 ppm ab. Der Wasserstoff unterschreitet stets den Gehalt von 1 ppm (Diagramm 5.15).

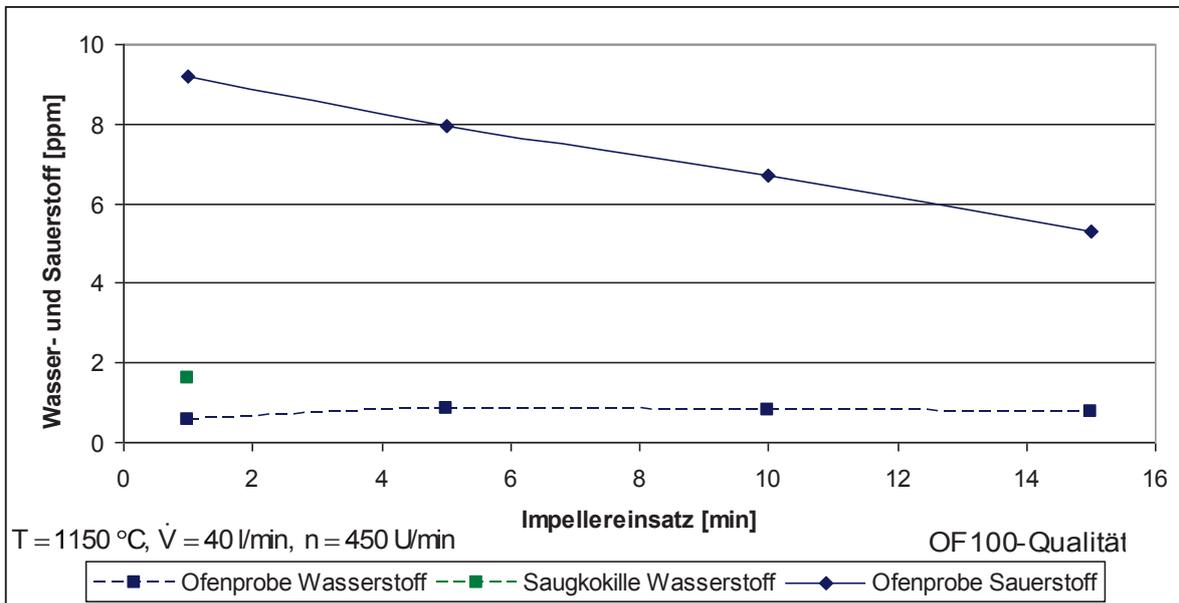


Diagramm 5.15: Versuch 1520/5; Impellereinsatz

In Diagramm 5.16 hingegen wird zum Teil ein Wasserstoffgehalt von 2 ppm erreicht. Der Sauerstoffgehalt steigt, bevor er ab einer Abgusslänge von 3 m auf niedrige Werte unter 4 ppm sinkt. Es werden gute Dichtewerte von mindestens 8,93 g/cm³ erreicht.

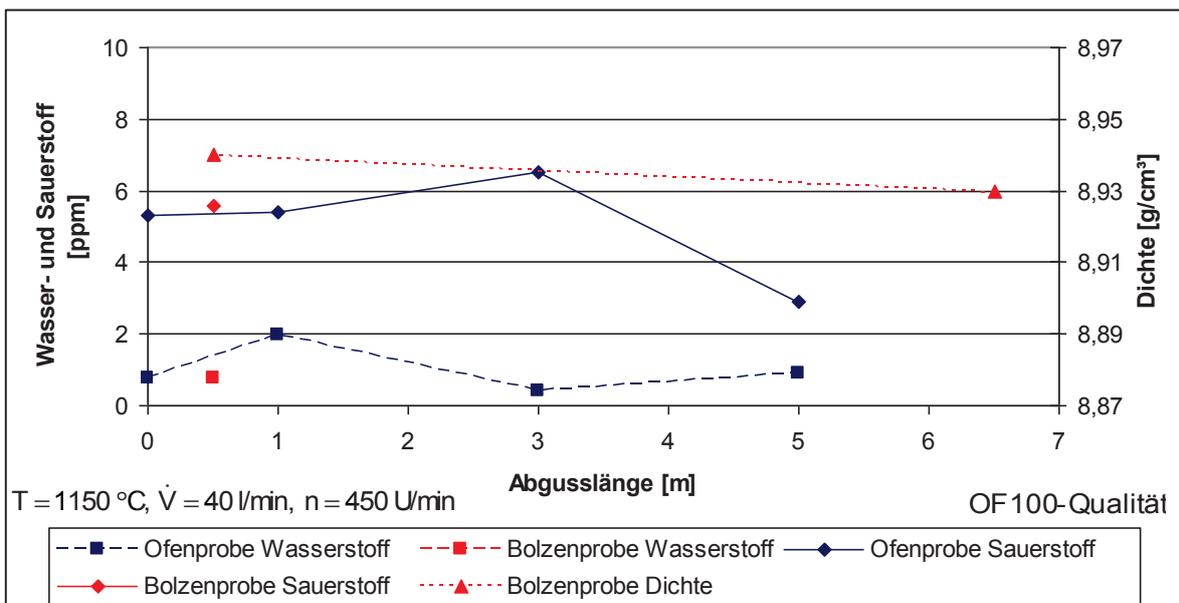


Diagramm 5.16: Versuch 1520/5; Abguss

5.4.5 Einzelversuch mit dem Impeller, Calciumhexaborid, schlechte Kathoden und Abdeckkohle

Bei diesen beiden Einzelversuchen wurde keine vorbehandelte Kohle, schlechte und nicht vorgewärmte Kathoden, der Impeller und Calciumhexaborid eingesetzt. Der Ablauf der beiden Versuche ist im Folgenden beschrieben:

- Die Befüllung des Ofens erfolgte mit schlechten, nicht vorgewärmten Kathoden und die Abdeckung des Bades mit vorgeglühten Kohlen.
- Danach wurde die bereits auf dem Bad befindliche Kohle beiseite geschoben und die nicht vorbehandelte Kohle aufgelegt. Circa 20 Minuten nach Aufgabe der nicht vorgebehandelten Kohle galt diese als abgebrannt.
- Anschließend beginnt der Einsatz des Impellers für eine Zeitspanne von 15 Minuten. Nach fünf und zehn Minuten Behandlungsdauer werden jeweils 200 g Calciumhexaborid in das Bad eingebracht. Die Drehzahl des Impellers ist mit 450 U/min und der Volumenstrom mit 40 l/min festgelegt.
- Nach der Spülgasbehandlung begann der Abguss. Die Probennahme erfolgte bei drei und fünf Meter Stranglänge. Zusätzlich wurden auch Proben kurz vor und nach dem Nachlegen der Kathoden entnommen.

Beide Versuche sind bei einem üblichen Gießablauf durchgeführt worden, womit keine Vorgabe einer Gießtemperatur stattfand. Damit ist eine abweichende Temperaturführung festzuhalten (siehe Tabelle 5-9). Ein weiterer Unterschied besteht in der verschiedenen Aufgabeweise der nicht vorbehandelten Kohle. In Versuch 2532/37 wurde das Kupferbad bis circa zur Hälfte freigelegt und sogleich die nicht vorbehandelte Kohle aufgebracht. In Versuch 2535/45 hingegen war das komplette Bad für kurze Zeit frei. Das heißt die gesamte vorbehandelte Kohle wurde entfernt und erst dann erfolgte die Abdeckung mit der nicht vorbehandelten Kohle. Auf diese Weise sollte das Desoxidationspotenzial der Kohle ersichtlich werden.

Tabelle 5-9: Darstellung des Temperaturverlaufs

	Versuch 2532/37		Versuch 2535/45	
	T [°C] Impellereinsatz	T [°C] Abguss	T [°C] Impellereinsatz	T [°C] Abguss
Ofenprobe 1	1130	1200	1108	1185
Ofenprobe 2	1150	1170	1119	1180
Ofenprobe 3	1169	1159	1101	1128
Ofenprobe 4	1187	1147	1102	1165
Ofenprobe 5	1197	1169	1113	1152
Ofenprobe 6	1193	1156	1122	1149
Ofenprobe 7	1196	-	1132	-
Ofenprobe 8	1200	-	1142	-
Ofenprobe 9	1200	-	1185	-
Saugkokille 1	-	-	1119	-
Saugkokille 2	-	-	1113	-
Saugkokille 3	-	-	1185	-

In Diagramm 5.17 und Diagramm 5.19 entsprechen die positiven Zeitwerte der Behandlungsdauer des Impellers und die negativen der Einsatzdauer der Kohle. Das nachfolgende Diagramm 5.17 zeigt, dass durch Einsatz der nicht vorbehandelten Kohle der Sauerstoff auf unter 10 ppm und der Wasserstoff kleiner 1 ppm reduziert werden kann. Letzterer steigt bei Einsatz des Impellers

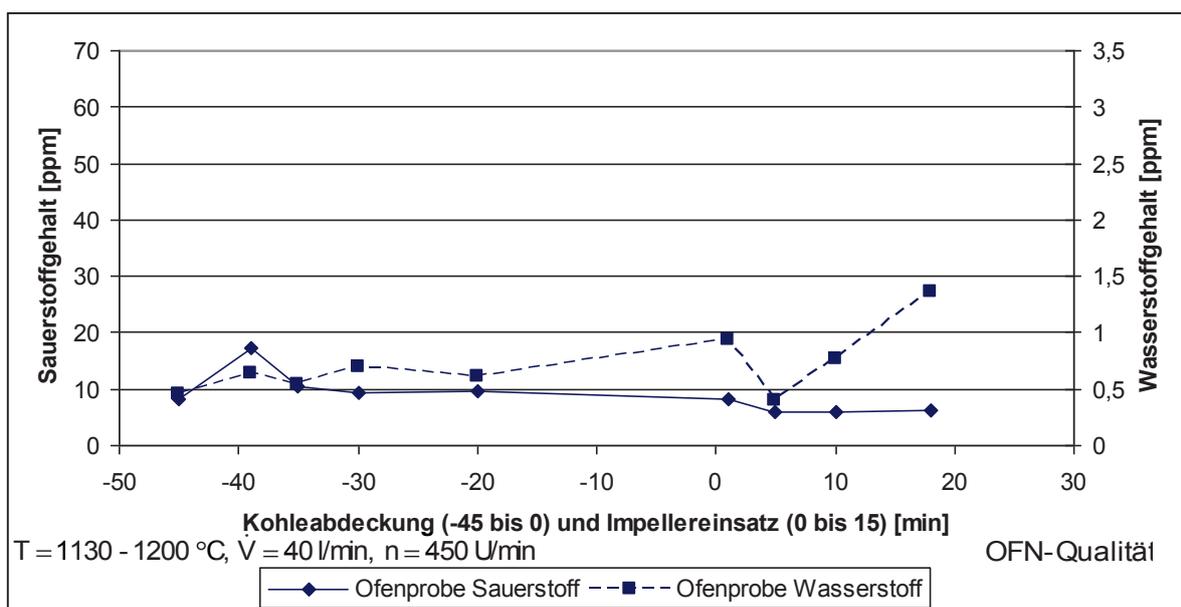


Diagramm 5.17: Versuch 2532/37; Kohle- und Impellereinsatz

Der Verlauf der Gasgehalte unter dem Einfluss des Nachsetzens der Kathoden wird in Diagramm 5.18 und Diagramm 5.20 dargestellt. Ersichtlich ist dies bei Betrachtung der wechselnden Verläufe der Ofenproben, welches bei den Bolzenproben nicht zutrifft.

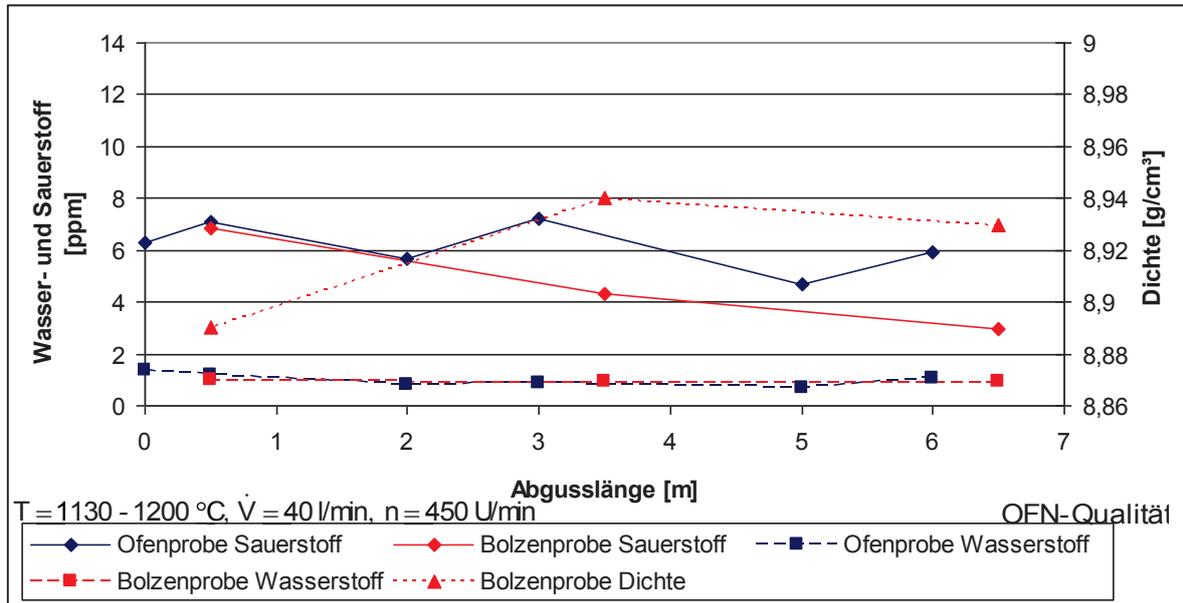


Diagramm 5.18: Versuch 2532/37; Abguss

Der steile Anstieg des Sauerstoffgehaltes resultiert aus der Freilegung des Bades und der Wasserstoffgehalt sinkt auf niedrigste Werte. Mit Aufgabe der Kohle und dem Impellereinsatz verringert sich wiederum der Sauerstoffgehalt und der Wasserstoffgehalt steigt.

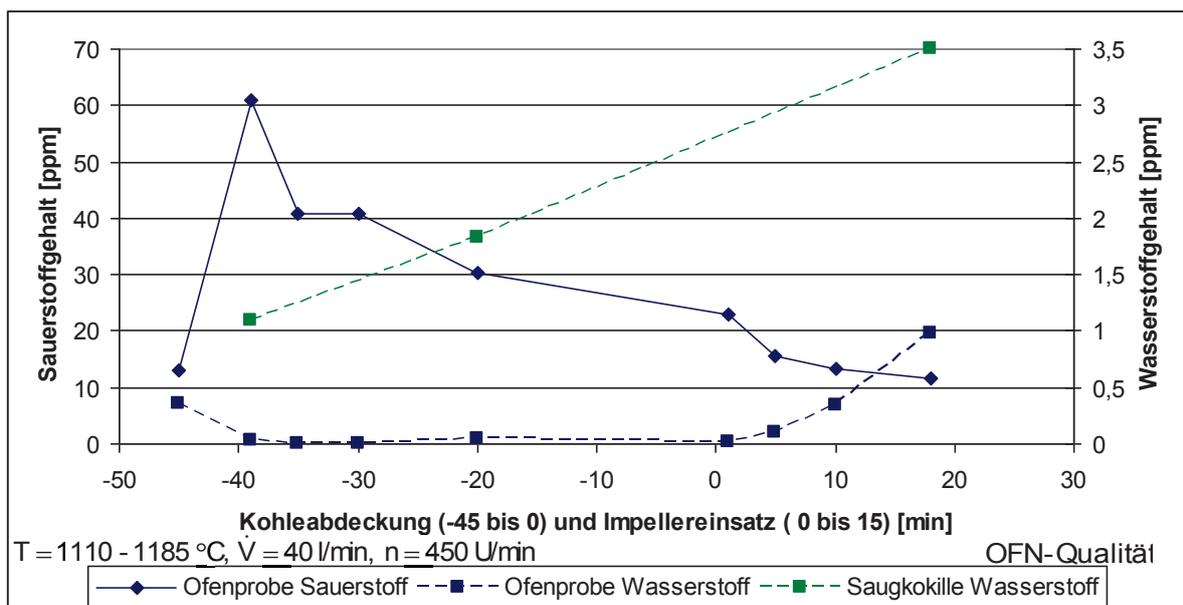


Diagramm 5.19: Versuch 2535/45; Kohle- und Impellereinsatz

Wie in Diagramm 5.20 zeigt sich die Auswirkung des Kathodennachsetzens durch den abwechselnd steigenden und sinkenden Verläufen der Ofenproben. Nicht so deutlich bei den Verläufen der Bolzenproben. Bei diesem Versuch werden bessere Dichtewerte von mindestens $8,9 \text{ g/cm}^3$ erzielt.

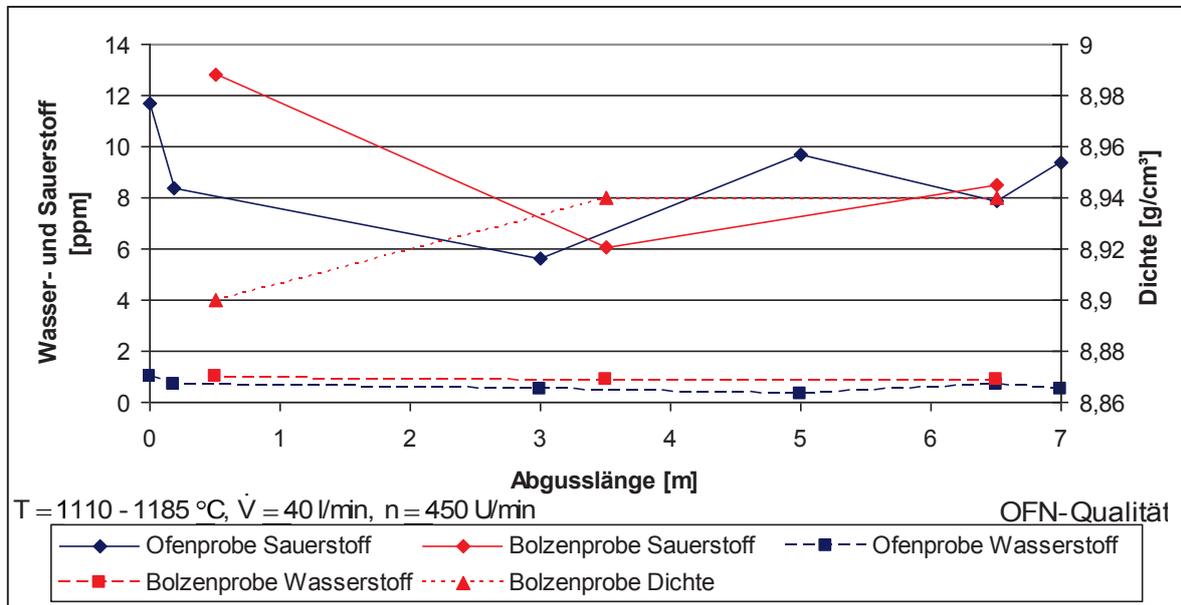


Diagramm 5.20: Versuch 2535/45; Abguss

Welche Ofenprobe vor beziehungsweise nach dem Bad entnommen wurden zeigt Tabelle 5-10.

Tabelle 5-10: Zeitpunkt der Probenentnahme in Abhängigkeit des Nachsetzens der Kathoden

	Abguss Versuch 2532/37	Abguss Versuch 2535/45
Ofenprobe 1	ca. 2 min vor dem Nachsetzen	ca. 5 min vor dem Nachsetzen
Ofenprobe 2	ca. 10 min nach dem Nachsetzen	ca. 10 min nach dem Nachsetzen
Ofenprobe 3	ca. 5 min vor dem Nachsetzen	ca. 5 min vor dem Nachsetzen
Ofenprobe 4	ca. 5 min nach dem Nachsetzen	ca. 10 min nach dem Nachsetzen
Ofenprobe 5	ca. 1 min vor dem Nachsetzen	ca. 0,5 min vor dem Nachsetzen
Ofenprobe 6	ca. 10 min nach dem Nachsetzen	ca. 6 min nach dem Nachsetzen

5.4.6 Einzelversuch mit Impeller bei Qualität OF 101 certified

Durch diesen Einzelversuch sollte bei der Qualität OF 101 certified ein Wasserstoff- bzw. Sauerstoffgehalt von kleiner 1 bzw. 5 ppm erreicht werden (Einsatzdauer des Impellers ist 20 min). Bei einem normalen Gießbetrieb wären diese Werte nicht möglich (siehe Tabelle 5-1). Denn durch das alleinige Zulegieren des Phosphors und Einsetzen guter Kathoden können keine Sauerstoffgehalte unter 5 ppm erzielt werden. Diagramm 5.21 und Diagramm 5.22 zeigen die Verläufe des Sauer- und Wasserstoffs und der Dichte während der Spülgasbehandlung und des Abgusses. Folgende Parameter wurden dafür festgelegt (siehe Tabelle 5-11):

Tabelle 5-11: Darstellung der Parametereinstellung

\dot{V} [l/min]	n [U/min]
40	450

Während des Impellereinsatzes kann bis zur Hälfte der Einsatzzeit der Sauerstoffgehalt erniedrigt werden, danach erfolgt ein starker Anstieg. Der Wasserstoffgehalt verläuft entsprechend der Literatur indirekt proportional zum Sauerstoffgehalt (Diagramm 5.21).

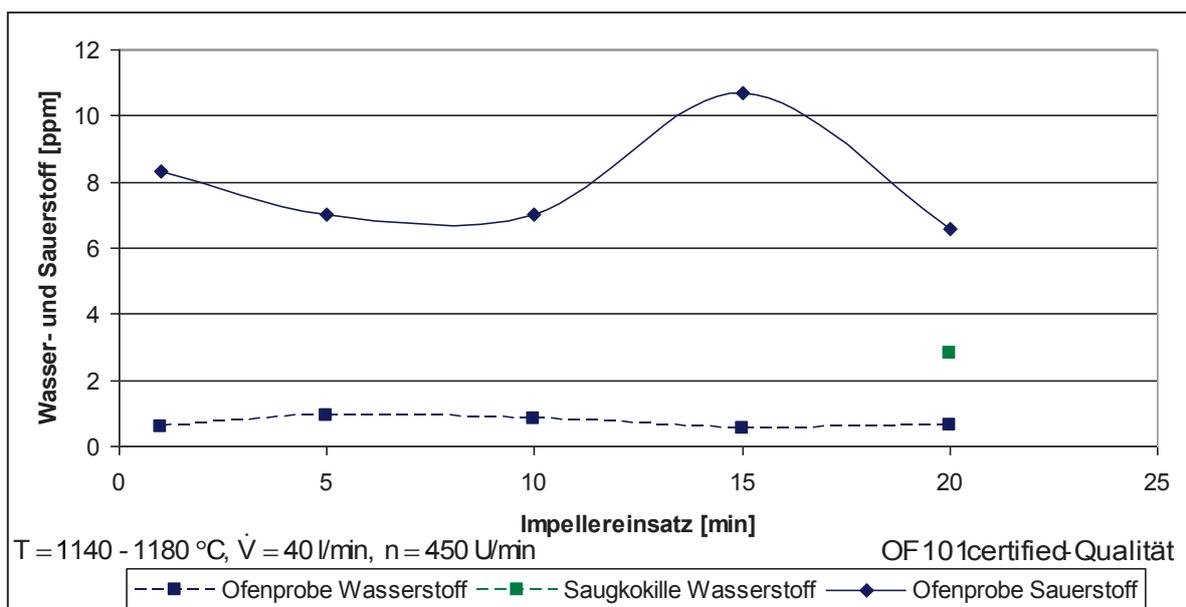


Diagramm 5.21: Versuch 1623/1; Impellereinsatz

Wie im vorigen Diagramm ist auch hier ein entgegengesetzter Wasserstoff- und Sauerstoffverlauf zu verzeichnen. Bei diesem Versuch wurden Dichtewerte von $8,92 \text{ g/cm}^3$ erzielt.

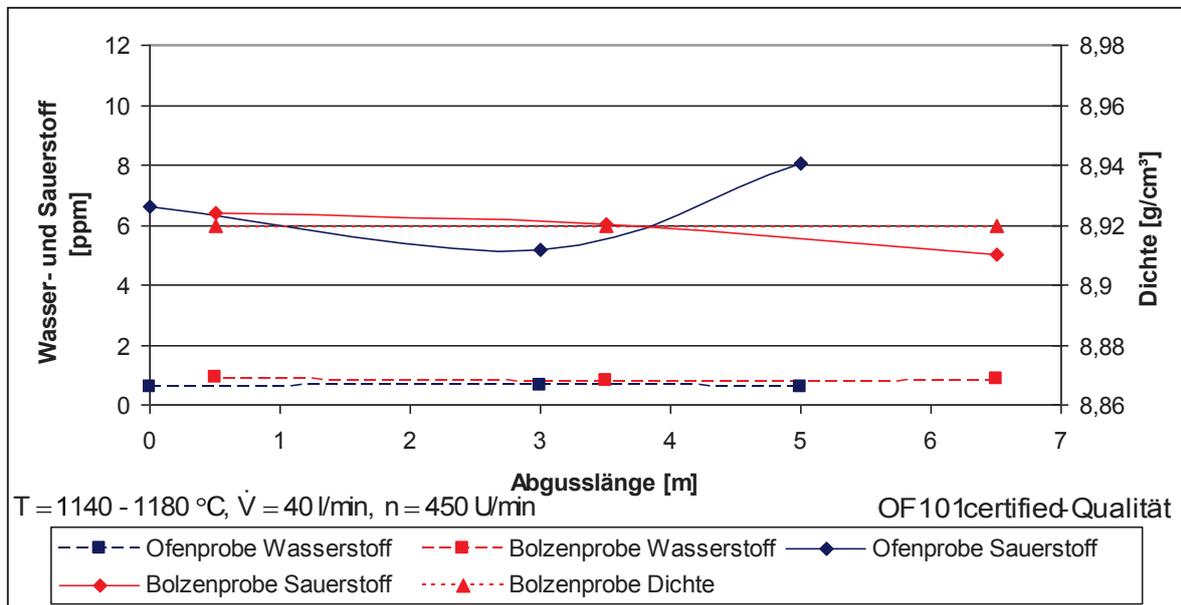


Diagramm 5.22: Versuch 1623/1; Abguss

Auch für diesen Versuch kam es zu keiner Vorgabe der Gießtemperatur. Diese ist während der jeweiligen Probenentnahme in Tabelle 5-12 angeführt.

Tabelle 5-12: Darstellung des Temperaturverlaufs

	Versuch 2532/37	
	T [$^\circ\text{C}$] Impellereinsatz	T [$^\circ\text{C}$] Abguss
Ofenprobe 1	1140	1180
Ofenprobe 2	1150	1160
Ofenprobe 3	1170	1160
Ofenprobe 4	1180	-
Ofenprobe 5	1180	-

5.5 Vorgänge während des Abgusses mit Bodenspülern

Es folgt eine Beschreibung der eingesetzten Spülkegel und anschließend eine Erklärung der damit durchgeführten Versuche.

5.5.1 HM3/500

Im Gegensatz zum Impeller kann hier nur der Volumenstrom [l/min] verändert werden, wobei der Einsatzort der Spülsteine in der folgenden Abbildung 5-8 dargestellt ist. Ein Spülkegel fiel bereits kurz nach der Inbetriebnahme aus, so dass die Versuche mit nur einem Spüler durchgeführt wurden.

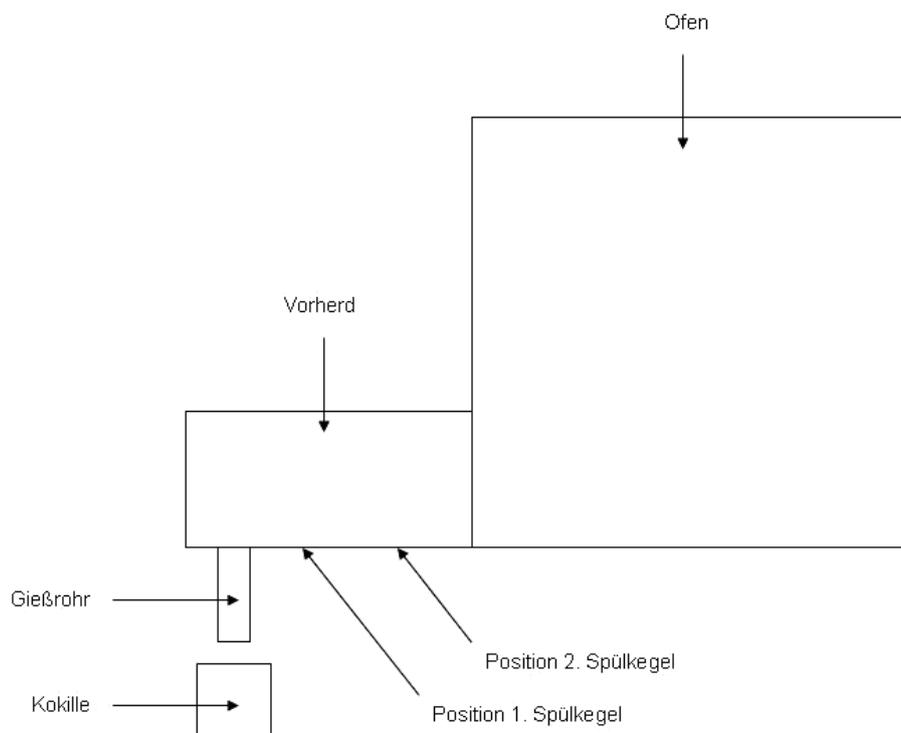


Abbildung 5-8: Lage der Spülsteine am Gießofen

5.5.2 Versuchsreihe mit Bodenspüler

Als veränderbare Parameter können die Temperaturführung, der Volumenstrom und die Qualität der Kathodenoberfläche festgehalten werden. Des Weiteren besteht diese Versuchsreihe aus 20 Einzelversuchen für die Qualitäten P 40 und OFN, wobei der Versuchsplan den möglichen Arbeitsbereich der Bodenspüler abdeckt (Tabelle 5-13).

Tabelle 5-13: Darstellung der Versuchsreihe mit Bodenspüler

Versuch	T	\dot{V}	Kathoden	Qualität
B1	niedrig	niedrig	gut	P40
B2	niedrig	hoch	gut	P40
B3	hoch	niedrig	gut	P40
B4	hoch	hoch	gut	P40
B5	niedrig	niedrig	schlecht	P40
B6	niedrig	hoch	schlecht	P40
B7	hoch	niedrig	schlecht	P40
B8	hoch	hoch	schlecht	P40
B9	niedrig	niedrig	gut	OFN
B10	niedrig	hoch	gut	OFN
B11	hoch	niedrig	gut	OFN
B12	hoch	hoch	gut	OFN
B13	niedrig	niedrig	schlecht	OFN
B14	niedrig	hoch	schlecht	OFN
B15	hoch	niedrig	schlecht	OFN
B16	hoch	hoch	schlecht	OFN
B17	mittel	mittel	schlecht	OFN
B18	mittel	mittel	schlecht	OFN
B19	mittel	mittel	schlecht	OFN
B20	mittel	mittel	schlecht	OFN

Tabelle 5-14 definiert die Bereiche niedrig, mittel und hoch für die beiden Parameter Temperatur und Volumenstrom.

Tabelle 5-14: Definition der Bereichsklassen für die Bodenspüler

	T ± 10 [°C]	\dot{V} [l/min]
niedrig	1130	5
mittel	1150	20
hoch	1180	40

Im Folgenden sind die Versuche B9, B10, B12 und B14 dargestellt, weitere befinden sich im Anhang in Kapitel 12.3.1.

Die Sauerstoff- und Wasserstoffverläufe der Bolzen- und Ofenproben weisen annähernd konstante Gehalte auf. Gleiches gilt für die Dichte (Diagramm 5.23).

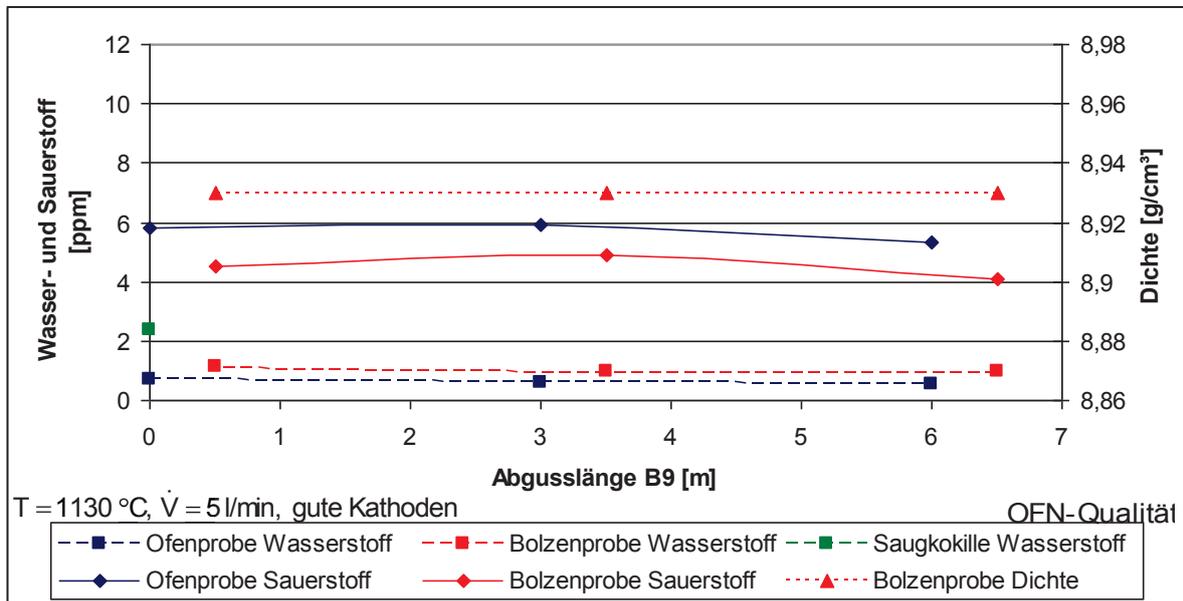


Diagramm 5.23: Versuch B9; Abguss

Diagramm 5.24 zeigt niedrige Sauerstoffgehalte und Wasserstoffgehalte von unter 1 ppm. Es werden Dichtewerte von mindestens $8,92\text{ g/cm}^3$ erreicht.

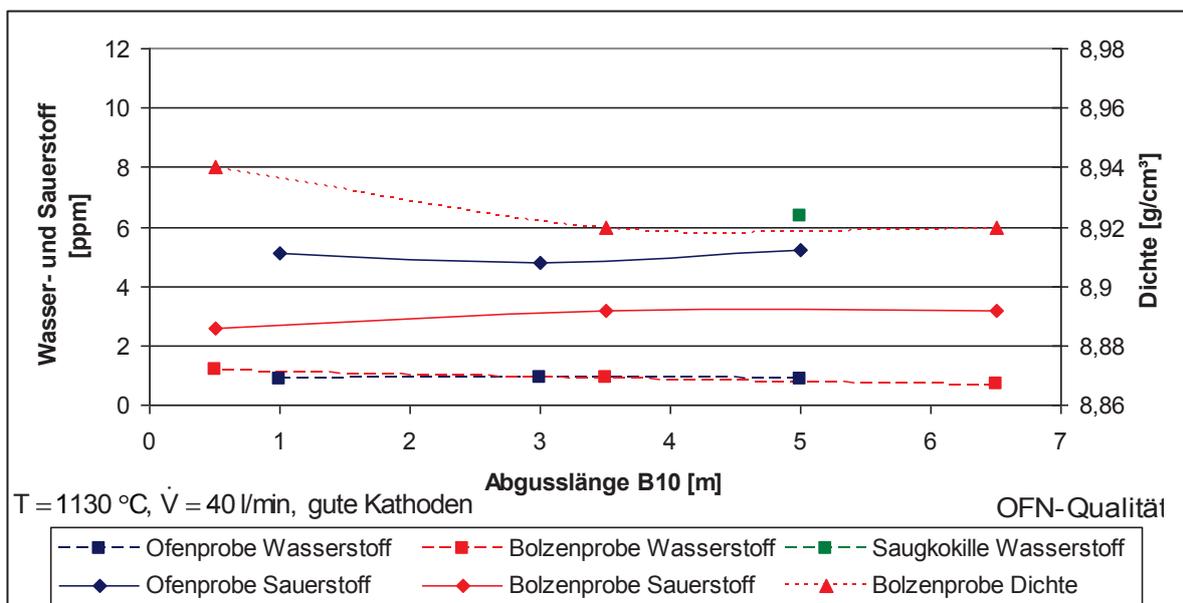


Diagramm 5.24: Versuch B10; Abguss

Diagramm 5.25 weist Sauerstoffgehalte von maximal 6 ppm und Wasserstoffgehalte unter 1 ppm auf. Es werden Dichtewerte von mindestens 8,92 g/cm³ erreicht.

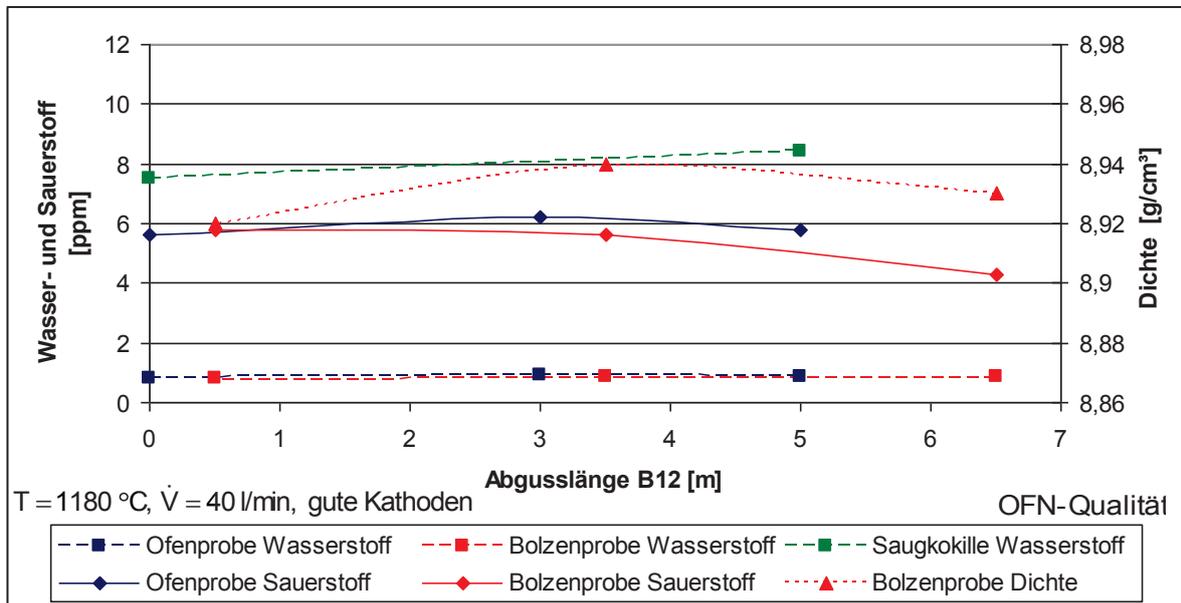


Diagramm 5.25: Versuch B12; Abguss

Diagramm 5.26 soll einen Vergleich zu Diagramm 5.23 darstellen, da dieser Versuch bei gleicher Temperatur und Volumenstrom aber schlechten Kathoden durchgeführt wurde. Erkennbar sind teilweise hohe Sauerstoffgehalte und niedrige Dichtewerte.

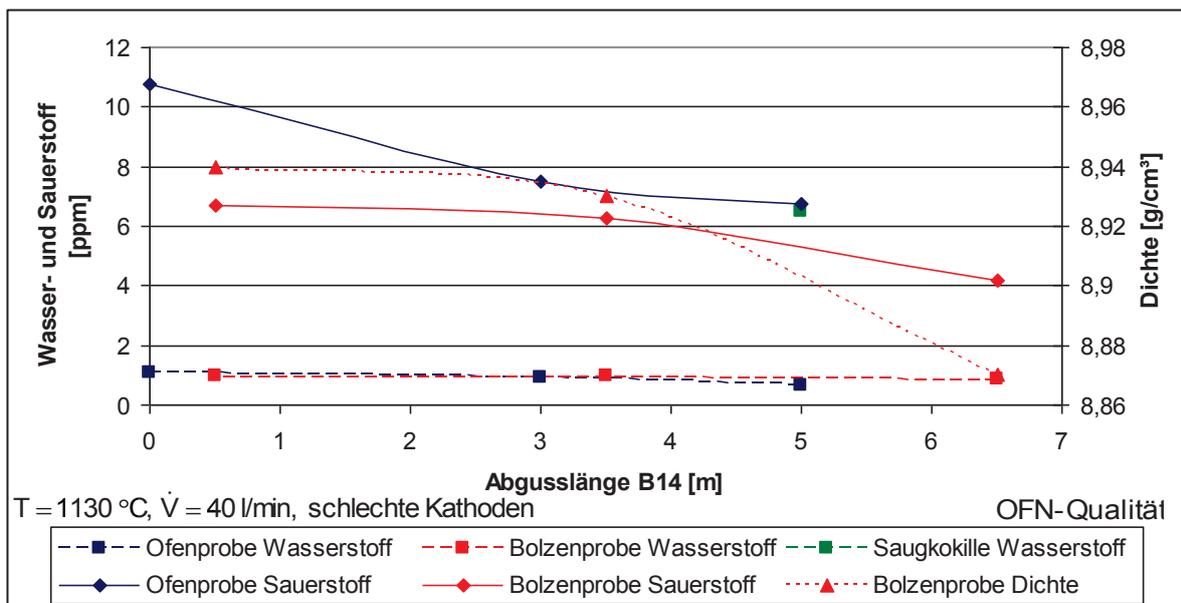


Diagramm 5.26: Versuch B14; Abguss

6. Diskussion

In den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt eine gesonderte Betrachtung der verschiedenen Einzelversuche bzw. Versuchsreihen und anschließend werden Vergleiche daraus gezogen.

6.1 Versuchsreihe für das Abgießen ohne Spülbehandlung

Die Gasgehalte aus den Proben des bereits abgekühlten Bolzens liegen unter denen der Ofenproben und die Tendenz des Verlaufes ist ähnlich. Dies entspricht der Löslichkeit der Gase, sowie der Tatsache, dass der Wasserstoffgehalt im flüssigen Kupfer stets höher ist als im festen Kupfer. Zusätzlich ist zu bemerken, dass sich der Wasserstoffgehalt indirekt proportional zum Sauerstoffgehalt verhält. Diese Gesetzmäßigkeiten sind ebenfalls in der Literatur zu finden (vgl. Kapitel 3.2.2). Weiters kann in dieser Versuchsreihe festgestellt werden, dass die Gehalte des Sauerstoffs den Wert von 8 ppm nicht überschreiten. Die Ausnahme bilden das Diagramm 5.3 und Diagramm 12.6. In allen Diagrammen ist ein Wasserstoffgehalt von unter 2 ppm zu vermerken, wobei die Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte nicht konstant über die Abgusslänge verlaufen. Der Grund liegt im Nachsetzen der Kathoden zur Temperaturregelung und das Nachlegieren mit Phosphor. Tabelle 6-1 stellt die unterschiedlichen Verläufe und Häufigkeiten der Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte aus den Ofenproben dar. Fall 1 und 2 zeigen einen linearen Verlauf, wobei eine Zunahme bzw. Abnahme der jeweiligen Werte zu verzeichnen sind. Eine Verringerung der Gehalte und anschließende Zunahme bzw. umgekehrt werden durch die Fälle 3 und 4 beschrieben. Fall 5 weist einen annähernd konstanten Verlauf der Gehalte auf. Angaben bezüglich der Dichte sind in Kapitel 6.11.4 angeführt.

Tabelle 6-1: Vereinfachte Darstellung der Verläufe und Häufigkeiten während des Abgusses ohne Spülbehandlung

	Verlaufsform	Häufigkeit O ₂	Häufigkeit H ₂
Fall 1		2	1
Fall 2		3	3
Fall 3		3	0
Fall 4		0	4
Fall 5		0	0

6.2 Verlauf des Wasserstoffgehalts vor und nach dem Einchargieren

Ein Grund für den sinkenden Wasserstoffgehalt ist, dass durch das Eintauchen der Kathode Sauerstoff in das Bad mitgerissen wird und damit der Gasgehalt steigt. Folglich muss bei einem Anstieg der Menge an Sauerstoff der Wasserstoffgehalt sinken. Siehe dazu auch Unterkapitel 6.7.

6.3 Einzelversuche zur Bestimmung des Gasgehalts in der Kokille

Beide Versuche zeigen, dass der Wasserstoffgehalt stets den Wert von 1 ppm unterschreitet. Dies erklärt, dass die in Wasser eingetauchte Papierschnur keine Auswirkungen auf den Wasserstoffgehalt am Gießanfang hat. Negativ fällt jedoch der anfänglich außerordentlich hohe Sauerstoffgehalt auf. Er resultiert aus dem zu Gießbeginn noch unbedeckten Kupferbad in der Kokille und damit kann eine Sauerstoffaufnahme nicht verhindert werden. Diese Tatsache spricht dafür, dass der Wert des Wasserstoffs von Anfang niedriger ist.

Aufgrund dieser Gegebenheiten gilt, dass bei einer Qualität mit niedrigem Sauerstoffgehalt der erste halbe abgossene Meter als Ausschuss auszuweisen und im Kreislauf zu führen ist. Ein Einblasen von Stickstoff oder Argon kurz vor Gießanfang bis zum Auftrag des Flammenrußes im Bereich der Kokille verringert den Ausschuss. Damit wird eine inerte Atmosphäre geschaffen und bereits ein anfänglich niedrigerer Sauerstoffgehalt erzielt. Das Einblasen des Gases erfolgt durch eine Lanze, welche eine leichte Handhabung für den Gießer zum Anbringen kurz vor Gießbeginn beziehungsweise zur Entfernung nach Aufgabe des Rußes darstellt. Eine zusätzliche Ummantelung mindert den Verbrauch des Gases, führt aber zu einem erschwerten Arbeiten für den Bediener der Gießanlage. Folgende Abbildung 6-1 zeigt die Positionierung der Lanze und einer möglichen Ummantelung.

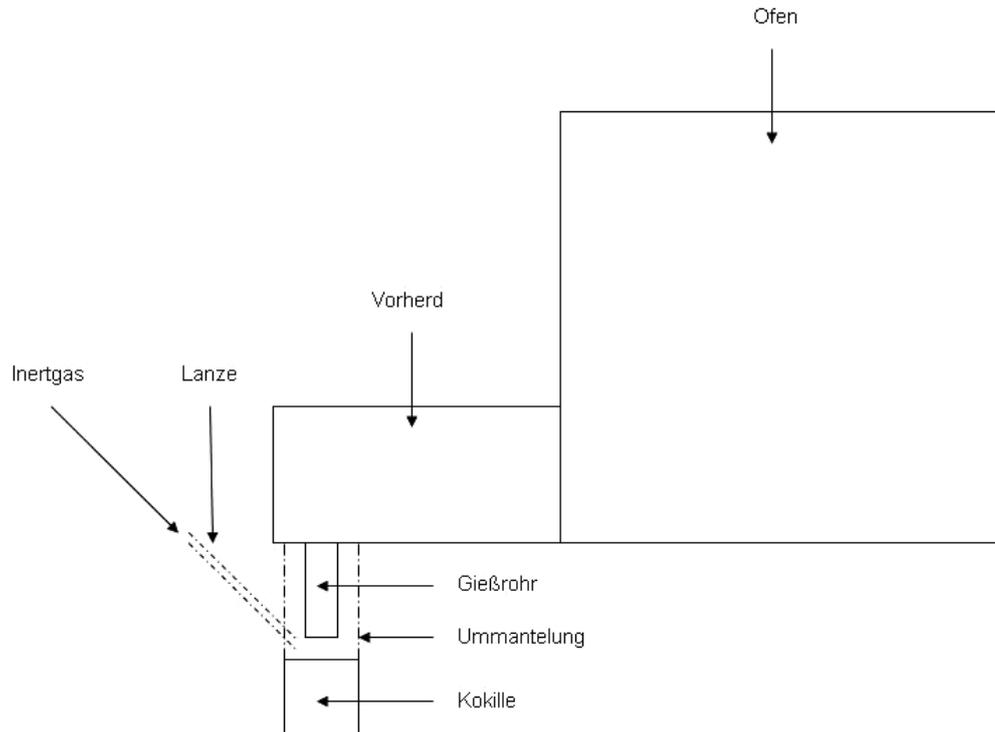


Abbildung 6-1: Anbringung der Lanze und Ummantelung

6.4 Vorversuche mit dem Impeller

Eine beachtliche Entgasung zeigt der Impeller bei den Versuchen 2469/9 und 2469/13 in Diagramm 5.7 und Diagramm 12.7. Der reduzierte Gasgehalt beträgt jeweils circa 100 ppm. Bei beiden Qualitäten ist der gegenläufige Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt ersichtlich. Diese Gegebenheit entspricht den Angaben aus der Literatur, siehe Kapitel 3.2.2.

6.5 Versuchsreihe mit dem Impeller

Allgemein ist festzuhalten, dass während der Behandlungszeit bei keinem Versuch die Holzkohlendecke aufgerissen wurde, aber stets eine Badbewegung zu erkennen war.

Tabelle 6-2 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Verläufe und der Häufigkeit der Wasserstoff- und Sauerstoffverläufe der Ofenproben während der Spülbehandlung. Für Fall 5 gilt eine Abweichung vom mittleren Wert der Ofenproben von $\pm 0,5$ ppm O_2 und $\pm 0,07$ ppm H_2 als zulässig. Bei Betrachtung der Verlaufsformen des Sauerstoffs während der Behandlungszeit, zeigt sich eine überwiegende Häufigkeit der Fälle 2 und 3. Wenn die Einsatzzeit des Impellers auf die Hälfte reduziert wird, könnte eine effizientere Senkung erfolgen, da bei Fall 3 der Sauerstoffgehalt bis zur Hälfte der Behandlungszeit sinkt und anschließend steigt. Allerdings gilt für Fall 4 das Gegenteil, dabei steigt aber der Gasgehalt

bis zur Hälfte der Behandlung häufig um nur circa 1 ppm. Für die Ergebnisse gilt zumeist der gegenläufige Sauerstoff- und Wasserstoffverlauf (siehe dazu Kapitel 3.2.2). Während der Behandlung wird häufig Fall 4 für den Wasserstoff erzielt, dies zeigen auch die Untersuchungen der Foseco GmbH (Diagramm 4.1). Zu beachten ist allerdings auch der häufig eintretende Fall 1 für den Sauerstoffverlauf während des Abgusses.

Tabelle 6-2: Vereinfachte Darstellung der Verläufe und Häufigkeiten während des Impellereinsatzes

	Verlaufsform	Häufigkeit O ₂ Behandlung/Abguss	Häufigkeit H ₂ Behandlung/Abguss
Fall 1		1 / 8	5 / 4
Fall 2		10 / 4	7 / 8
Fall 3		7 / 2	5 / 3
Fall 4		6 / 8	7 / 6
Fall 5		2 / 4	2 / 5

Für den Sauerstoffverlauf während des Abgusses gilt, dass dieser zumindest anfangs steigt, wenn der Gasgehalt am Ende der Spülzeit niedrig ist und umgekehrt. Eine Darstellung der Gasgehalte bei Einsatz des Impellers ist in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Darstellung der Gasgehalte durch den Impellereinsatz

	gute Kathoden
maximaler O ₂ -Gehalt [ppm]	15
maximaler H ₂ -Gehalt [ppm]	1,5
durchschnittlicher O ₂ -Gehalt [ppm]	5,9
durchschnittlicher H ₂ -Gehalt [ppm]	0,6

Die Ergebnisse zeigen weiters einen gegenläufigen Dichte- und Sauerstoffverlauf. Liegen erhöhte Sauerstoffwerte vor, ist das Dichteresultat entsprechend schlecht. Ein Vergleich der Versuche M/N eins, vier und sieben (siehe Tabelle 5-5) weist darauf hin, dass bei steigender Drehzahl und höherem Volumenstrom die Sauerstoff- und Wasserstoffgehalte während der Spülzeit auf ein Minimum gebracht werden.

6.6 Einzelversuch mit dem Impeller und Calciumhexaborid

Dieser Einzelversuch zeigt, dass während der Behandlungsdauer der Sauerstoffgehalt konstant sinkt und dabei der Wasserstoffgehalt kaum zunimmt. Bei einer Einsatzdauer von fünf Minuten wird der Wasserstoffgehalt wiederum leicht gesenkt. Zur Zeit des Abgusses werden Sauerstoffwerte zumeist unter 6 ppm und Wasserstoffwerte weitestgehend unter 1 ppm erreicht. Die Dichte von $8,93 \text{ g/cm}^3$ wird über die gesamte Gießlänge nicht unterschritten. In der bereits beschriebenen Versuchsreihe in Kapitel 5.4.3 konnten im Durchschnitt keine solchen Werte erzielt werden. Der Grund dafür kann in der Verwendung des Calciumhexaborids liegen.

6.7 Einzelversuch mit dem Impeller, Calciumhexaborid, schlechte Kathoden und Abdeckkohle

In diesem Einzelversuch werden gute Dichtewerte trotz Einsatz schlechter Kathoden erlangt. Außerdem zeigt sich, dass die nicht vorbehandelte Holzkohle hervorragende Desoxidationseigenschaften besitzt (Wasserstoffgehalt gering). Der anfängliche Anstieg resultiert aus dem Beiseiteschieben bzw. dem Entfernen der Holzkohlendecke, um die nicht vorbehandelte Kohle aufgeben zu können. Des Weiteren bestätigen diese beiden Versuche den bereits in Kapitel 0 beschriebenen Verlauf der Gase während des Nachsetzens der Kathoden. Lediglich der steigende Wasserstoffgehalt während dem letzten Nachsetzen in Versuch 2532/37 und der Sauerstoffverlauf beim ersten Nachchargieren in Versuch 2535/45 widersprechen den aus den Versuchen erlangten Erkenntnissen. Ansonsten gilt, dass durch eine Einbringung der Kathoden in das Bad der Sauerstoffgehalt steigt und der Wasserstoffverlauf sinkt.

6.8 Einzelversuch mit dem Impeller bei der Qualität OF 101 certified

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Impeller Gasgehalte von maximal 5 ppm nicht erreicht werden konnten. Lediglich der Wasserstoffgehalt ist stets unter dem geforderten Wert. Die diesbezüglichen Messergebnisse während des Abgusses liegen im Bereich von 0,59 bis 0,651 ppm. Der Sauerstoffgehalt unterschreitet aber bis zur letzten Probenentnahme den in Tabelle 5-1 angegebenen Wert von 8 ppm. Die Dichte beträgt über die Abgusslänge konstant $8,92 \text{ g/cm}^3$.

6.9 Versuchsreihe mit Bodenspüler

Hierbei ist festzuhalten, dass mit jeder Durchflusseinstellung eine Badbewegung im Vorherd kaum ersichtlich ist bzw. die Holzkohlendecke geschlossen blieb. Durch die eingebauten Bodenspüler im Vorherdboden kommen keine Transport- und zusätzliche Behandlungszeiten hinzu. Der Einsatz der Spülsteine findet während des Abgusses statt und beeinträchtigt den Prozess in keiner Weise.

Tabelle 6-4 zeigt die Verlaufsformen der Gasgehalte und die Häufigkeit der Wasserstoff- und Sauerstoffverläufe der Ofenproben. Für Fall 5 gilt eine Abweichung vom mittleren Wert der Ofenproben von $\pm 0,5$ ppm O₂ und $\pm 0,07$ ppm H₂. Im Gegensatz zum Impeller (siehe Tabelle 6-2) weist Tabelle 6-4 auf ein häufiges Auftreten von Fall 2 bezüglich des Sauerstoffverlaufs beziehungsweise von Fall 3 in Bezug auf den Wasserstoffverlauf hin. Mit dem Impeller werden während des Abgusses häufig Fall 1 und 4 für beide Gasverläufe erzielt.

Tabelle 6-4: Vereinfachte Darstellung der Verläufe während des Abgusses mit den Bodenspülern

	Verlaufsform	Häufigkeit O ₂	Häufigkeit H ₂
Fall 1		3	1
Fall 2		10	2
Fall 3		0	8
Fall 4		5	4
Fall 5		2	5

Im Vergleich zur Versuchsreihe mit dem Impeller, siehe Kapitel 5.4.3, erreicht der Bodenspüler teilweise höhere Sauerstoff- und Wasserstoffgehalte. Jedoch treten hier allgemein sehr hohe Dichtewerte während des Abgusses auf, da mit dem Spülkegel eine geringere Badbewegung als mit dem Impeller einsetzt. Außerdem haben die Gasblasen einen kürzeren Austrittsweg, da die Höhe des Vorherdes viel geringer als die des Ofens ist (siehe dazu auch Kapitel 6.11.4).

Des Weiteren muss beachtet werden, dass nur mit den Spülsteinen der Einsatz von guten und schlechten Kathoden erfolgte. Die Ausnahme bilden die beiden Versuche 2532/37 und 2535/45 in Kapitel 5.4.5. Der Unterschied der Kathodeneinsätze wird in Diagramm 6.1, genauso wie in Diagramm 12.75 und Diagramm 12.76 dargestellt. Für beide Kathodeneinsätze gilt, dass stets gute Dichtewerte vorliegen. Durch Verwendung der besseren Kathoden beträgt der Wasserstoffgehalt maximal 1,1 ppm und die Sauerstoffwerte welche 10 ppm überschreiten, könnten auch als Ausreißer definiert werden. Die Diagramme in Kapitel 12.5 zeigen, dass, unabhängig von der Gießart, der Wert von 10 ppm Sauerstoff

bei OFN- und P 40-Qualitäten äußerst selten überschritten wird. Gute Kathoden führen zu etwas geringeren Sauerstoff- und Wassertoffgehalten, dennoch werden bei Einsatz schlechter Kathoden die Toleranzen nicht überschritten. Die Behandlung mit Bodenspüler ermöglicht nun auch das Chargieren schlechter Kathoden für anspruchsvolle Qualitäten.

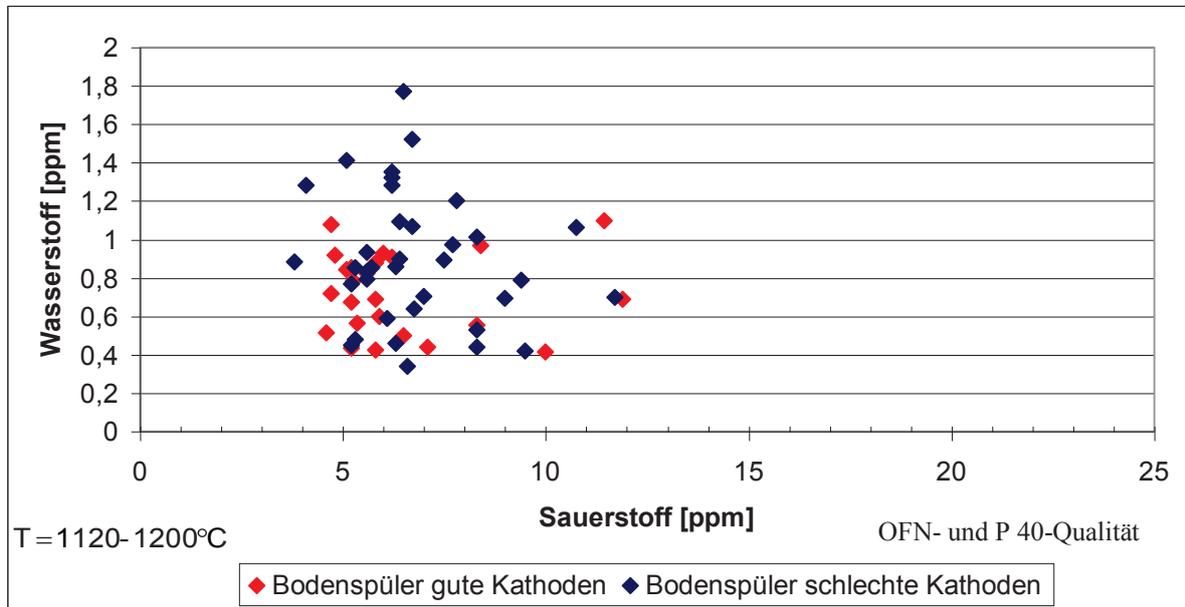


Diagramm 6.1: Einfluss von guten und schlechten Kathoden

Nachfolgende Tabelle 6-5 zeigt die Sauerstoff- und Wasserstoffgehalte bei unterschiedlichem Kathodeneinsatz. Mit dem Bodenspüler und guten Kathoden werden niedrigere Maximalgehalte, aber höhere Mittelwerte als mit dem Impeller erzielt.

Tabelle 6-5: Darstellung der Gasgehalte bei unterschiedlichem Kathodeneinsatz und Einsatz der Bodenspüler

	gute Kathoden	schlechte Kathoden
maximaler O ₂ -Gehalt [ppm]	11,9	11,7
maximaler H ₂ -Gehalt [ppm]	1,1	1,8
durchschnittlicher O ₂ -Gehalt [ppm]	6,4	6,8
durchschnittlicher H ₂ -Gehalt [ppm]	0,7	0,9

6.10 Vergleich der Gasgehalte über die Abgusslänge

Es kann hier keine sichere Aussage getroffen werden. Bereits in Kapitel 5 sind unterschiedlichste Verläufe in den diversen Diagrammen ersichtlich. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden stets Tendenzen der Gasgehalte besprochen.

6.10.1 Vergleich des Wasserstoffgehalts über die Abgusslänge

Die auf diesen Abschnitt bezogenen Diagramme sind in Kapitel 12.4.1 zu finden

6.10.1.1 Ohne Behandlung

Hier kann keine genaue Aussage getroffen werden. Es zeigt sich aber, dass auch mit hohen Gießtemperaturen niedrige Wasserstoffwerte erzielt werden können.

6.10.1.2 Impeller

Bei einer Umdrehung von 350 U/min führt eine zunehmende Temperatur und mittlerer beziehungsweise niedriger Volumenstrom zu einem minimalen Wasserstoffgehalt. Erfolgt eine Einstellung mit 450 U/min, ist eine wirkungsvollere Entgasung mit eher höherem Volumenstrom gegeben.

6.10.1.3 Bodenspüler

Bei guter und schlechter Kathodenqualität gilt, dass ein hoher Volumenstrom für niedrige Wasserstoffwerte erforderlich ist.

6.10.2 Vergleich des Sauerstoffgehalts über die Abgusslänge

Die dafür erstellten Diagramme sind in Kapitel 12.4.2 angeführt.

6.10.2.1 Ohne Behandlung

Um niedrige Sauerstoffwerte zu erzielen, sollten Abgusstemperaturen im Bereich von 1130 bis 1150 °C angestrebt werden (siehe dazu Diagramm 6.2). Dies entspricht auch den Angaben aus der Literatur. Temperaturen von 1200 °C führen zu Sauerstoffmindestgehalte von 7 ppm.

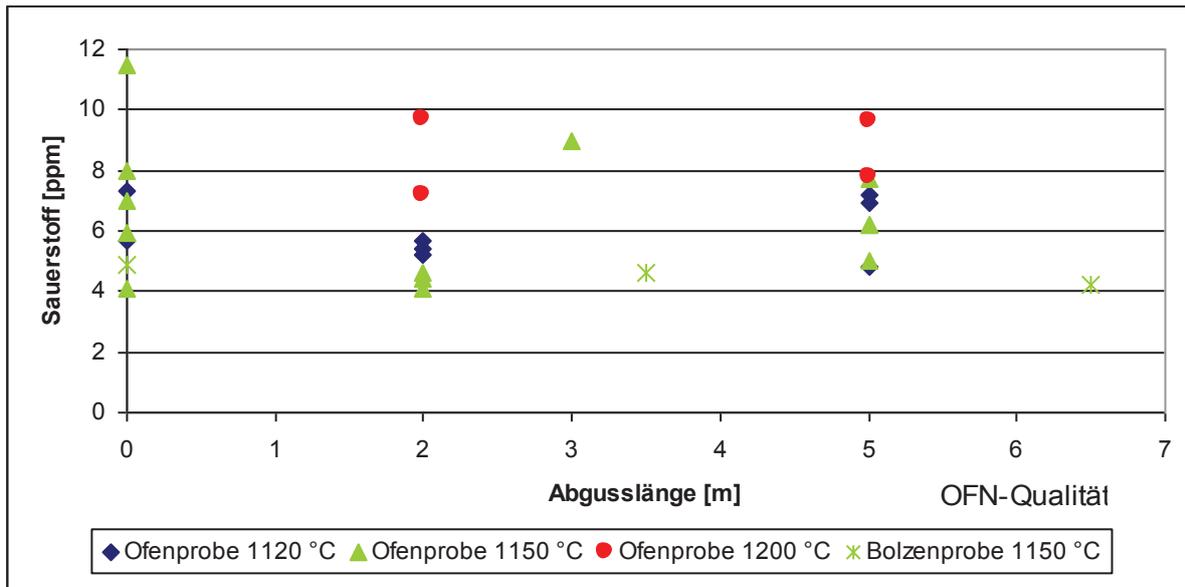


Diagramm 6.2: OFN-Qualität, gute Kathoden

6.10.2.2 Impeller

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Rotorumdrehungen zeigt sich, dass tiefe Sauerstoffwerte tendenziell mit niedrigen Abgusstemperaturen und geringem Volumenstrom erreicht werden.

6.10.2.3 Bodenspüler

Es gilt, dass bei guter und schlechter Kathodenqualität eine erhöhte Temperatur zu geringen Sauerstoffgehalten führen bzw. liegen die Gehalte an Sauerstoff und Wasserstoff bei unterschiedlichen Temperaturen nahe beieinander und damit eine Kontinuität gewährleistet werden kann. Ein Grund dafür kann sein, dass mit dem Bodenspüler, im Gegensatz zu dem Impeller, die Behandlungszeit über die gesamte Abgusslänge erfolgt. Diese Effektivität spricht für den Bodenspüler, da im Gießbetrieb das Anfahren bei einer erhöhten Temperatur erfolgt. Ein erhöhter Volumenstrom neigt ebenfalls zu geringen Werten.

6.11 Vergleich der Behandlungsmethoden

In diesem Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der Behandlungsmethoden während des Abgusses. Dafür findet ein Vergleich der damit erzielten Dichte-, Phosphor- und Gasgehalte statt.

Die dafür erstellten Diagramme befinden sich in den Unterkapiteln des Abschnitts 12.5. Weiters wurde für die Diagrammerstellung keine Unterscheidung in schlechte und gute Kathodeneinsätze für die Versuche mit den Bodenspülern getätigt, da beide Einsätzen gute Ergebnisse erzielten. Eine Trennung der Kathodenqualität ist in Diagramm 6.1 ersichtlich, genauso wie in Diagramm 12.75 und Diagramm 12.76. Für die folgenden Vergleiche der drei unterschiedlichen Abgussmethoden, wird bei den Spülsteinen nur der Einsatz guter Kathoden betrachtet.

6.11.1 Vergleich der Wasserstoff- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Allgemein kann gesagt werden, dass mit dem Impeller niedrigste Sauerstoffwerte und dabei geringste Wasserstoffgehalte erreicht werden.

Durch die Behandlung mit dem Spülstein ist eine effektivere Entgasung im Vergleich zum derzeitigen Gießbetrieb feststellbar (Diagramm 12.129).

Bei Betrachtung der verschiedenen Gießtemperaturen zeigen sich folgende Ergebnisse:

- 1120 - 1130 °C: Beide Spülbehandlungen erzielen bei der abgegossenen OFN-Qualität ungefähr dasselbe Ergebnis (Diagramm 12.130). Geringere Wasserstoffwerte bei gleichem Sauerstoffgehalt werden eher mit den Spülsteinen erreicht. Die Gießergebnisse der P 40-Qualität weisen auf geringere Wasserstoff- und Sauerstoffwerte durch Einsatz des Impellers hin (Diagramm 12.134).
- 1150 °C: Eine bessere Entgasung wird durch den Rotor ermöglicht. Siehe dazu Diagramm 12.131.
- 1180 - 1200 °C: In diesem Temperaturbereich liegt eine verbesserte Dehydrierung durch den Impeller vor (Diagramm 12.136).

6.11.2 Vergleich der Phosphor- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Die Untersuchungen ergaben, dass mit den Spülsteinen ein wesentlich geringerer Verbrauch an Phosphor für die Dehydrierung benötigt wird. Siehe dazu als Beispiel Diagramm 12.137. Wie schon in Kapitel 6.11.1 besprochen, ist mit dem Impeller jedoch ein geringerer

Wasserstoffgehalt möglich. Den gleichen Effekt erzielen die beiden Spülbehandlung bei einer hohen Abgusstemperatur (Diagramm 12.140), ansonsten sind Vorteile mit dem Bodenspüler erkennbar (Diagramm 12.146).

6.11.3 Vergleich der Phosphor- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Hier tritt das selbe Ergebnis wie in Kapitel 6.11.2 auf. Der Bodenspüler ist dem Gießen ohne Behandlung in etwa gleichzusetzen und zeigt eine effektivere Desoxidation in Bezug auf den Phosphorverbrauch als der Rotor (Diagramm 12.149). Ebenso ist die Wirksamkeit der beiden Spülbehandlungen bei hohen Gießtemperaturen gleichwertig (Diagramm 12.160). Erfolgt ein Abguss unter diesen Temperaturen, ist ein effizienteres Resultat durch den Einsatz der Spülsteine zu vermerken (Diagramm 12.154).

6.11.4 Darstellung des Dichteverlaufs bei OFN- und P 40-Qualitäten und ohne Spülbehandlung

In Diagramm 6.3, genauso wie in Diagramm 12.161 und Diagramm 12.162, sind Dichtewerte der Qualitäten OFN und P 40 nach dem Abgießen ohne Spülbehandlung angegeben. Dabei sind deutliche Abweichungen unter den geforderten Mindestwerten erkennbar. Besonders häufig tritt dies bei der Qualität P 40 auf.

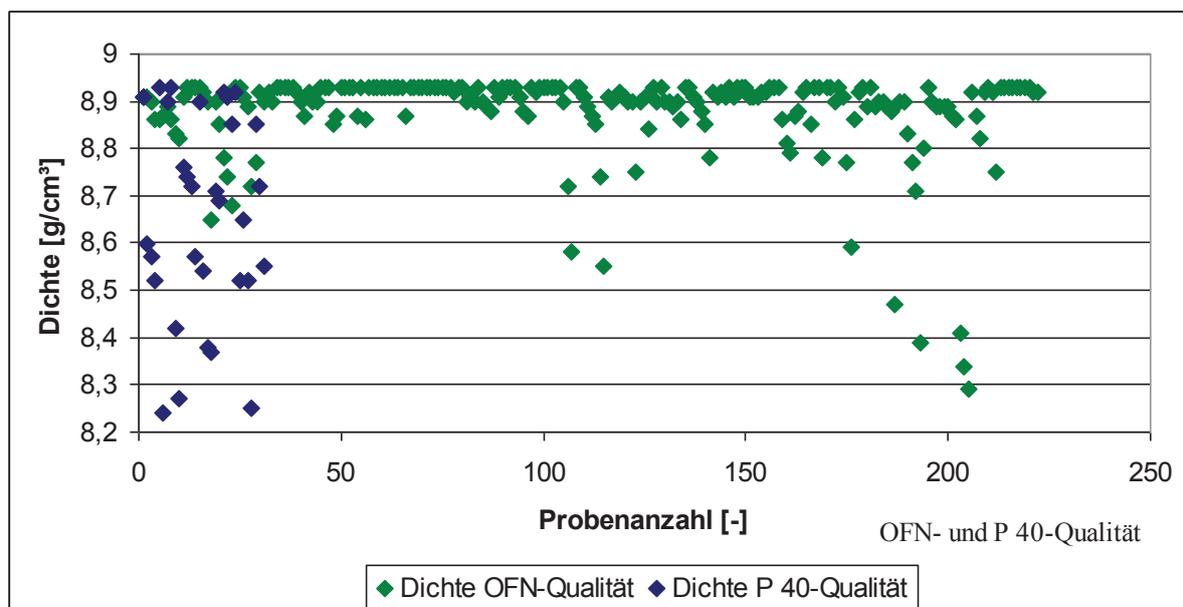


Diagramm 6.3: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

In der Versuchsreihe mit dem Impeller werden teilweise Dichtewerte von über $8,9 \text{ g/cm}^3$ erreicht, häufiger sind sie aber darunter zu finden. Die geringsten Werte sind bei circa $8,2 \text{ g/cm}^3$ anzutreffen. Mit den Spülsteinen werden Dichtehöchstwerte von $8,95 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Die beiden Werte die unter $8,9 \text{ g/cm}^3$ liegen betragen jeweils $8,87 \text{ g/cm}^3$. Zum Vergleich wird nun in Tabelle 6-6 die prozentuelle Aufteilung der Dichtewerte mit den verschiedenen Abgussmethoden angegeben.

Tabelle 6-6: Prozentuelle Aufteilung der Dichtewerte in Abhängigkeit der Abgussmethode

	ohne Behandlung	Impeller	Bodenspüler
$< 8,9 \text{ g/cm}^3$	37 %	48 %	3,5 %
$\geq 8,9 \text{ g/cm}^3$	63 %	52 %	96,5 %

6.11.5 Vergleich der Dichte- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied der verschiedenen Abgussmethoden. Gute Ergebnisse werden durch die Verwendung der Bodenspüler erzielt. Damit ist ein nahezu konstantes Erreichen der Mindestwerte von $8,9 \text{ g/cm}^3$ gewährleistet (Diagramm 6.4). Starke Abweichungen sind durch Verwendung des Impellers zu vermerken, womit sich gegebenenfalls eine hohe Ausschussrate ergibt. Als Ausschuss wird der Grenzwert von $8,8 \text{ g/cm}^3$ angegeben. Werden die Ergebnisse der Versuchsreihe mit dem Impeller herangezogen, liegt eine Ausschussrate von 38,6 % vor. Diese niedrigen Dichtewerte zeigen keinen Zusammenhang mit dem Wasserstoffgehalt. Die angesprochene Verteilung ist bei nahezu allen Temperaturbereichen zu sehen.

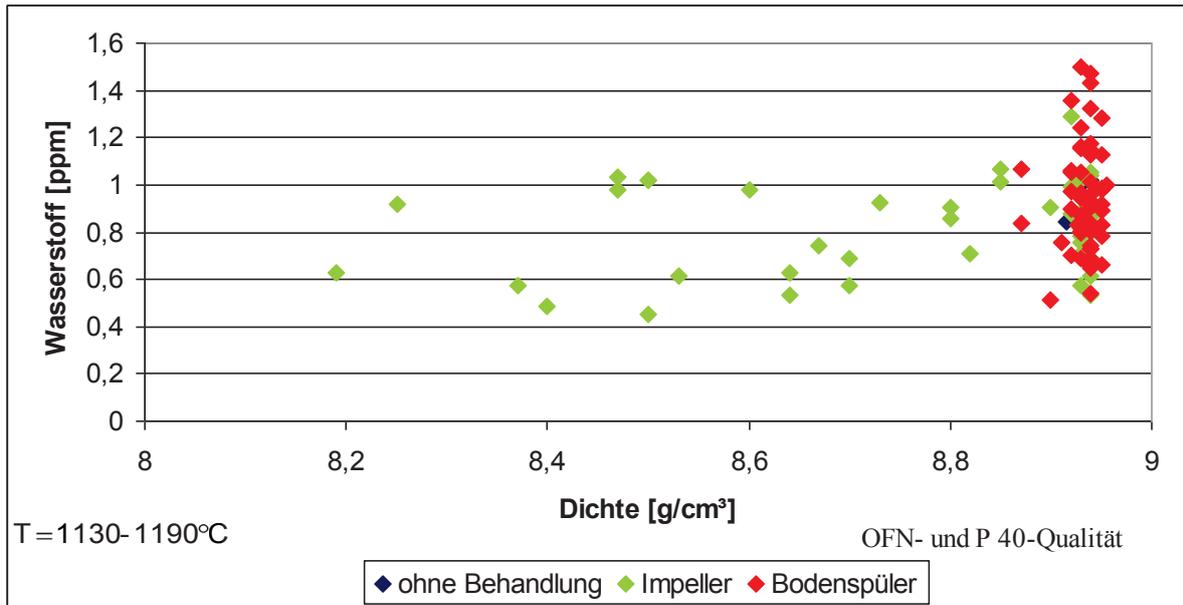


Diagramm 6.4: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

6.11.6 Vergleich der Dichte- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Der Bodenspüler liefert höchste Dichtegehalte. Weiters zeigt Diagramm 6.5, dass mit dem Impeller deutliche Werte unter 8,9 g/cm³ erzielt werden (siehe dazu auch Kapitel 0).

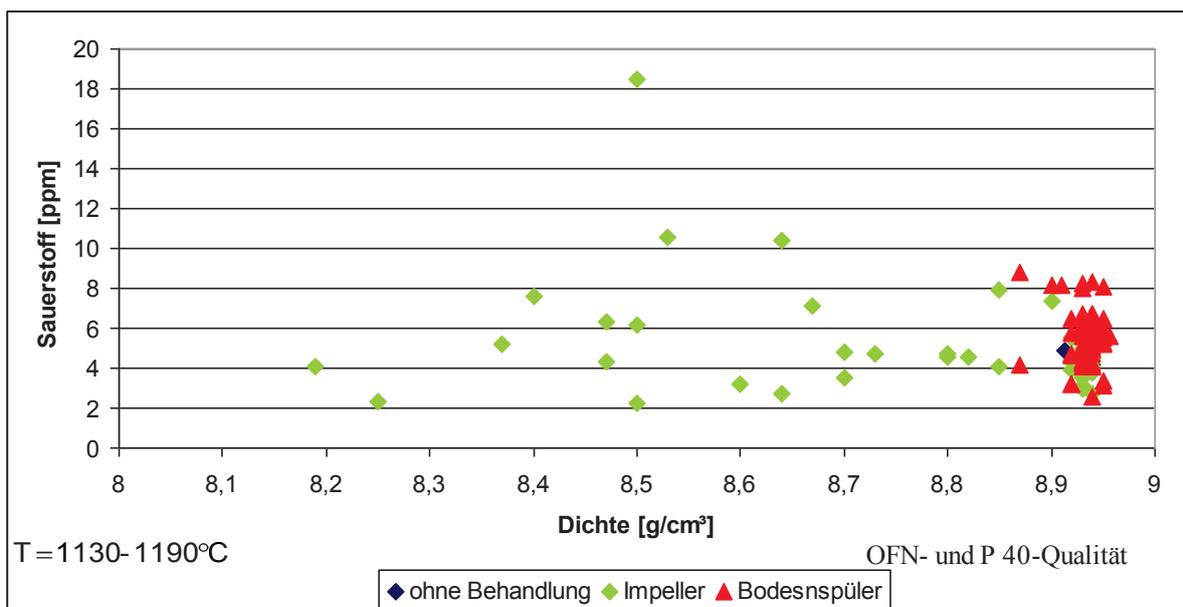


Diagramm 6.5: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

6.11.7 Vergleich der Dichte- und Phosphorgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Diagramm 6.6 stellt dar, dass der Impeller niedrigste Dichtewerte liefert und mit dem Bodenspüler zumeist Dichtegehalte von mindestens $8,9 \text{ g/cm}^3$ erreichbar sind (siehe dazu auch Kapitel 0 und 6.11.6).

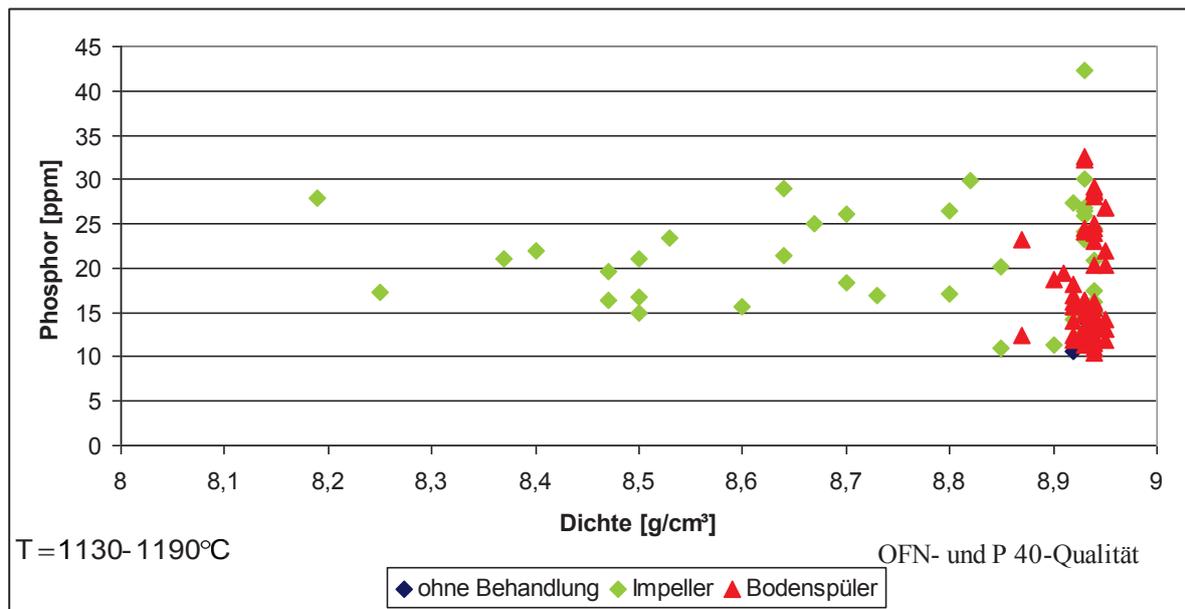


Diagramm 6.6: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

6.11.8 Vergleichende Zusammenfassung in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

Als Bewertungssystem für die nachfolgende Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8 dienen die Nummerierungen 1 bis 4. Die Zahl 1 beschreibt das Gießsystem mit den am besten erzielten Ergebnissen. Die schlechtesten Resultate werden mit der Zahl 4 definiert. Im Anhang ist die prozentuelle Aufteilung der Ergebnisse und die dafür nötige Bereichseinteilung für die beiden Qualitäten OFN und P 40 dargestellt (Kapitel 12.5.8, Tabelle 12-9 bis Tabelle 12-12).

Die Reihung der Ergebnisse, bezogen auf die Gießmethoden bei OFN-Qualität, zeigt Tabelle 6-7. Zu erwähnen ist, dass beim Gießen ohne Behandlung und mit dem Impeller nur gute Kathoden zum Einsatz kamen (ebenso für Tabelle 6-8). Bei der herkömmlichen Gießart bzw. mit dem Impeller sind niedrigste Wasserstoffgehalte erreichbar. Mit dem Spülkegel hingegen werden geringe Sauerstoffgehalte und höchste Dichtewerte erzielt.

Tabelle 6-7: Vergleich der Behandlungsmethoden bei OFN-Qualität

	Wasserstoff	Sauerstoff	Phosphor	Dichte
ohne Behandlung	1	4	1	3
Impeller	2	2	4	4
Spülkegel (gute Kathoden)	3	1	2	1
Spülkegel (schlechte Kathoden)	4	3	3	2

Tabelle 6-8 zeigt eine Reihung der Ergebnisse bezogen auf die P 40-Qualität. Hierbei muss erwähnt werden, dass mit der herkömmlichen Gießbehandlung keine Versuche bei einer P 40-Qualität durchgeführt wurden. Die Dichtewerte dafür wurden von der Qualitätssicherung der Gießerei übernommen. Auch hier zeigen sich ähnliche Resultate wie bei der OFN-Qualität. Geringere Sauer- und Wasserstoffwerte sind eher mit dem Impeller erzielbar, siehe dazu auch die geringen Unterschiede im Vergleich zum Spülkegel in Tabelle 12-12. Der Spülkegel erreicht hohe Dichtewerte.

Tabelle 6-8: Vergleich der Behandlungsmethoden bei P 40-Qualität

	Wasserstoff	Sauerstoff	Phosphor	Dichte
ohne Behandlung	-	-	-	4
Impeller	1	1	3	3
Spülkegel (gute Kathoden)	2	2	2	1
Spülkegel (schlechte Kathoden)	3	3	1	2

Gesamt gesehen ist mit dem Spülkegel, bei Einsatz von guten Kathoden, am ehesten die gewünschte Wirkung erreichbar (siehe dazu Tabelle 6-9). Außerdem wird der Gießer damit in seiner Arbeit nicht aufgehalten und es kommt zu keiner Verzögerung des Gießbeginns.

Tabelle 6-9: Mittelwerte der verschiedenen Gießmethoden

	Mittelwert ohne Behandlung	Mittelwert Impeller	Mittelwert Spülkegel	
			Gute Kathoden	Schlechte Kathoden
OFN-Qualität	2,25	3	1,75	3
P 40-Qualität	4	2	1,75	2,25
Beide Qualitäten	2,6	2,5	1,75	2,625

7. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt die Reduzierung des Sauerstoff- und Wasserstoffgehalts durch geeignete Spülgasbehandlungen in der Montanwerke Brixlegg AG. Darüber hinaus kommt es zur Erläuterung der Beziehungen zwischen den Elementen Phosphor, Sauerstoff und Wasserstoff.

Zusätze von Phosphor beeinflussen die Eigenschaften des Kupfers zunehmend. Als Legierungsmittel führt es zu einer Herabsenkung des Sauerstoffgehalts und besitzt außerdem gute Dehydrierungseigenschaften. Der Gehalt an Phosphor ist allerdings aufgrund der Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit zu begrenzen.

Die gelösten Gase in der Metallschmelze haben einen Einfluss auf das Erstarrungsgefüge, da sie sich mit fallender Temperatur aufgrund der abnehmenden Löslichkeit ausscheiden. Die gelöste Wasserstoffmenge im flüssigen Kupfer folgt dem Gesetz nach Sieverts. Weiters sind die Gleichgewichtsverhältnisse des Sauerstoffs und Wasserstoffs vom Druck und der Temperatur abhängig. Zugleich gilt, je höher der Sauerstoffgehalt, desto niedriger ist der Wasserstoffgehalt und umgekehrt. Auch die Dichte des vergossenen Kupfers ist im Wesentlichen eine Funktion des Gasgehaltes bzw. der Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Sauerstoff und Wasserstoff.

Für die Untersuchungen fand eine Literaturrecherche statt, die verschiedene verwendete Behandlungsarten aus der Industrie beschreibt. Es wurden auch Methoden aus der Aluminiumindustrie herangezogen, da Adaptierungen daraus durchaus möglich wären. Als Beispiele seien Filtersysteme und Spülgasbehandlungen wie Lanzen, Rotoren und Spülsteine angeführt.

Im Zuge dieser Arbeit fanden ein Rotor der Firma Foseco GmbH und Spülsteine der Firma Zakłady Magnezytów „ROPCZYCE“ S.A. ihren Einsatz. In mehreren Versuchsreihen und Einzelversuchen wurden die damit erzielten Ergebnisse dem Ist-Zustand in der Gießerei der Montanwerke Brixlegg AG gegenübergestellt. In diesen Experimenten fließen Parameter wie Badtemperatur, Kathodenqualität, Behandlung der Holzkohle, Desoxidationsmittel Calciumhexaborid, Drehzahl des Rotors und Volumenstrom ein.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Impeller geringste Sauerstoff- und Wasserstoffgehalte erreicht werden können. Allerdings ist eine hohe Ausschussrate bezüglich der Dichte zu beachten, da die geforderten $8,93 \text{ g/cm}^3$ oft unterschritten werden. Die Behandlungen mit dem Bodenspüler weisen sehr gute Dichtewerte von bis zu $8,95 \text{ g/cm}^3$ auf. Im Vergleich zur konventionellen Gießart sind geringere Sauerstoff- und auch Wasserstoffgehalte bei niedrigsten Phosphorgehalten erzielbar. Anzumerken ist auch, dass bei Einsatz der Spülkegel, ganz im Gegensatz zum Impeller, der Gießer in seiner Arbeit nicht behindert bzw.

aufgehalten wird. Die Spülbehandlung mit dem Rotor setzt nicht während des Gießablaufs, sondern davor ein, womit es auch zur Verringerung der möglichen Gießzeit kommt.

Zusammenfassend betrachtet, ist eine Behandlung mit dem Spülkegel am effektivsten, da im Gegensatz zu einem herkömmlichen Gießablauf geringere Gasgehalte und im Vergleich zum Impeller und dem Ist-Zustand in der Gießerei höchste Dichtewerte erzielt werden. Außerdem kommt es zu keiner Beeinträchtigung des Gießablaufs und über die Abguslänge gesehen sind zumeist nahezu konstante Sauerstoff- und Wasserstoffverläufe erreichbar. Zusätzliche Versuche mit dem Desoxidationsmittel Calciumhexaborid könnten zu weiteren Aussagen führen.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Interne Präsentation der Montanwerke Brixlegg AG.
- [2] Antrekowitsch H.: Metallrecycling. Vorlesungsunterlagen des Institutes für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben, Leoben (A) 2002.
- [3] Riedel E.: Anorganische Chemie. 3. Auflage, Verlag Walter de Gruyter, 1994.
- [4] Langner B. E.: Die Welt der Metalle – Technologie der Kupferherstellung Verhüttung und Raffination. Metallgesellschaft AG, Frankfurt am Main (D) 1993.
- [5] Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie – Band 15, 4. Auflage, Hrsg.: Bartholomé E., ISBN: 3-527-20000-2, Weinheim (US) 1978.
- [6] Antrekowitsch H.: Sekundärmetallurgie. Vorlesungsunterlagen Institut für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität, 2005.
- [7] Opie W., Rajcevic H. P., Jones W. D.: Secondary Copper Smelting – Physical Chemistry of Extractive Metallurgy. Proceedings from AIME Meeting, New York (US) 1985.
- [8] Stibich R.: Einflüsse auf die Zinnmonoxidverflüchtigung im Konverterbetrieb. Diplomarbeit, Institut für Technologie und Hüttenkunde der Nichteisenmetalle, Montanuniversität Leoben, Österreich, 1982.
- [9] Biswas A. K., W. G. Davenport: Extractive Metallurgy of Copper, 3rd edition, Pergamon Press, ISBN 0-08-042124-5, 1994.
- [10] Bendiek B.: Raffination ausgewählter Kupferschrotte im HTM-Reaktor. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 1998.
- [11] Baier R., B. M. Kushma: Anode Furnace Refining. Copper, Hafner Publishing Company, 1970.
- [12] Morgenstern G., K. Hein: Modelltechnische Untersuchungen in einem Kupferanodenkipföfen. Neue Hütte 28 (1983), Heft 12, 456 - 461.
- [13] Prietl T., H. Antrekowitsch, A. Filzwieser, K. Gamweger: Spülgasbehandlung in der Kupfer und Aluminiumsekundärmetallurgie. Proc. Of Depotech (2004), 721 - 724.
- [14] Chernomurov F.M. and others: Crystallization features for copper anodes when changing the design and cooling conditions for molds. Tsvetn. Met. (Non-ferrous Metals) (1986), No. 3, 23 - 25.
- [15] Deutsches Kupfer Institut E. V.: Kupfer. 2. Auflage, Saladruck Berlin, 1982.
- [16] Deutsches Kupfer Institut E. V.: Die Kupferfibel. Kupijai und Prochnow Druck, 1964.
- [17] Dies K.: Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg 1967.
- [18] Tafel V.: Lehrkunde der Metallhüttenkunde. Band 1, S. Hirzel Verlagsbuchhandlung, 1951.
- [19] <http://www.ktf-split.hr/periodni/en/li.html>; Stand 02.09.2008.
- [20] http://elementsales.com/pl_element_grp1.htm; Stand 02.09.2008.
- [21] <http://www.ktf-split.hr/periodni/en/p.html>; Stand 02.09.2008.

-
- [22] Deutsches Kupfer Institut E. V.: Kupfer in der Elektrotechnik - Kabel und Leitungen. Breuerdruck, Düsseldorf 2000.
- [23] Frisvold, F., T. A. Engh, S. T. Johansen and T. Pedersen: Removal of inclusions - a survey and comparison of principles. Light Metals TMS (1992), 1125-11132.
- [24] Aarflot, A. O., S. T. Rasch, S. T. Johansen and K. Venas: The development of a new in-line 3 rotor metal refining unit. Light Metals TMS (1995), 1207-1214.
- [25] Pedersen, T.: Refining efficiency on hydrogen, alkaline metals and inclusions in the hydro metal refining system. Light Metals TMS (1991), 1063-1067.
- [26] Ventre, I. and J. Rolland: Replacing ceramic foam filtration by an ALPUR S1000 in-line treatment: a winning bet at Cableries De Lens. Light Metals TMS (1995), 1245-1251.
- [27] <http://www.patent-de.com/20050818/DE60104145T2.html>; Stand 02.09.2008.
- [28] Hicter, JM. H.: ALPURTM refining process. Light Metals TMS (1983), 1005-1022.
- [29] Hampton, D. T. and A. Moores: Review of operation and performance of the rapid degassing equipment for molten aluminium. Light Metals TMS (1991), 1159-1163.
- [30] Waite, P. and R. Thiffault: The Alcan compact degasser: a through-based aluminium treatment process, Part I: Metallurgical principles and performance. Light Metals TMS (1996), 1001-1006.
- [31] Lavoie, S., E. Pilote, M. A. Thibault and C. J. Pomerlau: The Alcan compact degasser: a through-based aluminium treatment process, Part II: Equipment description and plant experience. Light Metals TMS (1996), 1007-1010.
- [32] Szekely, G. S.: The removal of solid particles from molten aluminium in the spinning nozzle inert flotation process. Metallurgical Transactions B, Volume 7B (1976), 259-270.
- [33] Netter, P. and C. Conti: Efficiency of industrial filters for molten metal treatment-evaluation of a filtration process model. Light Metals TMS (1986), 847-860.
- [34] Clumpner, J. A., R. E. Hershey and W. L. Hoffmann: MINT-an in-line melt purification system. Light Metals TMS (1986), 815-819.
- [35] Neff, D.V. and E. P. Stankiewicz: The MULTICASTTM filtration system. Light Metals TMS (1986), 821-828.
- [36] Shu, D., B. Sun, K. Li, T. Li, Z. Xu and Y. Zhou: Continuous separations of non-metallic inclusions from aluminium melt using alternating magnetic field. Materials Letters 55 (2202), 322-326.
- [37] Nagai, Y., S. Sakai, Y. Saito, N. Matuda and G. Horikoshi: Mass spectrometric of observation of vacuum treated oxygen free copper. Vacuum 41 (1990), No. 7-9, 2100-2102.
- [38] Norikazu, I., M. Yoshiharu, Y. Kenji and I. Takuro: High vacuum apparatus member and vacuum apparatus - EP 0 688 879 A1. Europäisches Patentamt, Düsseldorf, 1995.
- [39] Bebbber, H., J. Fähnrich and G. Philipps: Method and device for the continuous degassing of molten metals - US 6,454,829 B1. United States Patent, 2002.
- [40] Worner, H. K. and V. Balwyn: Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Desoxydierung, Entschwefelung und Entgasung von Metallen und Legierungen - DE 1 800 959. Deutsches Patentamt, 1969.

- [41] Boehmert, A., W. Hoormann, H. Goddar, E. Müller, W. Stahlberg, W. Kuntze und L. Kouker: Verfahren zum kontinuierlichen Gießen eines Metalls und Gerät zum kontinuierlichen Gießen des Metalls - DE 36 09 900 A1. Deutsches Patentamt, 1986.
- [42] Chia, E. H. and J. G. Weber: Purifying molten copper - GB 2 057 904 A. United States Patent, 1980.
- [43] Chia, E. H. and J. G. Weber: Verfahren zum kontinuierlichen Gießen von Kupfer - DE 30 30 738 A1. Deutsches Patentamt, 1981.
- [44] Haruhiko, A., K. Yutaka, N. Keiji, M. Tutomu, H. Kazumassa, W. Kenji, W. Masahiko and H. Yoshiaki: Installation for producing continuously cast low-oxygen copper ingots - EP 1 127 946 A2. European Patent Office, 2001.
- [45] Meseha, G. M. and F. Tavares: Molten metal degasing and filtering apparatus - US 5,733,500. United States Patent, 1998.
- [46] Development of ladle refining technique for molten copper. 1998.
- [47] Marin, T., A. Warczok, G. Riveros, T. Utigard and G. Plascencia: Kinetics of liquid reduction with graphite. Canadian Metallurgical Quarterly 46 (2007), No. 4, 379-384
- [48] Golonk, J.: Über neue Herstellungsverfahren von sauerstofffreiem Kupfer.
- [49] Montanwerke Brixlegg AG: Qualitätskatalog. 2001.
- [50] XSR Hochleistungsrotor. Mitteilung der Foseco GmbH.
- [51] Der FDU XSR Rotor: Eine Neuentwicklung in der FDU Entgasungstechnik. Mitteilung der Foseco GmbH.
- [52] Rotorenvergleich. Mitteilung der Foseco GmbH.
- [53] Mitteilung der Zaklady Magnezytowe "Ropczyce" S. A.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Verfahrensablauf Sekundärkupferherstellung [1]	2
Abbildung 2-2:	Durchschnittliche Chargenzusammensetzung beim Schachtofen [6]	3
Abbildung 2-3:	Chargenzusammensetzung im Konverter [2]	4
Abbildung 2-4:	Chargenzusammensetzung im Flammofen [6]	5
Abbildung 3-1:	Widerstandserhöhung des Kupfers durch Beimengungen [17]	8
Abbildung 3-2:	Einfluss der Temperatur und des Phosphors auf elektrische Leitfähigkeit (linkes Bild) und Wärmeleitfähigkeit (rechtes Bild) [15]	9
Abbildung 3-3:	Dichte der Kupfer-Phosphor-Legierungen in Abhängigkeit vom Phosphorgehalt [17]	9
Abbildung 3-4:	Wasserstofflöslichkeit in Kupfer (nach Sieverts) [17]	11
Abbildung 3-5:	Gleichgewicht zwischen Sauer- und Wasserstoffgehalt in der Schmelze in Abhängigkeit vom Druck (linkes Bild) und von der Temperatur (rechtes Bild) [15]	11
Abbildung 4-1:	Prinzip des HA-Rotors [24]	14
Abbildung 4-2:	Erzeugte Strömung eines HA-Rotors aus einem Simulationsmodell [24]	15
Abbildung 4-3:	Rotordesign [25]	15
Abbildung 4-4:	Erzeugter Strömungsverlauf mit dem Rotor [25]	16
Abbildung 4-5:	Produktionskette bei Câbleries de Lens [26]	16
Abbildung 4-6:	Darstellung des ALPUR™-Rotor [26]	17
Abbildung 4-7:	Darstellung des ALPUR™ S1000 [26]	17
Abbildung 4-8:	Schematische Darstellung des ALPur-Rotors [28]	18
Abbildung 4-9:	Schematische Darstellung des RDU-Rotors [29]	19
Abbildung 4-10:	Schematische Darstellung der Multi-Rotor ACD-Einheit [30]	20
Abbildung 4-11:	Schematische Darstellung des SNIF-Systems [32]	20
Abbildung 4-12:	Spinddüse des SNIF [32]	21
Abbildung 4-13:	Schematische Darstellung der Tiefbettfiltration [33]	21
Abbildung 4-14:	Schematische Darstellung eines Tiefbettfilters (links), Keramik-Schaum-Filter (mitte) und eines Rohrfilters (rechts) [33]	22
Abbildung 4-15:	Schematische Darstellung des MINT-Systems [34]	22
Abbildung 4-16:	Schematische Darstellung des MCFS-System (links) und der Multicast Filter Assembly (rechts) [35]	23
Abbildung 4-17:	Darstellung der elektromagnetischen Vorrichtung bei einem kontinuierlichen Prozess [36]	24
Abbildung 4-18:	Querschnitt der Abscheidungsrohre mit runden (a) bzw. quadratischen Kanälen (b) [36]	24
Abbildung 4-19:	Darstellung des mit Vakuum behandelten Kupfers (links) und des herkömmlich abgegossenen Kupfers (rechts) [37]	25
Abbildung 4-20:	Schematische Darstellung der Vakuumeinheit [38]	26
Abbildung 4-21:	Schematische Darstellung der Apparatur [39]	28
Abbildung 4-22:	Schematische Darstellung der Entgasungskammer [40]	29
Abbildung 4-23:	Darstellung der Entgasungskammer von vorne (links) und Grundriss (rechts) [40]	30
Abbildung 4-24:	Schematische Darstellung der Apparatur [41]	31
Abbildung 4-25:	Verlauf des Wasserstoffs gegenüber der Zeit bei 66,66 Pa (0,5 Torr) (links) und dem Druck bei 5 Minuten (rechts) [41]	31
Abbildung 4-26:	Schematische Darstellung des Verteilers [42], [43]	32
Abbildung 4-27:	Schematische Darstellung der Anlage [44]	33
Abbildung 4-28:	Detaillierte Darstellung der Gießmulde von oben (links) und seitlich (rechts) [44]	34
Abbildung 4-29:	Schematische Darstellung der Anlage [45]	35

Abbildung 4-30:	Sauerstoffverlauf (links) und weitere Gasverläufe (rechts) durch Abdeckung mit Holzkohle [46]	36
Abbildung 4-31:	Darstellung verschiedener Rotoren, unter anderem der Shear blade Rotor (rechts) [46].....	36
Abbildung 4-32:	Effekt durch das Einblasen von Argon [46]	37
Abbildung 4-33:	Schematische Darstellung der Versuchsanlage [47].....	38
Abbildung 4-34:	Darstellung des CO- und CO ₂ -Verlaufs während des Einsatzes der Graphitstäbe bei 1473 K [47]	38
Abbildung 4-35:	Darstellung des Sauerstoffverlaufs im flüssigen Kupfer bei 1473 K während des Einsatzes der Graphitstäbe (links) und der Graphitplatten (rechts) [47]	39
Abbildung 4-36:	Schematische Darstellung des Gießverfahrens von sauerstofffreien, mit Lithium desoxidiertem Kupfer [48].....	40
Abbildung 4-37:	Die Makrostruktur eines mit Lithium desoxidierten Kupferblechs Ø 130 [48]	40
Abbildung 4-38:	Schematische Darstellung der Anlage [48]	41
Abbildung 4-39:	Schematische Darstellung der Einrichtung für halbkontinuierliches Gießen von sauerstofffreien Kupfer [48]	44
Abbildung 4-40:	Schematische Darstellung des Rußofens und des Kristallisators mit dem Graphitrohr (a) und dem thoroidalen Gasrohr (b) [48]	45
Abbildung 4-41:	Makrostruktur eines Kupferblockes mit einem Durchmesser von 180 mm [48]	46
Abbildung 4-42:	Darstellung eines FDU-XSR-Rotor [50]	47
Abbildung 4-43:	Vergleich von 350 U/min (linkes Bild) und 500 U/min (rechtes Bild) [52]	48
Abbildung 4-44:	Maße eines Spülkegels in mm [53].....	49
Abbildung 5-1:	Vereinfachte Vorderansicht eines Gießofens.....	50
Abbildung 5-2:	Grundriss eines Gießofens	52
Abbildung 5-3:	Darstellung einer „guten Kathode“	56
Abbildung 5-4:	Darstellung einer „schlechten Kathode“	56
Abbildung 5-5:	Seitenansicht der Probenentnahme aus der Kokille.....	58
Abbildung 5-6:	Montage und Anbringung des Impellers	61
Abbildung 5-7:	Rotor und Schaft kurz nach Einsatz und Veränderung des Querschnitts	62
Abbildung 5-8:	Lage der Spülsteine am Gießofen	77
Abbildung 6-1:	Anbringung der Lanze und Ummantelung	83

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Chemische Analyse Kathode [1].....	6
Tabelle 4-1:	Vergleich der unterschiedlichen Behandlungsarten [38]	27
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der ersten Versuchsserie über Schmelzen von Kupferkathoden in Schamottetiegeln bei verschiedenen Drücken (links) und empirisch festgelegte Abhängigkeit der Oxidation des geschmolzenen Kupfers vom Druck und bei 1230 °C (rechts) [48]	42
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der zweiten Versuchsserie über Schmelzen von Kupferkathoden in Graphit-Schamottetiegeln [48]	42
Tabelle 4-4:	Ergebnisse der dritten Versuchsserie über die Desoxidation von oxidiertem Kupfer unter Vakuum [48]	43
Tabelle 4-5:	Ergebnisse der vierten Versuchsserie über die Desoxidation oxidierten Kupfers mit Kohle unter Vakuum [48]	43
Tabelle 4-6:	Die Gießgeschwindigkeit von Kupfersträngen in mm/min [48]	45
Tabelle 5-1:	Kupferqualitäten [49]	51
Tabelle 5-2:	Darstellung der Versuchsreihe ohne Spülbehandlung	53
Tabelle 5-3:	Dichtewerte der beiden Versuche 2626/24 und 2626/25	59
Tabelle 5-4:	Darstellung der Vorversuche mit dem Impeller	63
Tabelle 5-5:	Darstellung der Versuchsreihe mit dem Impeller	66
Tabelle 5-6:	Definition der Bereichsklassen für den Impeller	66
Tabelle 5-7:	Darstellung der Parametereinstellungen.....	69
Tabelle 5-8:	Darstellung der Zugabe des Calciumhexaborids	69
Tabelle 5-9:	Darstellung des Temperaturverlaufs.....	72
Tabelle 5-10:	Zeitpunkt der Probenentnahme in Abhängigkeit des Nachsetzens der Kathoden.....	74
Tabelle 5-11:	Darstellung der Parametereinstellung.....	75
Tabelle 5-12:	Darstellung des Temperaturverlaufs.....	76
Tabelle 5-13:	Darstellung der Versuchsreihe mit Bodenspüler	78
Tabelle 5-14:	Definition der Bereichsklassen für die Bodenspüler.....	78
Tabelle 6-1:	Vereinfachte Darstellung der Verläufe und Häufigkeiten während des Abgusses ohne Spülbehandlung	81
Tabelle 6-2:	Vereinfachte Darstellung der Verläufe und Häufigkeiten während des Impellereinsatzes	84
Tabelle 6-3:	Darstellung der Gasgehalte durch den Impellereinsatz.....	84
Tabelle 6-4:	Vereinfachte Darstellung der Verläufe während des Abgusses mit den Bodenspülern	86
Tabelle 6-5:	Darstellung der Gasgehalte bei unterschiedlichem Kathodeneinsatz und Einsatz der Bodenspüler.....	87
Tabelle 6-6:	Prozentuelle Aufteilung der Dichtewerte in Abhängigkeit der Abgussmethode	92
Tabelle 6-7:	Vergleich der Behandlungsmethoden bei OFN-Qualität	95
Tabelle 6-8:	Vergleich der Behandlungsmethoden bei P 40-Qualität.....	95
Tabelle 6-9:	Mittelwerte der verschiedenen Gießmethoden	95
Tabelle 12-1:	Auflistung der Messergebnisse.....	110
Tabelle 12-2:	Auflistung der Messergebnisse.....	114
Tabelle 12-3:	Auflistung der Messergebnisse.....	115
Tabelle 12-4:	Auflistung der Messergebnisse.....	118
Tabelle 12-5:	Auflistung der Messergebnisse.....	146
Tabelle 12-6:	Auflistung der Messergebnisse.....	147
Tabelle 12-7:	Auflistung der Messergebnisse.....	148
Tabelle 12-8:	Auflistung der Messergebnisse.....	149
Tabelle 12-9:	Darstellung der Bereichseinteilung bei OFN-Qualität.....	222
Tabelle 12-10:	Darstellung der prozentuellen Aufteilung bei OFN-Qualität.....	222

Tabelle 12-11: Darstellung der Bereichseinteilung bei P 40-Qualität.....	223
Tabelle 12-12: Darstellung der prozentuellen Aufteilung bei P 40-Qualität.....	223

11. Diagrammverzeichnis

Diagramm 4.1:	Entgasung, gemessen mit ALSPEK-H-Wasserstoffsensoren [51].....	48
Diagramm 5.1:	Versuch 3303/13; Abguss.....	54
Diagramm 5.2:	Versuch 3306/5; Abguss.....	54
Diagramm 5.3:	Versuch 1629/4; Abguss.....	55
Diagramm 5.4:	Verlauf des Wasserstoffes vor und nach dem Chargieren bei einer Temperatur von 1160 °C	57
Diagramm 5.5:	Versuch 2626/24; Abguss.....	59
Diagramm 5.6:	Versuch 2626/25; Abguss.....	60
Diagramm 5.7:	Versuch 2469/13; Impellereinsatz.....	63
Diagramm 5.8:	Versuch 2469/13; Abguss.....	64
Diagramm 5.9:	Versuch 3469/6; Impellereinsatz.....	64
Diagramm 5.10:	Versuch 3469/6; Abguss.....	65
Diagramm 5.11:	Versuch N1; Impellereinsatzes	67
Diagramm 5.12:	Versuch N1; Abguss.....	67
Diagramm 5.13:	Versuch M7; Impellereinsatz.....	68
Diagramm 5.14:	Versuch M7; Abguss	68
Diagramm 5.15:	Versuch 1520/5; Impellereinsatz.....	70
Diagramm 5.16:	Versuch 1520/5; Abguss.....	70
Diagramm 5.17:	Versuch 2532/37; Kohle- und Impellereinsatz.....	72
Diagramm 5.18:	Versuch 2532/37; Abguss.....	73
Diagramm 5.19:	Versuch 2535/45; Kohle- und Impellereinsatz.....	73
Diagramm 5.20:	Versuch 2535/45; Abguss.....	74
Diagramm 5.21:	Versuch 1623/1; Impellereinsatz.....	75
Diagramm 5.22:	Versuch 1623/1; Abguss.....	76
Diagramm 5.23:	Versuch B9; Abguss	79
Diagramm 5.24:	Versuch B10; Abguss	79
Diagramm 5.25:	Versuch B12; Abguss	80
Diagramm 5.26:	Versuch B14; Abguss	80
Diagramm 6.1:	Einfluss von guten und schlechten Kathoden	87
Diagramm 6.2:	OFN-Qualität, gute Kathoden	89
Diagramm 6.3:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	91
Diagramm 6.4:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	93
Diagramm 6.5:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	93
Diagramm 6.6:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	94
Diagramm 12.1:	Versuch 3303/10; Abguss.....	111
Diagramm 12.2:	Versuch 3303/11; Abguss.....	111
Diagramm 12.3:	Versuch 3303/12; Abguss.....	112
Diagramm 12.4:	Versuch 3303/14; Abguss.....	112
Diagramm 12.5:	Versuch 3303/15; Abguss.....	113
Diagramm 12.6:	Versuch 3306/6; Abguss.....	113
Diagramm 12.7:	Versuch 2469/9; Impellereinsatz.....	116
Diagramm 12.8:	Versuch 2469/9; Abguss.....	116
Diagramm 12.9:	Versuch 3469/4; Impellereinsatz.....	117
Diagramm 12.10:	Versuch 3469/4; Abguss.....	117
Diagramm 12.11:	Versuch M1; Impellereinsatz P 40-Qualität	122
Diagramm 12.12:	Versuch M1; Abguss P 40-Qualität	122
Diagramm 12.13:	Versuch N2; Impellereinsatz OFN-Qualität	123
Diagramm 12.14:	Versuch N2; Abguss OFN-Qualität	123
Diagramm 12.15:	Versuch M2; Impellereinsatz P 40-Qualität	124
Diagramm 12.16:	Versuch M2; Abguss P 40-Qualität	124
Diagramm 12.17:	Versuch M3; Impellereinsatz OFN-Qualität.....	125
Diagramm 12.18:	Versuch M3; Abguss OFN-Qualität.....	125

Diagramm 12.19:	Versuch N3; Impellereinsatz P 40-Qualität	126
Diagramm 12.20:	Versuch N3; Abguss P 40-Qualität	126
Diagramm 12.21:	Versuch M4; Impellereinsatz OFN-Qualität.....	127
Diagramm 12.22:	Versuch M4; Abguss OFN-Qualität.....	127
Diagramm 12.23:	Versuch N4; Impellereinsatz P 40-Qualität	128
Diagramm 12.24:	Versuch N4; Abguss P 40-Qualität	128
Diagramm 12.25:	Versuch N5; Impellereinsatz OFN-Qualität	129
Diagramm 12.26:	Versuch N5; Abguss OFN-Qualität	129
Diagramm 12.27:	Versuch M5; Impellereinsatz P 40-Qualität	130
Diagramm 12.28:	Versuch M5; Abguss P 40-Qualität.....	130
Diagramm 12.29:	Versuch M6; Impellereinsatz OFN-Qualität.....	131
Diagramm 12.30:	Versuch M6; Abguss OFN-Qualität.....	131
Diagramm 12.31:	Versuch N6; Impellereinsatz P 40-Qualität	132
Diagramm 12.32:	Versuch N6; Abguss P 40-Qualität	132
Diagramm 12.33:	Versuch N7; Impellereinsatz P 40-Qualität	133
Diagramm 12.34:	Versuch N7; Abguss P 40-Qualität	133
Diagramm 12.35:	Versuch N8; Impellereinsatz OFN-Qualität	134
Diagramm 12.36:	Versuch N8; Abguss OFN-Qualität	134
Diagramm 12.37:	Versuch M8; Impellereinsatz P 40-Qualität	135
Diagramm 12.38:	Versuch M8; Abguss P 40-Qualität.....	135
Diagramm 12.39:	Versuch M9; Impellereinsatz OFN-Qualität.....	136
Diagramm 12.40:	Versuch M9; Abguss OFN-Qualität.....	136
Diagramm 12.41:	Versuch N9; Impellereinsatz P 40-Qualität	137
Diagramm 12.42:	Versuch N9; Abguss P 40-Qualität	137
Diagramm 12.43:	Versuch N10; Impellereinsatz OFN-Qualität	138
Diagramm 12.44:	Versuch N10; Abguss OFN-Qualität	138
Diagramm 12.45:	Versuch M10; Impellereinsatz P 40-Qualität	139
Diagramm 12.46:	Versuch M10; Abguss P 40-Qualität	139
Diagramm 12.47:	Versuch M11; Impellereinsatz OFN-Qualität.....	140
Diagramm 12.48:	Versuch M11; Abguss OFN-Qualität.....	140
Diagramm 12.49:	Versuch N11; Impellereinsatz P 40-Qualität	141
Diagramm 12.50:	Versuch N11; Abguss P 40-Qualität	141
Diagramm 12.51:	Versuch M12; Impellereinsatz OFN-Qualität.....	142
Diagramm 12.52:	Versuch M12; Abguss OFN-Qualität.....	142
Diagramm 12.53:	Versuch N12; Impellereinsatz P 40-Qualität	143
Diagramm 12.54:	Versuch N12; Abguss P 40-Qualität	143
Diagramm 12.55:	Versuch N13; Impellereinsatz OFN-Qualität	144
Diagramm 12.56:	Versuch N13; Abguss OFN-Qualität	144
Diagramm 12.57:	Versuch M13; Impellereinsatz P 40-Qualität	145
Diagramm 12.58:	Versuch M13; Abguss P 40-Qualität.....	145
Diagramm 12.59:	Versuch B1; Abguss P 40- Qualität	152
Diagramm 12.60:	Versuch B2; Abguss P 40-Qualität	152
Diagramm 12.61:	Versuch B3; Abguss P 40-Qualität	153
Diagramm 12.62:	Versuch B4; Abguss P 40-Qualität	153
Diagramm 12.63:	Versuch B5; Abguss P 40-Qualität	154
Diagramm 12.64:	Versuch B6; Abguss P 40-Qualität	154
Diagramm 12.65:	Versuch B7; Abguss P 40-Qualität	155
Diagramm 12.66:	Versuch B8; Abguss P 40-Qualität	155
Diagramm 12.67:	Versuch B11; Abguss OFN-Qualität	156
Diagramm 12.68:	Versuch B13; Abguss OFN-Qualität	156
Diagramm 12.69:	Versuch B15; Abguss OFN-Qualität	157
Diagramm 12.70:	Versuch B16; Abguss OFN-Qualität	157
Diagramm 12.71:	Versuch B17; Abguss OFN-Qualität	158
Diagramm 12.72:	Versuch B18; Abguss OFN-Qualität	158
Diagramm 12.73:	Versuch B19; Abguss OFN-Qualität	159
Diagramm 12.74:	Versuch B20; Abguss OFN-Qualität	159

Diagramm 12.75:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	160
Diagramm 12.76:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen.....	160
Diagramm 12.77:	OFN-Qualität, gute Kathoden	161
Diagramm 12.78:	OFN-Qualität, gute Kathoden	161
Diagramm 12.79:	OFN-Qualität, gute Kathoden	162
Diagramm 12.80:	OFN-Qualität, gute Kathoden	162
Diagramm 12.81:	OFN-Qualität, gute Kathoden	163
Diagramm 12.82:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	163
Diagramm 12.83:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	164
Diagramm 12.84:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	164
Diagramm 12.85:	OFN-Qualität, gute Kathoden	165
Diagramm 12.86:	OFN-Qualität, gute Kathoden	165
Diagramm 12.87:	OFN-Qualität, gute Kathoden	166
Diagramm 12.88:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	166
Diagramm 12.89:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	167
Diagramm 12.90:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	167
Diagramm 12.91:	OFN-Qualität, gute Kathoden	168
Diagramm 12.92:	OFN-Qualität, gute Kathoden	168
Diagramm 12.93:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	169
Diagramm 12.94:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	169
Diagramm 12.95:	OFN-Qualität, gute Kathoden	170
Diagramm 12.96:	OFN-Qualität, gute Kathoden	170
Diagramm 12.97:	OFN-Qualität, gute Kathoden	171
Diagramm 12.98:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	171
Diagramm 12.99:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	172
Diagramm 12.100:	OFN-Qualität, schlechte Kathoden	172
Diagramm 12.101:	OFN-Qualität, schlechte Kathoden	173
Diagramm 12.102:	OFN-Qualität, schlechte Kathoden	173
Diagramm 12.103:	P 40-Qualität, schlechte Kathoden	174
Diagramm 12.104:	P 40-Qualität, schlechte Kathoden	174
Diagramm 12.105:	OFN-Qualität, gute Kathoden	175
Diagramm 12.106:	OFN-Qualität, gute Kathoden	175
Diagramm 12.107:	OFN-Qualität, gute Kathoden	176
Diagramm 12.108:	OFN-Qualität, gute Kathoden	176
Diagramm 12.109:	OFN-Qualität, gute Kathoden	177
Diagramm 12.110:	OFN-Qualität, gute Kathoden	177
Diagramm 12.111:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	178
Diagramm 12.112:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	178
Diagramm 12.113:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	179
Diagramm 12.114:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	179
Diagramm 12.115:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	180
Diagramm 12.116:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	180
Diagramm 12.117:	OFN-Qualität, gute Kathoden	181
Diagramm 12.118:	OFN-Qualität, gute Kathoden	181
Diagramm 12.119:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	182
Diagramm 12.120:	P 40-Qualität, gute Kathoden.....	182
Diagramm 12.121:	OFN-Qualität, schlechte Kathoden	183
Diagramm 12.122:	OFN-Qualität, schlechte Kathoden	183
Diagramm 12.123:	P 40-Qualität, schlechte Kathoden	184
Diagramm 12.124:	P 40-Qualität, schlechte Kathoden	184
Diagramm 12.125:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	185
Diagramm 12.126:	OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	185
Diagramm 12.127:	OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	186
Diagramm 12.128:	OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur.....	186
Diagramm 12.129:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	187
Diagramm 12.130:	OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	187

Diagramm 12.131:	OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	188
Diagramm 12.132:	OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur	188
Diagramm 12.133:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	189
Diagramm 12.134:	P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	189
Diagramm 12.135:	P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	190
Diagramm 12.136:	P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	190
Diagramm 12.137:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	191
Diagramm 12.138:	OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	191
Diagramm 12.139:	OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	192
Diagramm 12.140:	OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	192
Diagramm 12.141:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	193
Diagramm 12.142:	OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	193
Diagramm 12.143:	OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	194
Diagramm 12.144:	OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur	194
Diagramm 12.145:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	195
Diagramm 12.146:	P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	195
Diagramm 12.147:	P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	196
Diagramm 12.148:	P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	196
Diagramm 12.149:	OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	197
Diagramm 12.150:	OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	197
Diagramm 12.151:	OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	198
Diagramm 12.152:	OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	198
Diagramm 12.153:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	199
Diagramm 12.154:	OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	199
Diagramm 12.155:	OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	200
Diagramm 12.156:	OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur	200
Diagramm 12.157:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	201
Diagramm 12.158:	P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	201
Diagramm 12.159:	P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	202
Diagramm 12.160:	P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	202
Diagramm 12.161:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	203
Diagramm 12.162:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	203
Diagramm 12.163:	OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	204
Diagramm 12.164:	OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	204
Diagramm 12.165:	OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	205
Diagramm 12.166:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	205
Diagramm 12.167:	OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	206
Diagramm 12.168:	OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	206
Diagramm 12.169:	OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur	207
Diagramm 12.170:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	207
Diagramm 12.171:	P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	208
Diagramm 12.172:	P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	208
Diagramm 12.173:	P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	209
Diagramm 12.174:	OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	210
Diagramm 12.175:	OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	210
Diagramm 12.176:	OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	211
Diagramm 12.177:	OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	211
Diagramm 12.178:	OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	212
Diagramm 12.179:	OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	212
Diagramm 12.180:	OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur	213
Diagramm 12.181:	P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen	213
Diagramm 12.182:	P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	214
Diagramm 12.183:	P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	214
Diagramm 12.184:	P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	215
Diagramm 12.185:	OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	216
Diagramm 12.186:	OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	216

Diagramm 12.187: OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur.....	217
Diagramm 12.188: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen	217
Diagramm 12.189: OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	218
Diagramm 12.190: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	218
Diagramm 12.191: OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur	219
Diagramm 12.192: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen.....	219
Diagramm 12.193: P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur	220
Diagramm 12.194: P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur	220
Diagramm 12.195: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur	221

12. Anhang

12.1 Versuchsreihe für das Abgießen ohne Spülbehandlung

Tabelle 12-1: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Gießlänge [m]
3303/10	Ofenprobe	0,80	5,70	11,6	-	2
3303/10	Ofenprobe	0,66	7,20	10,2	-	5
3303/10	Saugkokille	2,23	-	-	-	6,5
3303/11	Ofenprobe	0,88	7,30	9,6	-	0
3303/11	Ofenprobe	0,88	5,40	11,6	-	2
3303/11	Ofenprobe	0,66	4,80	10,3	-	5
3303/11	Saugkokille	2,84	-	-	-	6,5
3303/12	Ofenprobe	1,14	5,70	9,7	-	0
3303/12	Ofenprobe	0,50	5,20	8,2	-	2
3303/12	Ofenprobe	0,29	6,90	9,2	-	5
3303/12	Saugkokille	2,34	-	-	-	6,5
3303/13	Ofenprobe	1,08	7,60	13,6	-	0
3303/13	Ofenprobe	1,19	4,60	14,2	-	2
3303/13	Ofenprobe	0,56	7,70	12,4	-	5
3303/13	Saugkokille	4,01	-	-	-	6,5
3303/14	Ofenprobe	0,48	7,00	9,2	-	0
3303/14	Ofenprobe	0,84	4,40	10,1	-	2
3303/14	Ofenprobe	0,74	6,20	11,2	-	5
3303/14	Saugkokille	1,43	-	-	-	6,5
3303/15	Ofenprobe	0,12	4,10	12,2	-	0
3303/15	Ofenprobe	0,38	4,10	13	-	2
3303/15	Ofenprobe	0,29	5,00	12,8	-	5
3303/15	Saugkokille	3,31	-	-	-	6,5
3306/5	Ofenprobe	0,88	5,90	9,1	-	0
3306/5	Ofenprobe	0,73	7,20	12,2	-	2
3306/5	Ofenprobe	0,50	7,80	12,8	-	5
3306/5	Saugkokille	1,57	-	-	-	6,5
3306/6	Ofenprobe	0,28	21,80	17,3	-	0
3306/6	Ofenprobe	0,53	9,70	11,1	-	2
3306/6	Ofenprobe	0,23	9,60	11,4	-	5
3306/6	Saugkokille	2,58	-	-	-	6,5
1629/4	Ofenprobe	0,49	11,45	12,5	-	0
1629/4	Ofenprobe	1,00	9,00	13,5	-	3
1629/4	Ofenprobe	1,07	6,20	13,7	-	5
1629/4	Saugkokille	6,79	-	-	-	5
1629/4	Bolzenprobe	1,02	4,20	13,7	8,94	6,5
1629/4	Bolzenprobe	1,00	4,60	14,5	8,927	3,5
1629/4	Bolzenprobe	0,84	4,90	10,6	8,92	0

Versuch 3303/10 (Diagramm 12.1) kann erst ab einer Abgusslänge von zwei Metern dargestellt werden, da die Probenentnahme beim anfänglichen Abguss eine Fehlmessung war. Dieser Versuch ist nicht in der Häufigkeitsberechnung in Tabelle 6-1 enthalten.

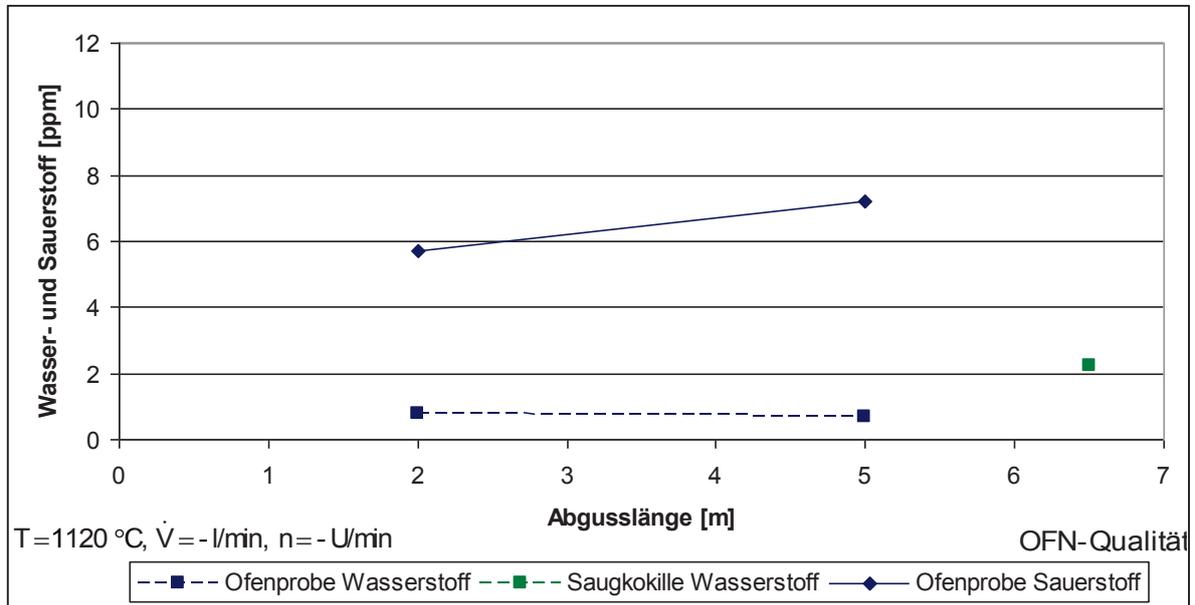


Diagramm 12.1: Versuch 3303/10; Abguss

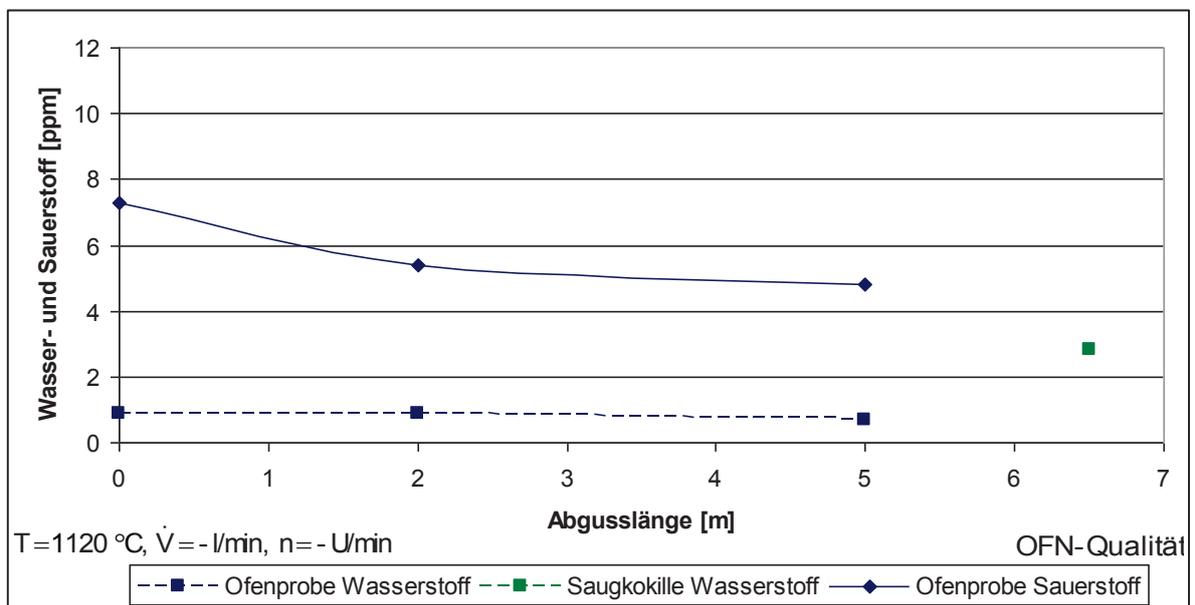


Diagramm 12.2: Versuch 3303/11; Abguss

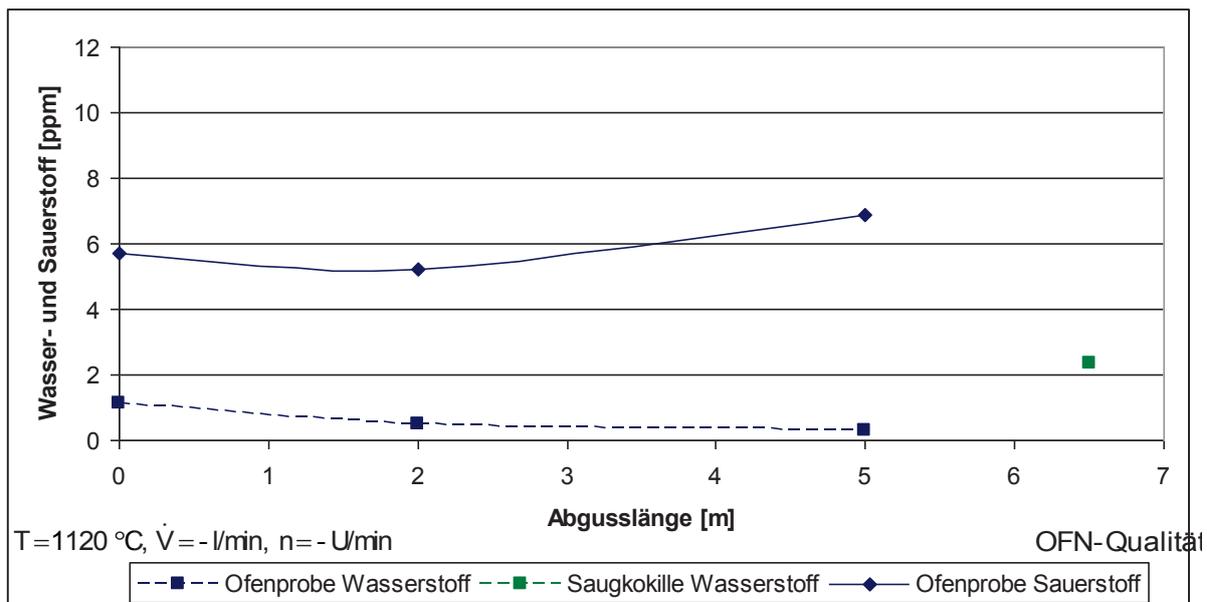


Diagramm 12.3: Versuch 3303/12; Abguss

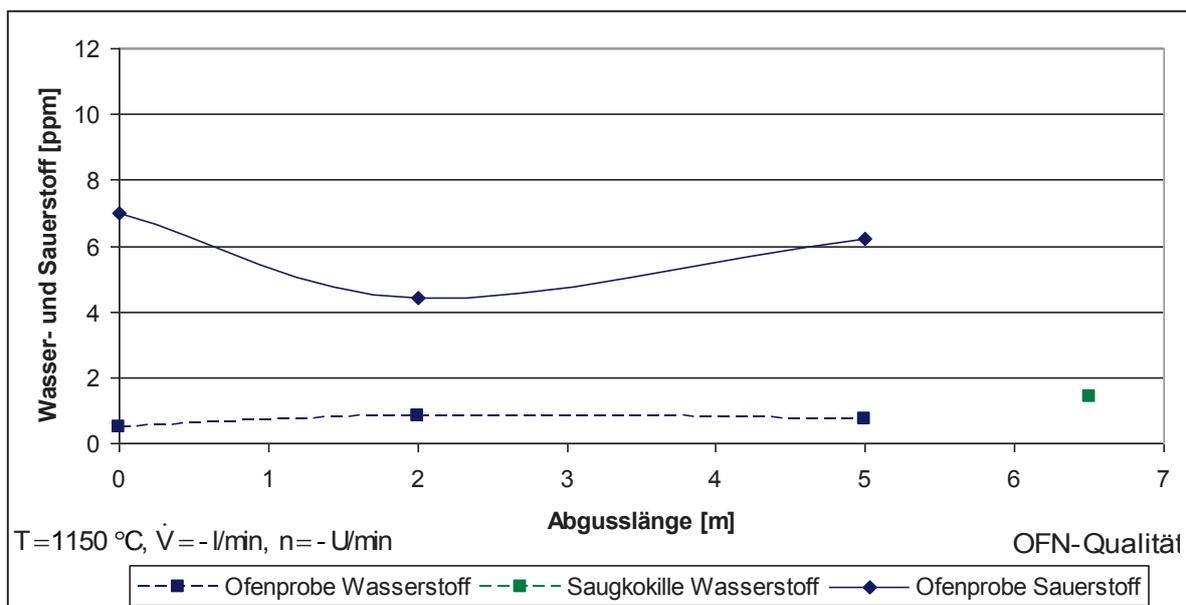


Diagramm 12.4: Versuch 3303/14; Abguss

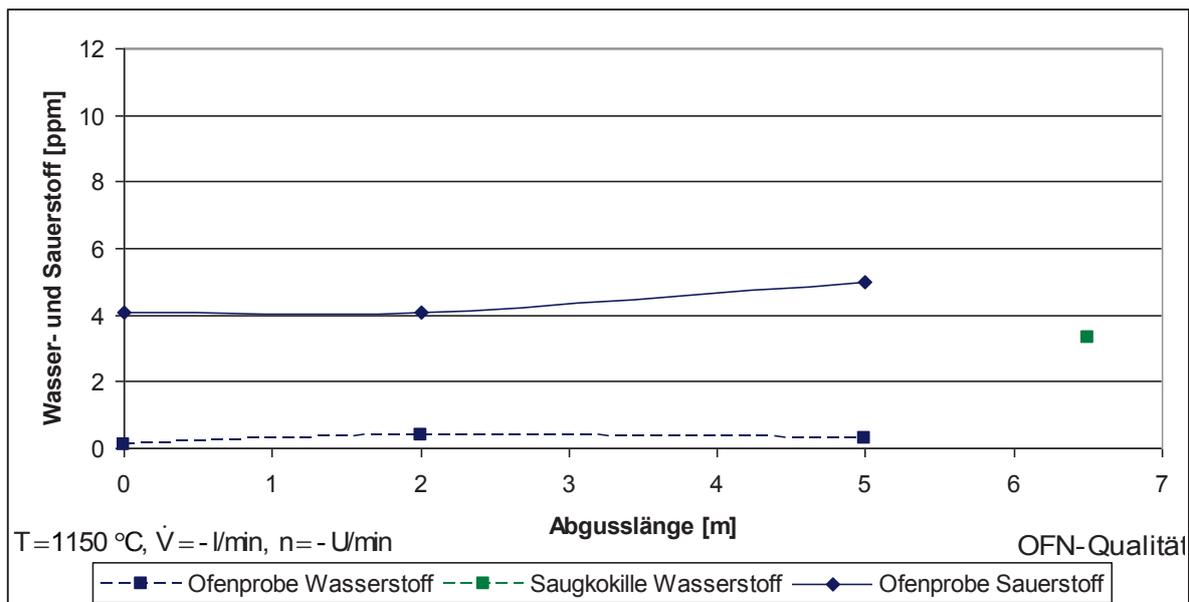


Diagramm 12.5: Versuch 3303/15; Abguss

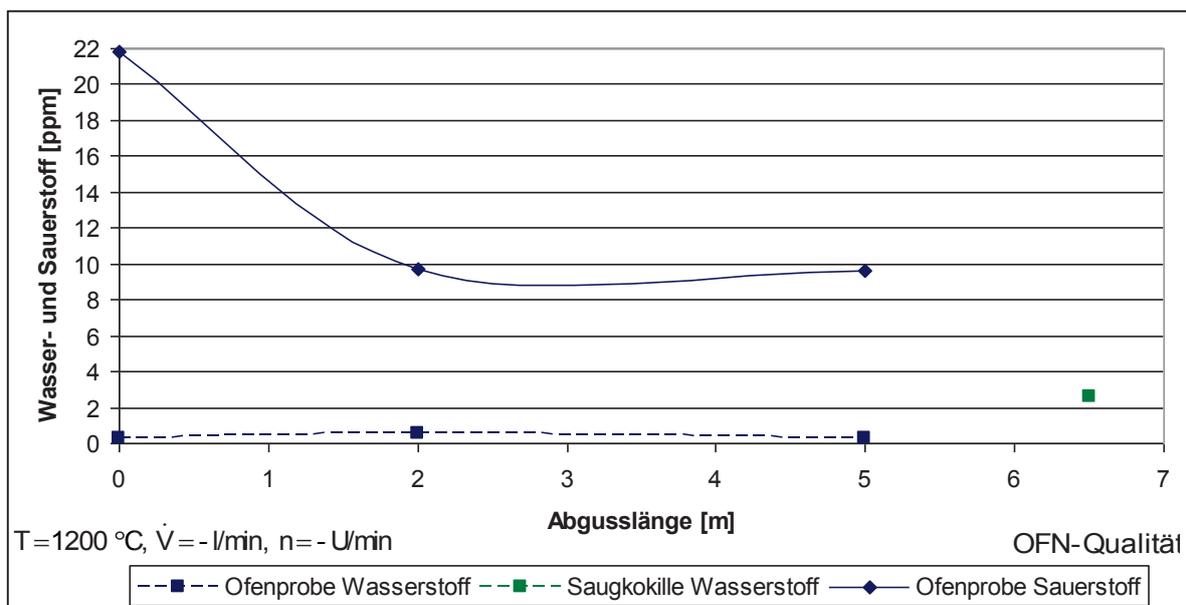


Diagramm 12.6: Versuch 3306/6; Abguss

12.1.1 Einzelversuche zur Bestimmung des Gasgehalts in der Kokille

Tabelle 12-2: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Gießlänge [m]
2626/24	Ofenprobe	0,07	180,00	12,8	-	0
2626/24	Ofenprobe	0,23	15,50	13,8	-	0,68
2626/24	Ofenprobe	0,64	6,90	12,8	-	7
2626/24	Bolzenprobe	0,65	5,70	13,1	8,94	6,5
2626/24	Bolzenprobe	0,66	5,40	16,3	8,93	3,5
2626/24	Bolzenprobe	0,72	7,00	15,6	8,93	0,5
2626/25	Ofenprobe	0,05	110,00	11,5	-	0
2626/25	Ofenprobe	0,97	11,10	13,1	-	0,7
2626/25	Ofenprobe	0,54	6,10	16,2	-	7
2626/25	Bolzenprobe	0,68	4,70	15,5	8,94	6,5
2626/25	Bolzenprobe	0,77	6,90	18,8	8,93	3,5
2626/25	Bolzenprobe	0,74	9,10	12,8	8,72	0,5

12.2 Versuche für das Abgießen mit dem Impeller

12.2.1 Vorversuche mit dem Impeller

Tabelle 12-3: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Rotor [min]	Gießlänge [m]
2469/9	Ofenprobe	0,073	306	377	-	0	-
2469/9	Ofenprobe	0,201	228	650	-	18	0
2469/9	Ofenprobe	0,159	243	372	-	-	2
2469/9	Ofenprobe	0,108	258	387	-	-	5
2469/9	Saugkokille	0,5	-	-	-	1	-
2469/9	Saugkokille	1,96	-	-	-	1	-
2469/9	Saugkokille	3,85	-	-	-	5	-
2469/9	Saugkokille	2,41	-	-	-	10	-
2469/9	Saugkokille	0,4	-	-	-	15	0
2469/9	Saugkokille	3,11	-	-	-	-	5
2469/13	Ofenprobe	0,134	331	349,2	-	0	-
2469/13	Ofenprobe	0,117	239	373	-	18	0
2469/13	Ofenprobe	0,087	182	374	-	-	3
2469/13	Ofenprobe	0,087	198	377	-	-	6
2469/13	Saugkokille	0,18	-	-	-	5	-
2469/13	Saugkokille	13,26	-	-	-	10	-
2469/13	Saugkokille	0,91	-	-	-	15	0
2469/13	Saugkokille	1,69	-	-	-	-	7
3469/4	Ofenprobe	0,905	7,2	27,5	-	0	-
3469/4	Ofenprobe	0,802	8,6	39,1	-	18	0
3469/4	Ofenprobe	0,421	5,8	37,1	-	-	4
3469/4	Ofenprobe	0,524	7,4	30,5	-	-	5
3469/4	Ofenprobe	0,664	5,5	26	-	-	6
3469/4	Saugkokille	0,5	-	-	-	0	-
3469/4	Saugkokille	2,87	-	-	-	2	-
3469/4	Saugkokille	4,31	-	-	-	5	-
3469/4	Saugkokille	2,98	-	-	-	8	-
3469/6	Ofenprobe	0,376	10,9	17,8	-	0	-
3469/6	Ofenprobe	0,942	10,5	-	-	18	0
3469/6	Ofenprobe	1,08	3,8	-	-	-	2
3469/6	Ofenprobe	0,143	5,8	28,7	-	-	5
3469/6	Saugkokille	3,7	-	-	-	1	-
3469/6	Saugkokille	0,78	-	-	-	5	-
3469/6	Saugkokille	0,52	-	-	-	10	-
3469/6	Saugkokille	4,55	-	-	-	15	0

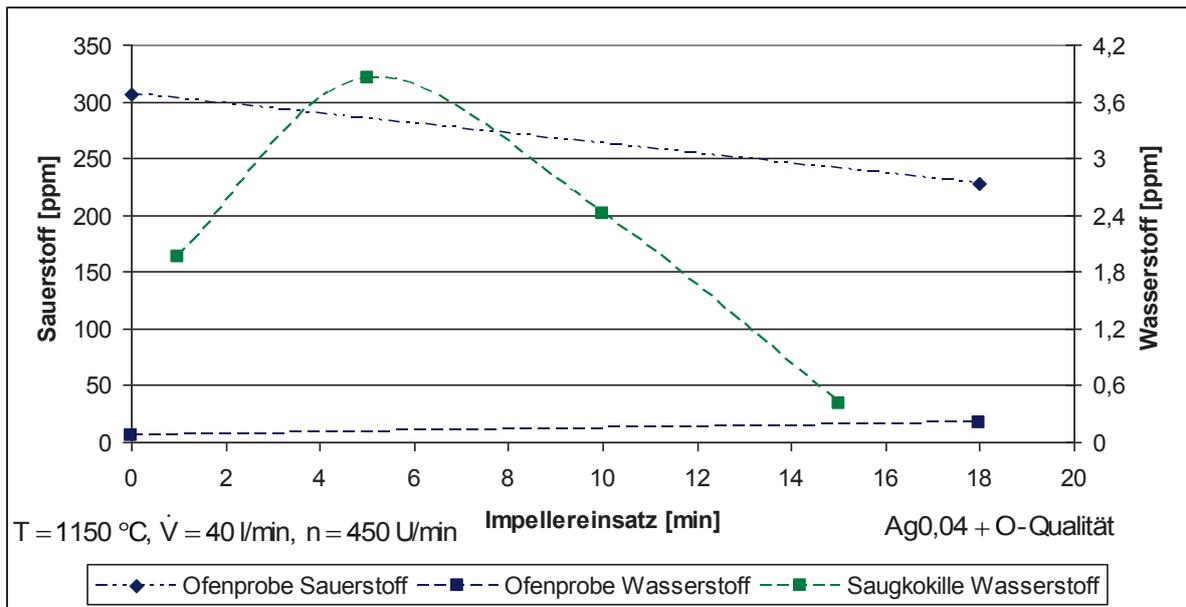


Diagramm 12.7: Versuch 2469/9; Impellereinsatz

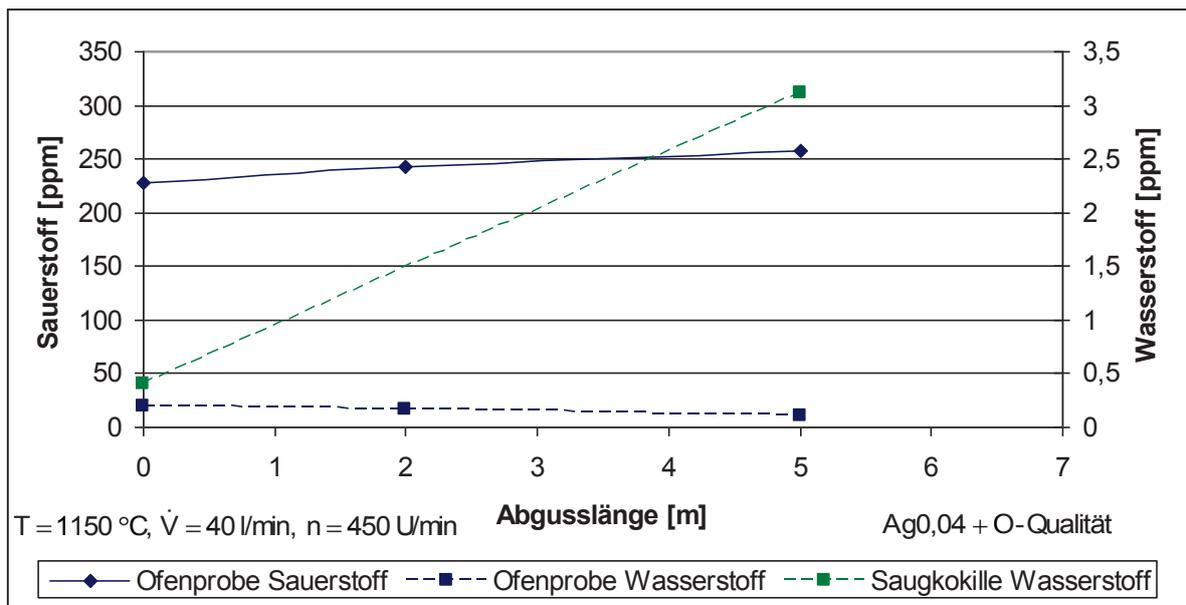


Diagramm 12.8: Versuch 2469/9; Abguss

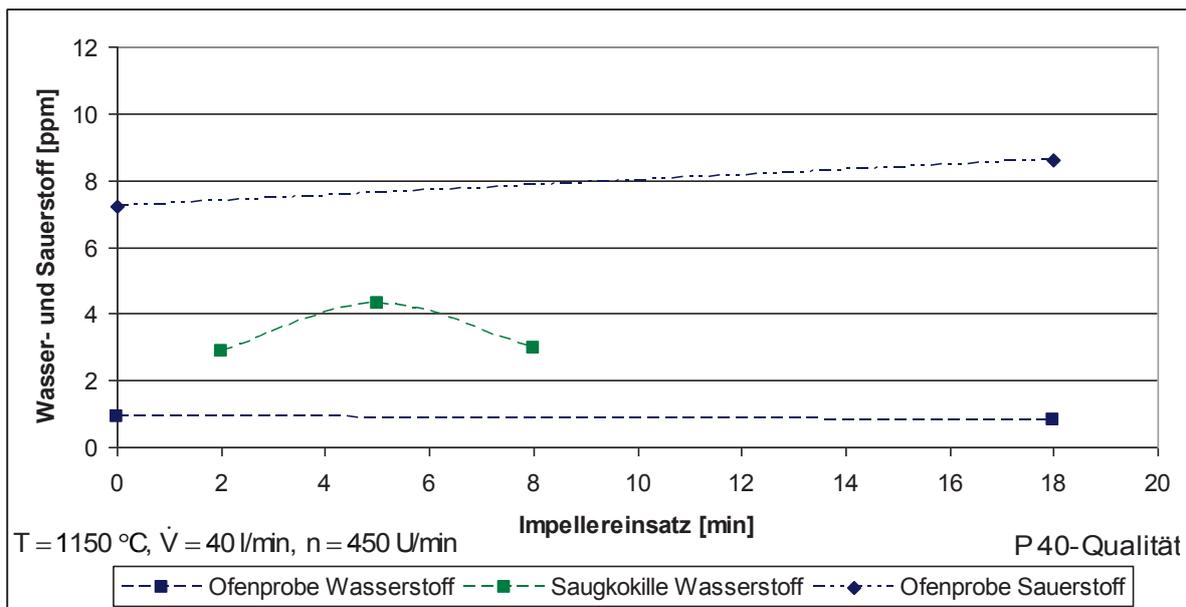


Diagramm 12.9: Versuch 3469/4; Impellereinsatz

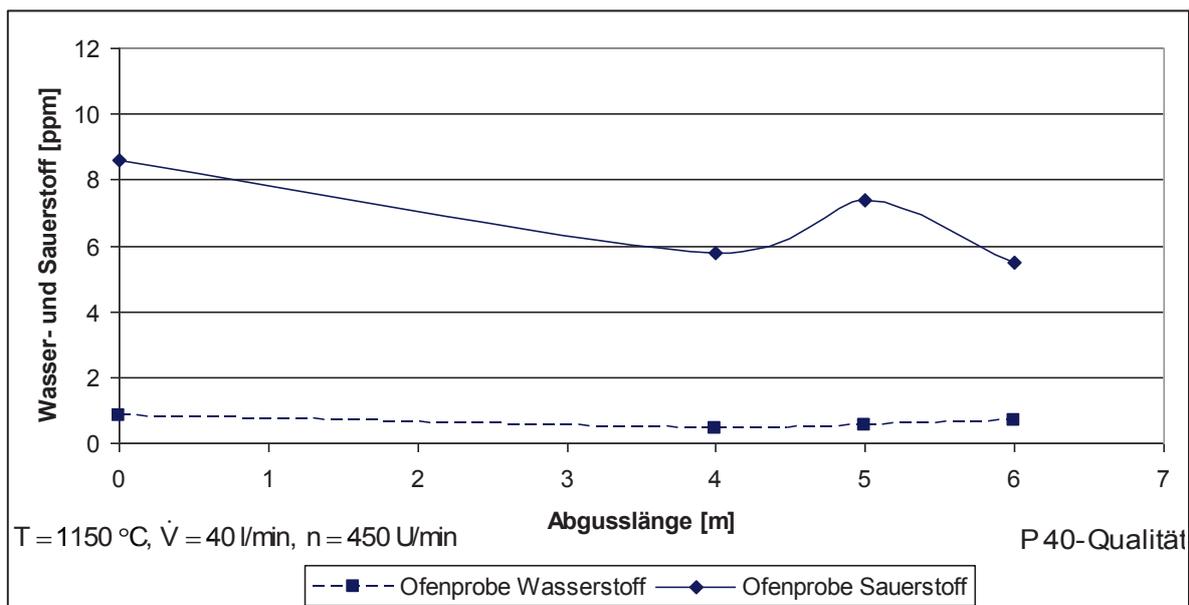


Diagramm 12.10: Versuch 3469/4; Abguss

12.2.2 Versuchsreihe mit dem Impeller

Tabelle 12-4: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Rotor [min]	Gießlänge [m]
M1	Ofenprobe	0,32	3,90	44,5	-	1	-
M1	Ofenprobe	0,18	5,40	44	-	8	-
M1	Ofenprobe	0,70	4,30	43	-	18	0
M1	Ofenprobe	0,75	4,80	33,5	-	-	3
M1	Ofenprobe	0,64	5,15	27	-	-	5
M1	Saugkokille	0,34	-	-	-	1	-
M1	Saugkokille	2,09	-	-	-	18	-
M1	Bolzenprobe	0,79	4,00	30,1	8,93	-	6,5
M1	Bolzenprobe	0,95	3,50	42,3	8,93	-	0,5
N1	Ofenprobe	0,48	5,10	18	-	1	-
N1	Ofenprobe	0,24	2,80	20,5	-	8	-
N1	Ofenprobe	0,57	4,50	18,7	-	15	0
N1	Ofenprobe	0,89	6,70	19,8	-	-	3
N1	Ofenprobe	0,38	6,10	18,7	-	-	5
N1	Saugkokille	1,46	-	-	-	1	-
N1	Saugkokille	4,92	-	-	-	15	-
N1	Bolzenprobe	0,91	4,60	17,1	8,8	-	6,5
N1	Bolzenprobe	1,07	4,10	20,1	8,85	-	0,5
M2	Ofenprobe	0,48	6,60	18,5	-	1	-
M2	Ofenprobe	0,59	3,00	19,2	-	8	-
M2	Ofenprobe	0,46	5,50	26,6	-	18	0
M2	Ofenprobe	0,61	5,00	27,3	-	-	3
M2	Ofenprobe	0,59	5,10	24,9	-	-	5
M2	Bolzenprobe	0,58	3,70	26,9	8,93	-	6,5
M2	Bolzenprobe	0,89	4,30	23,2	8,93	-	0,5
N2	Ofenprobe	0,50	5,40	20	-	1	-
N2	Ofenprobe	0,47	6,50	22,1	-	8	-
N2	Ofenprobe	0,35	4,30	24,1	-	15	0
N2	Ofenprobe	0,66	6,20	24,1	-	-	3
N2	Ofenprobe	0,88	4,20	23,8	-	-	5
N2	Saugkokille	4,69	-	-	-	1	-
N2	Saugkokille	5,86	-	-	-	2	-
N2	Saugkokille	2,62	-	-	-	15	-
N2	Bolzenprobe	1,02	2,20	21	8,5	-	6,5
N2	Bolzenprobe	1,03	6,30	19,6	8,47	-	0,5
M3	Ofenprobe	0,71	6,90	12,8	-	1	-
M3	Ofenprobe	1,00	8,50	13,3	-	8	-
M3	Ofenprobe	0,69	6,90	14	-	18	0
M3	Ofenprobe	0,55	4,90	12,4	-	-	3
M3	Ofenprobe	0,29	5,10	-	-	-	5
M3	Bolzenprobe	1,02	5,00	12,6	8,93	-	0,5
N3	Ofenprobe	0,33	9,40	24,2	-	1	-
N3	Ofenprobe	0,32	8,50	25,5	-	8	-
N3	Ofenprobe	0,29	6,50	24,7	-	15	0
N3	Ofenprobe	0,29	8,70	30,1	-	-	3

N3	Ofenprobe	0,19	6,90	32,8	-	-	5
N3	Ofenprobe	0,20	14,80	31,2	-	-	6
N3	Saugkokille	3,92	-	-	-	1	-
N3	Bolzenprobe	0,49	7,60	22	8,4	-	6,5
N3	Bolzenprobe	0,63	10,40	21,4	8,64	-	0,5
M4	Ofenprobe	0,69	4,70	18,5	-	1	-
M4	Ofenprobe	0,86	5,70	17,7	-	8	-
M4	Ofenprobe	0,53	3,70	18,2	-	18	0
M4	Ofenprobe	0,91	5,50	14,5	-	-	3
M4	Ofenprobe	0,84	3,70	14,4	-	-	5
M4	Saugkokille	2,34	-	-	-	1	-
M4	Bolzenprobe	0,71	3,10	12,8	8,93	-	6,5
M4	Bolzenprobe	0,88	5,50	15	8,92	-	0,5
N4	Ofenprobe	0,87	7,00	29,9	-	1	-
N4	Ofenprobe	0,79	4,90	30	-	8	-
N4	Ofenprobe	0,94	3,50	30	-	15	0
N4	Ofenprobe	0,51	4,10	29	-	-	3
N4	Ofenprobe	0,67	3,80	28,7	-	-	5
N4	Saugkokille	4,03	-	-	-	1	-
N4	Saugkokille	4,39	-	-	-	15	-
N4	Bolzenprobe	0,63	4,10	27,9	8,19	-	6,5
N4	Bolzenprobe	0,86	4,70	26,5	8,8	-	0,5
M5	Ofenprobe	0,82	3,20	19,4	-	1	-
M5	Ofenprobe	0,98	2,70	20,9	-	8	-
M5	Ofenprobe	0,92	2,90	27	-	18	0
M5	Ofenprobe	1,20	4,60	28,7	-	-	3
M5	Ofenprobe	0,88	5,45	28,7	-	-	5
M5	Bolzenprobe	0,99	4,30	27,3	8,92	-	6,5
M5	Bolzenprobe	1,05	2,70	24,3	8,94	-	0,5
N5	Ofenprobe	0,64	6,30	20	-	1	-
N5	Ofenprobe	0,29	11,30	19,1	-	8	-
N5	Ofenprobe	0,14	7,10	21,2	-	15	0
N5	Ofenprobe	0,48	4,70	19,5	-	-	3
N5	Ofenprobe	0,57	3,50	19,9	-	-	5
N5	Saugkokille	2,62	-	-	-	0	-
N5	Saugkokille	0,59	-	-	-	15	-
N5	Bolzenprobe	0,92	2,30	17,2	8,25	-	6,5
N5	Bolzenprobe	0,98	4,30	16,3	8,47	-	0,5
M6	Ofenprobe	0,33	6,00	13,4	-	1	-
M6	Ofenprobe	0,31	5,70	14,1	-	8	-
M6	Ofenprobe	0,50	4,00	15,2	-	18	0
M6	Ofenprobe	0,90	6,90	15	-	-	3
M6	Ofenprobe	0,61	5,70	12,9	-	-	5
M6	Saugkokille	0,78	-	-	-	1	-
M6	Bolzenprobe	0,54	4,50	13,2	8,94	-	6,5
M6	Bolzenprobe	0,86	5,20	14,9	8,94	-	0,5
N6	Ofenprobe	0,32	7,50	27,5	-	1	-
N6	Ofenprobe	0,52	7,10	29,3	-	8	-
N6	Ofenprobe	0,30	7,90	30,2	-	15	0
N6	Ofenprobe	0,31	10,50	31,8	-	-	3
N6	Ofenprobe	0,13	6,00	27,7	-	-	5
N6	Saugkokille	4,09	-	-	-	15	-

N6	Bolzenprobe	0,57	4,80	18,4	8,7	-	6,5
N6	Bolzenprobe	0,62	10,60	23,4	8,53	-	0,5
M7	Ofenprobe	1,30	8,40	10,9	-	1	-
M7	Ofenprobe	1,46	3,85	11,2	-	8	-
M7	Ofenprobe	1,04	2,90	13,6	-	18	0
M7	Ofenprobe	1,12	8,30	15,1	-	-	3
M7	Ofenprobe	1,05	5,50	13,3	-	-	5
M7	Saugkokille	1,45	-	-	-	1	-
M7	Bolzenprobe	1,29	3,90	14,3	8,92	-	0,5
N7	Ofenprobe	0,26	15,00	29,9	-	1	-
N7	Ofenprobe	0,52	3,00	29,5	-	8	-
N7	Ofenprobe	0,29	3,30	29,9	-	15	0
N7	Ofenprobe	0,24	4,20	29	-	-	3
N7	Ofenprobe	0,27	2,60	29,7	-	-	5
N7	Bolzenprobe	0,69	3,50	26,1	8,7	-	6,5
M8	Ofenprobe	0,90	6,00	29,6	-	1	-
M8	Ofenprobe	0,87	5,40	29,2	-	8	-
M8	Ofenprobe	0,80	7,25	30	-	18	0
M8	Ofenprobe	0,70	5,45	29,9	-	-	3
M8	Ofenprobe	0,82	6,65	31,3	-	-	5
M8	Saugkokille	1,73	-	-	-	18	-
N8	Ofenprobe	0,79	8,50	16,7	-	1	-
N8	Ofenprobe	0,76	3,30	17,6	-	8	-
N8	Ofenprobe	0,39	3,40	18,5	-	15	0
N8	Ofenprobe	0,58	4,80	18,6	-	-	3
N8	Ofenprobe	0,66	6,60	18,5	-	-	5
N8	Bolzenprobe	0,93	4,70	17	8,73	-	6,5
N8	Bolzenprobe	1,02	6,20	14,9	8,5	-	0,5
M9	Ofenprobe	0,81	9,10	8,6	-	1	-
M9	Ofenprobe	0,59	6,10	9	-	8	-
M9	Ofenprobe	0,81	9,40	12,6	-	18	0
M9	Ofenprobe	0,76	5,70	16,3	-	-	3
M9	Ofenprobe	0,33	5,00	17,4	-	-	5
M9	Bolzenprobe	0,84	3,75	13,1	8,94	-	6,5
M9	Bolzenprobe	1,01	7,95	10,9	8,85	-	0,5
N9	Ofenprobe	0,26	5,30	26,8	-	1	-
N9	Ofenprobe	0,23	5,80	28,5	-	8	-
N9	Ofenprobe	0,55	4,00	30	-	15	0
N9	Ofenprobe	0,33	7,40	29,9	-	-	3
N9	Ofenprobe	0,28	10,07	28,3	-	-	5
N9	Saugkokille	3,23	-	-	-	1	-
N9	Saugkokille	4,64	-	-	-	15	-
N9	Bolzenprobe	0,53	2,70	29	8,64	-	6,5
M10	Ofenprobe	1,01	12,20	19,5	-	1	-
M10	Ofenprobe	0,84	10,75	22	-	8	-
M10	Ofenprobe	0,99	6,40	27,5	-	18	0
M10	Ofenprobe	0,87	13,70	27,3	-	-	3
M10	Ofenprobe	1,03	11,40	27	-	-	5
M10	Bolzenprobe	0,71	4,70	26	8,93	-	6,5
M10	Bolzenprobe	0,76	4,60	26,5	8,93	-	0,5
N10	Ofenprobe	0,81	4,60	19,3	-	1	-
N10	Ofenprobe	0,61	3,60	20,5	-	8	-

N10	Ofenprobe	0,50	7,40	21	-	15	0
N10	Ofenprobe	0,51	4,90	19	-	-	3
N10	Ofenprobe	0,50	5,00	21,1	-	-	5
N10	Saugkokille	5,79	-	-	-	15	-
N10	Bolzenprobe	0,98	3,20	15,7	8,6	-	0,5
M11	Ofenprobe	0,09	6,20	10,3	-	1	-
M11	Ofenprobe	0,71	3,80	10,6	-	8	-
M11	Ofenprobe	0,80	3,10	11,4	-	18	0
M11	Ofenprobe	0,80	4,10	10,9	-	-	3
M11	Ofenprobe	0,45	4,20	10,9	-	-	5
M11	Bolzenprobe	0,55	2,50	9,9	8,93	-	6,5
M11	Bolzenprobe	0,82	5,40	9,2	8,93	-	0,5
N11	Ofenprobe	0,40	5,80	22,8	-	1	-
N11	Ofenprobe	0,36	4,55	22,7	-	8	-
N11	Ofenprobe	0,27	3,00	22,5	-	15	0
N11	Ofenprobe	0,45	3,00	22,1	-	-	3
N11	Ofenprobe	0,31	6,05	28,8	-	-	5
N11	Saugkokille	3,27	-	-	-	1	-
N11	Saugkokille	2,52	-	-	-	15	-
N11	Bolzenprobe	0,57	5,20	21,1	8,37	-	6,5
N11	Bolzenprobe	0,46	18,45	16,8	8,5	-	0,5
M12	Ofenprobe	0,66	6,10	6,4	-	1	-
M12	Ofenprobe	0,65	4,60	6,1	-	8	-
M12	Ofenprobe	0,62	3,70	11,9	-	18	0
M12	Ofenprobe	0,68	5,00	13,4	-	-	3
M12	Ofenprobe	0,73	5,40	13,1	-	-	6
M12	Saugkokille	1,11	-	-	-	1	-
M12	Bolzenprobe	0,61	4,60	16,2	8,94	-	6,5
M12	Bolzenprobe	0,91	7,40	11,4	8,9	-	0,5
N12	Ofenprobe	0,29	3,00	29,7	-	1	-
N12	Ofenprobe	0,22	3,30	28,9	-	8	-
N12	Ofenprobe	0,51	8,90	28,9	-	15	0
N12	Ofenprobe	0,48	5,50	29,3	-	-	3
N12	Ofenprobe	0,53	3,30	25	-	-	6
N12	Saugkokille	2,05	-	-	-	1	-
N12	Saugkokille	4,18	-	-	-	15	-
N12	Bolzenprobe	0,71	4,60	29,9	8,82	-	6,5
N12	Bolzenprobe	0,75	7,10	25,1	8,67	-	0,5
M13	Ofenprobe	0,62	6,60	14,8	-	1	-
M13	Ofenprobe	0,64	4,60	15,9	-	8	-
M13	Ofenprobe	0,72	6,60	17	-	17	0
M13	Ofenprobe	0,60	6,60	24,5	-	-	3
M13	Ofenprobe	0,40	8,80	22,9	-	-	5
M13	Bolzenprobe	0,82	3,00	15,2	8,93	-	6,5
M13	Bolzenprobe	0,80	4,10	17,4	8,94	-	3,5
M13	Bolzenprobe	1,04	4,40	20,9	8,94	-	0,5
N13	Ofenprobe	1,15	6,10	20,4	-	1	-
N13	Ofenprobe	1,06	4,90	21,5	-	8	-
N13	Ofenprobe	0,95	6,00	20,9	-	17	0
N13	Ofenprobe	0,83	6,10	18,5	-	-	3
N13	Ofenprobe	0,59	6,00	16,2	-	-	5
N13	Saugkokille	2,71	-	-	-	1	-

N13	Saugkokille	6,32	-	-	-	17	-
N13	Bolzenprobe	0,84	5,20	24,1	8,93	-	6,5
N13	Bolzenprobe	0,69	5,50	24,5	8,94	-	0,5

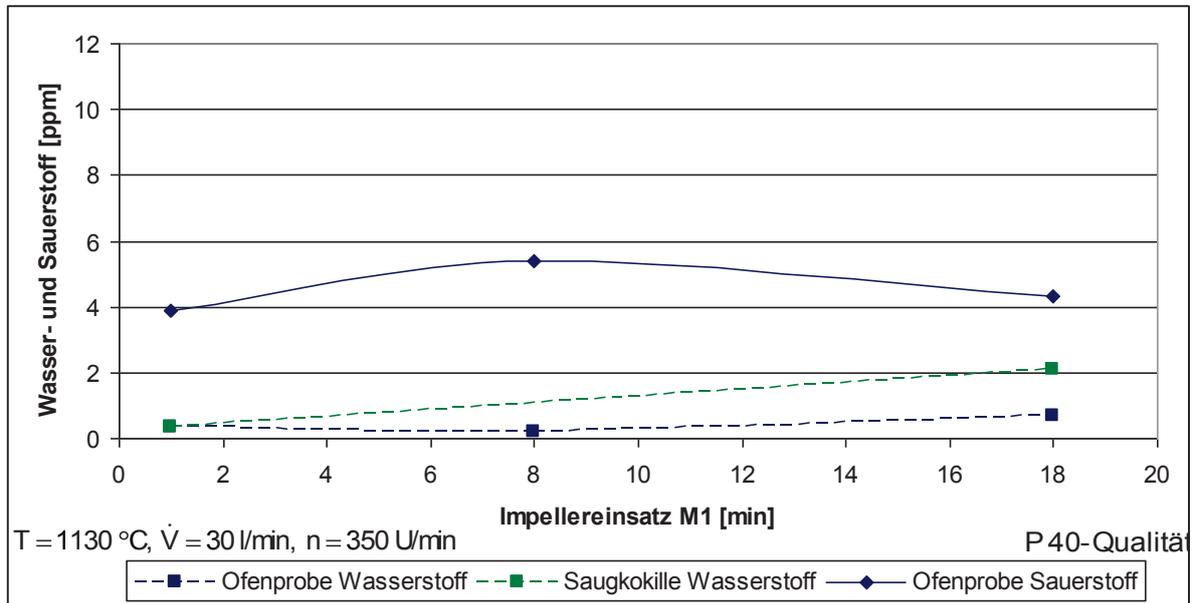


Diagramm 12.11: Versuch M1; Impellereinsatz P 40-Qualität

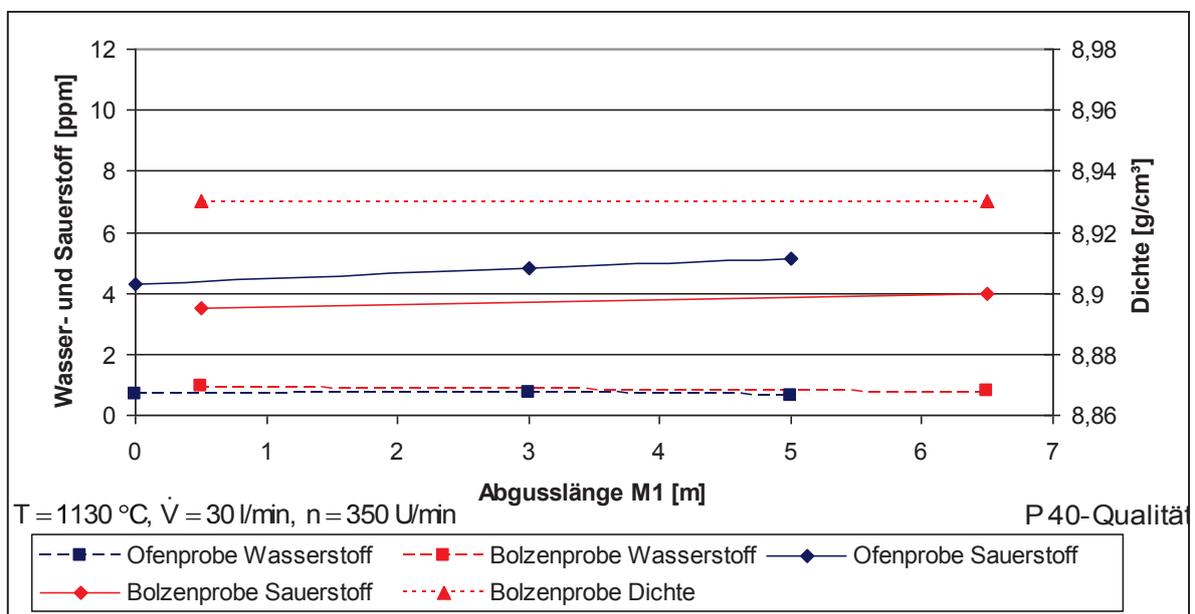


Diagramm 12.12: Versuch M1; Abguss P 40-Qualität

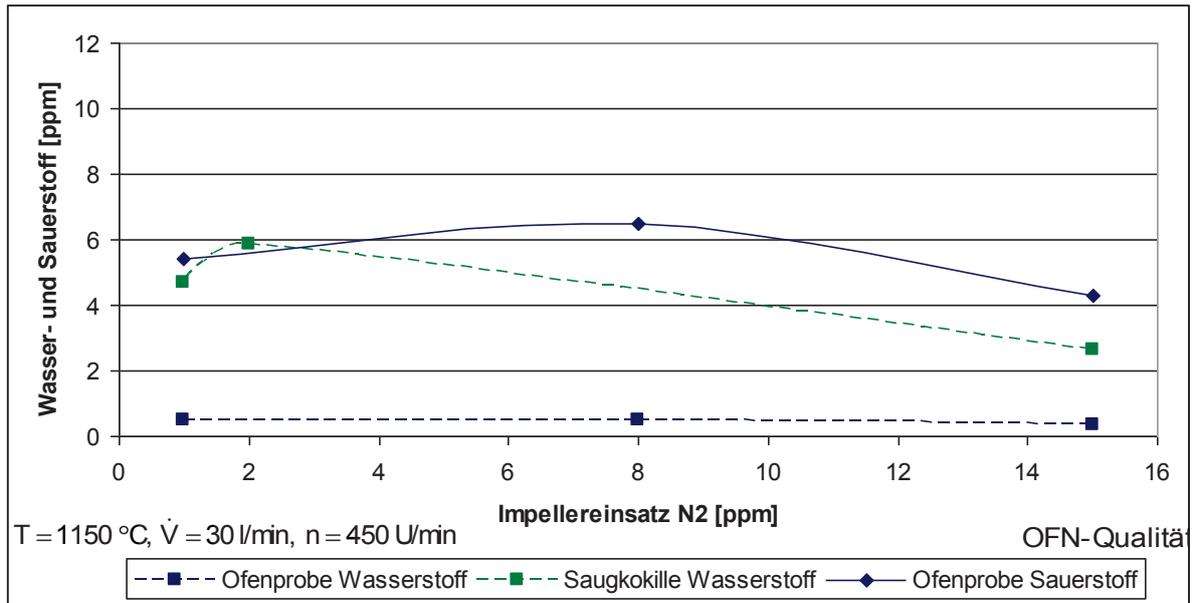


Diagramm 12.13: Versuch N2; Impellereinsatz OFN-Qualität

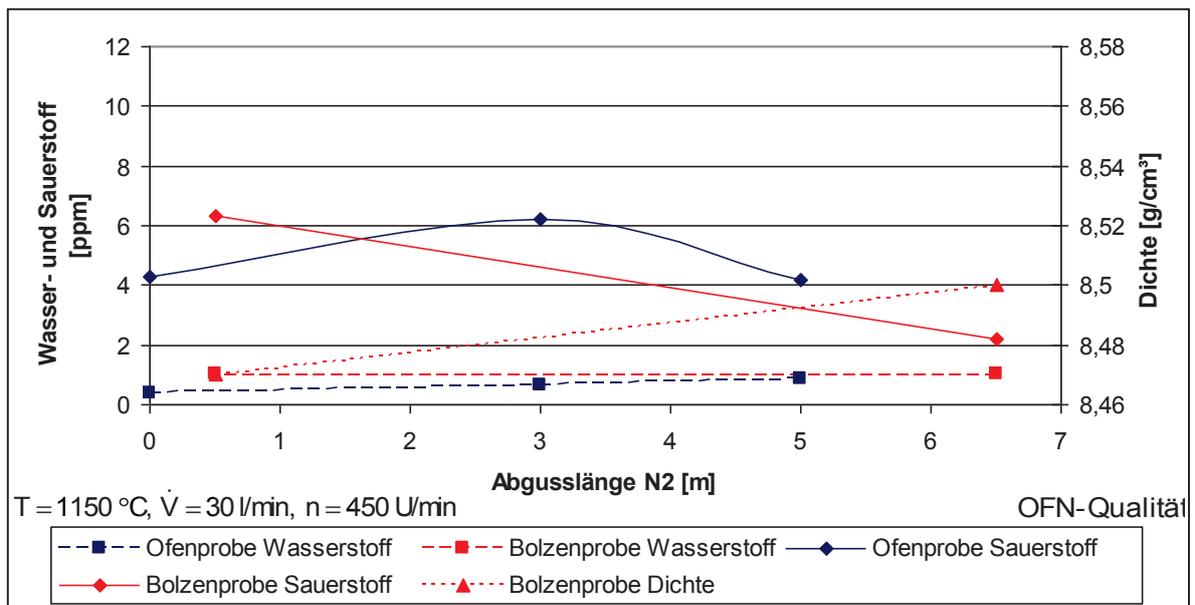


Diagramm 12.14: Versuch N2; Abguss OFN-Qualität

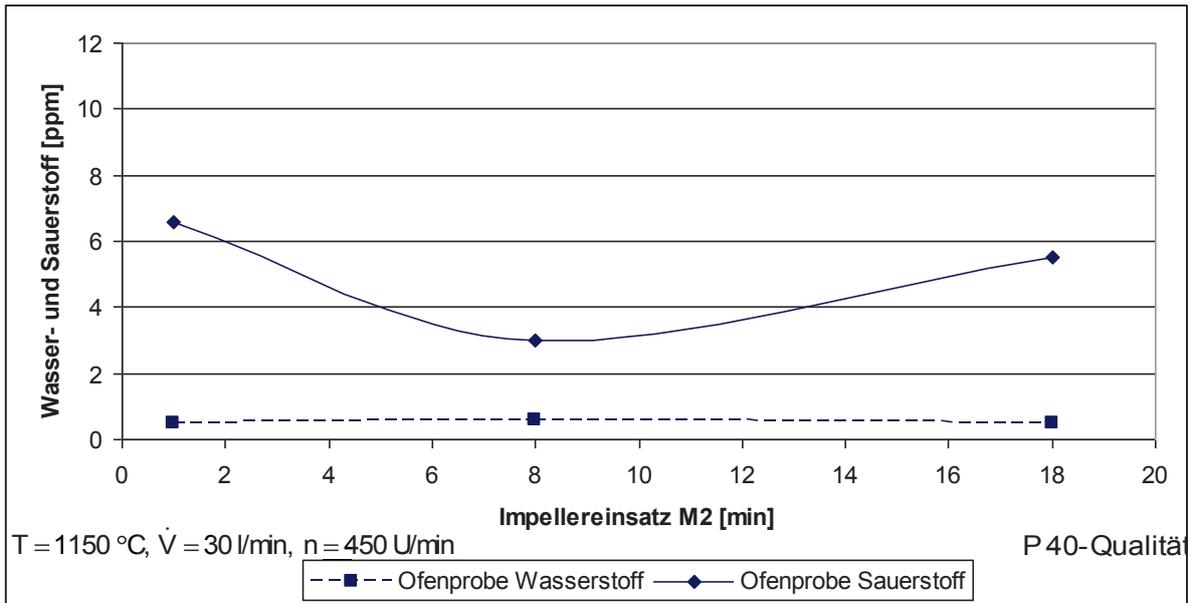


Diagramm 12.15: Versuch M2; Impellereinsatz P 40-Qualität

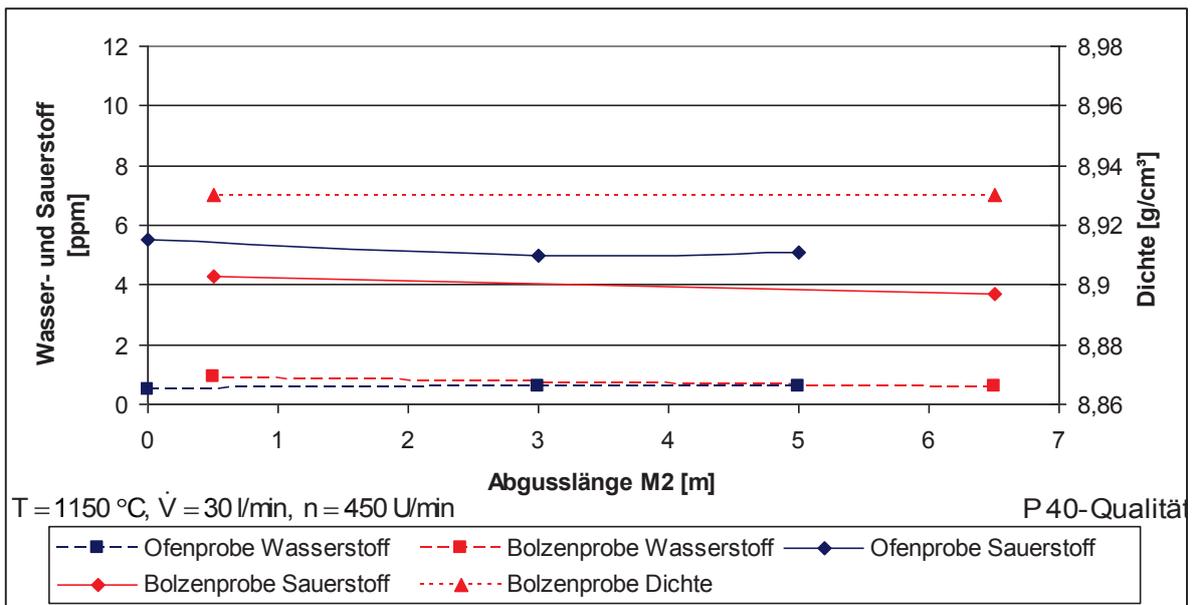


Diagramm 12.16: Versuch M2; Abguss P 40-Qualität

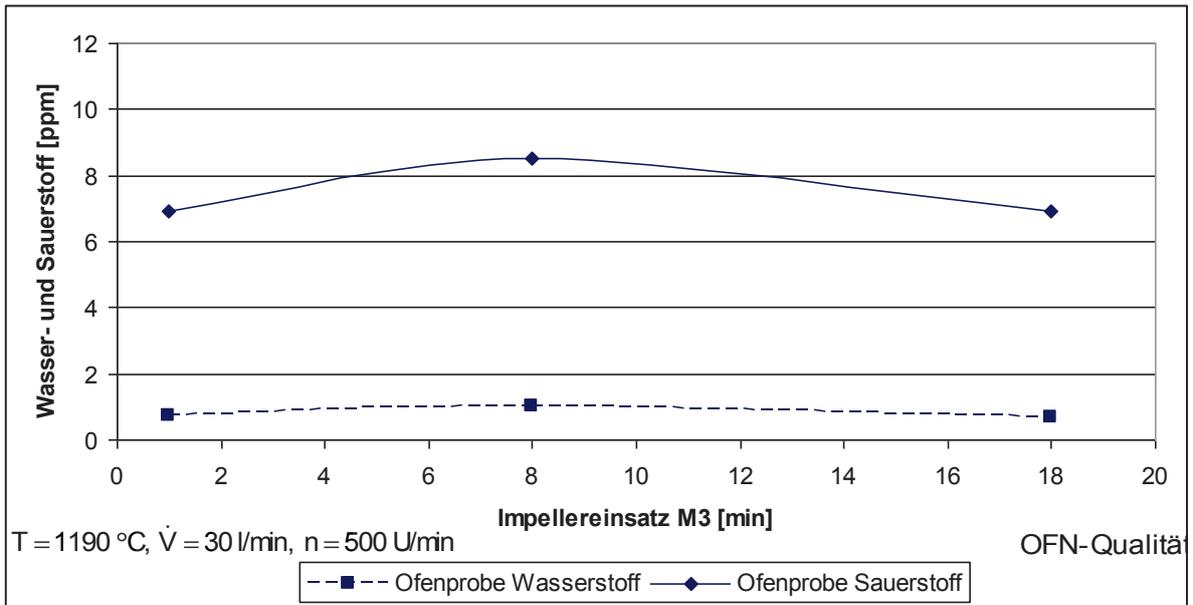


Diagramm 12.17: Versuch M3; Impellereinsatz OFN-Qualität

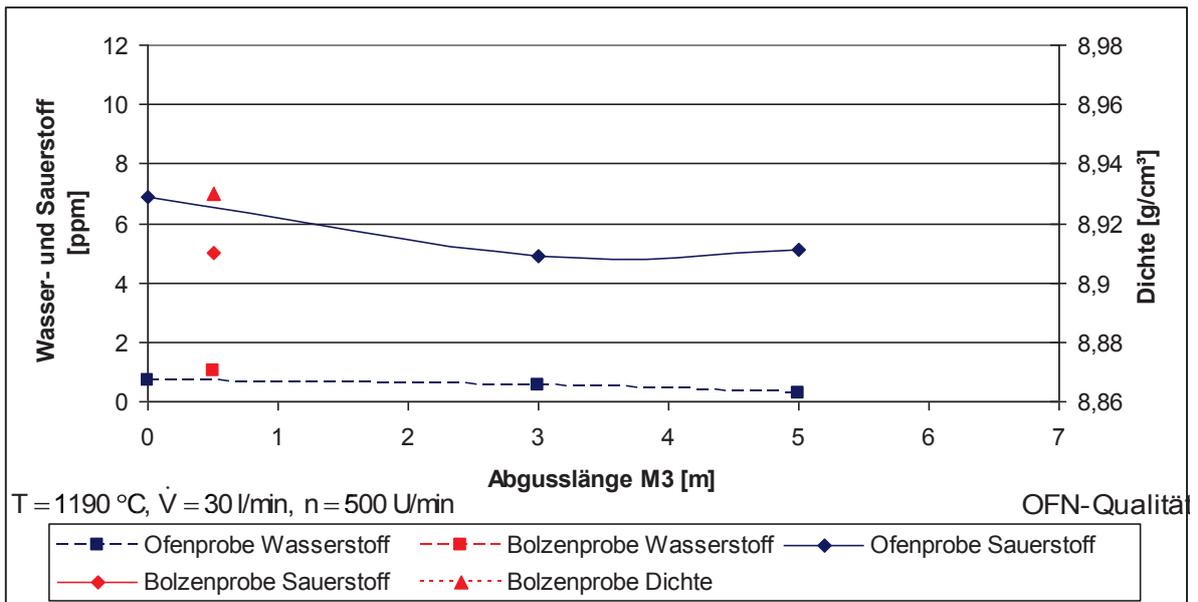


Diagramm 12.18: Versuch M3; Abguss OFN-Qualität

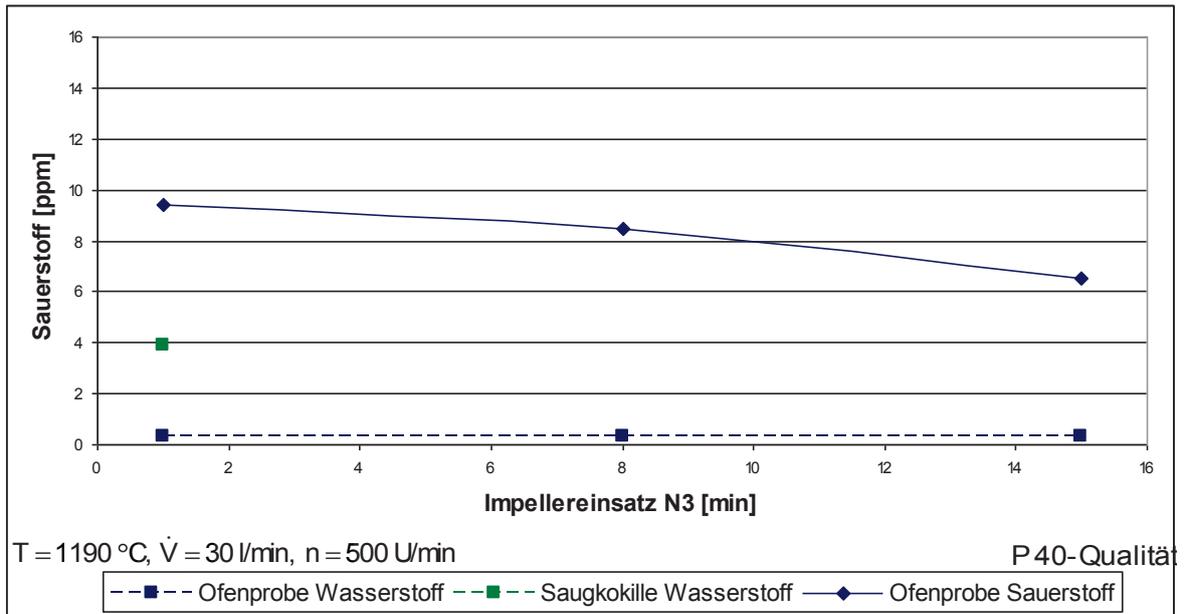


Diagramm 12.19: Versuch N3; Impellereinsatz P 40-Qualität

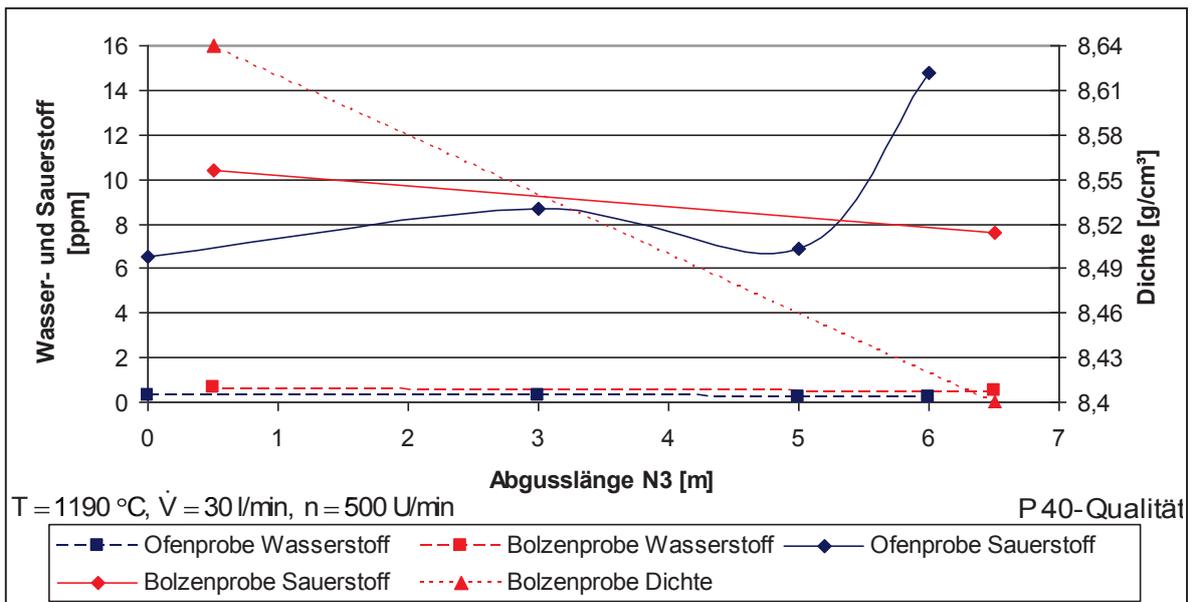


Diagramm 12.20: Versuch N3; Abguss P 40-Qualität

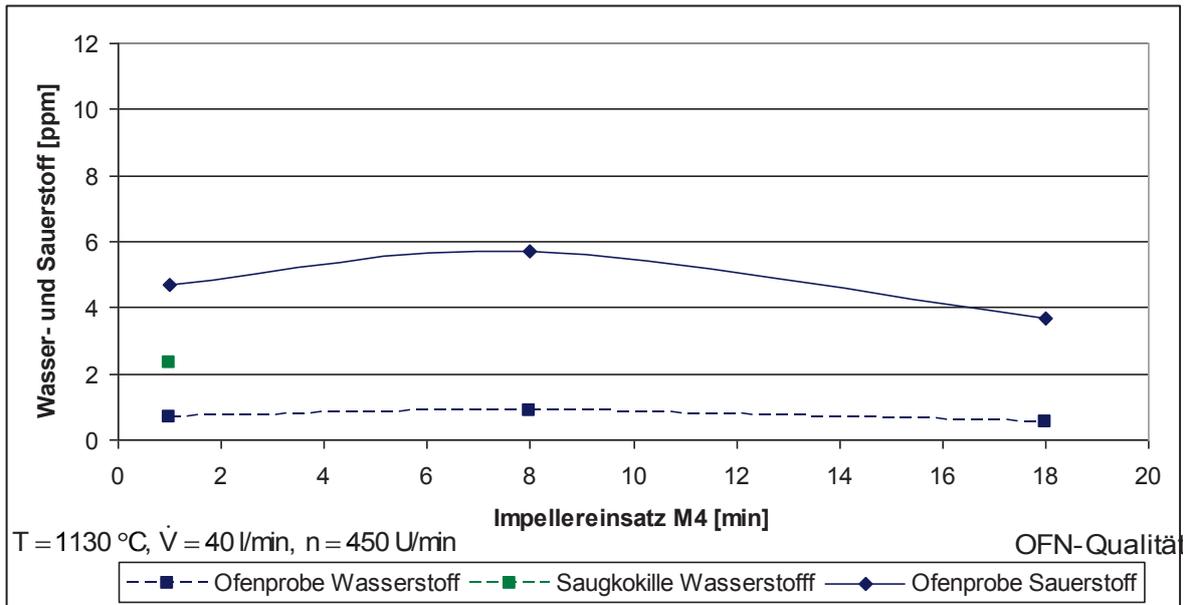


Diagramm 12.21: Versuch M4; Impellereinsatz OFN-Qualität

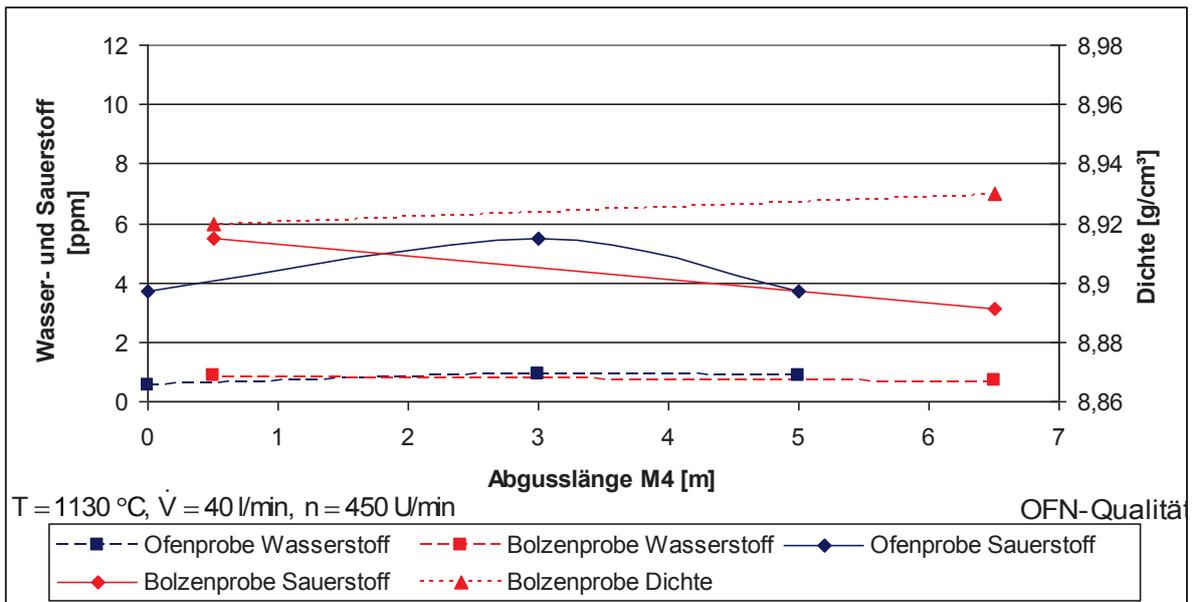


Diagramm 12.22: Versuch M4; Abguss OFN-Qualität

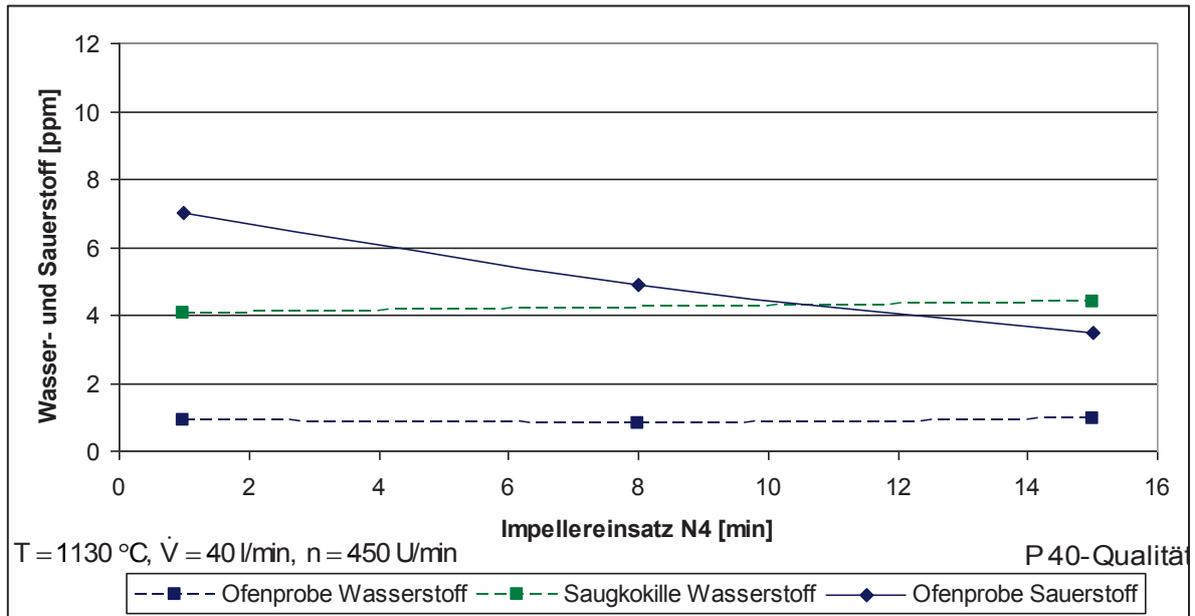


Diagramm 12.23: Versuch N4; Impellereinsatz P 40-Qualität

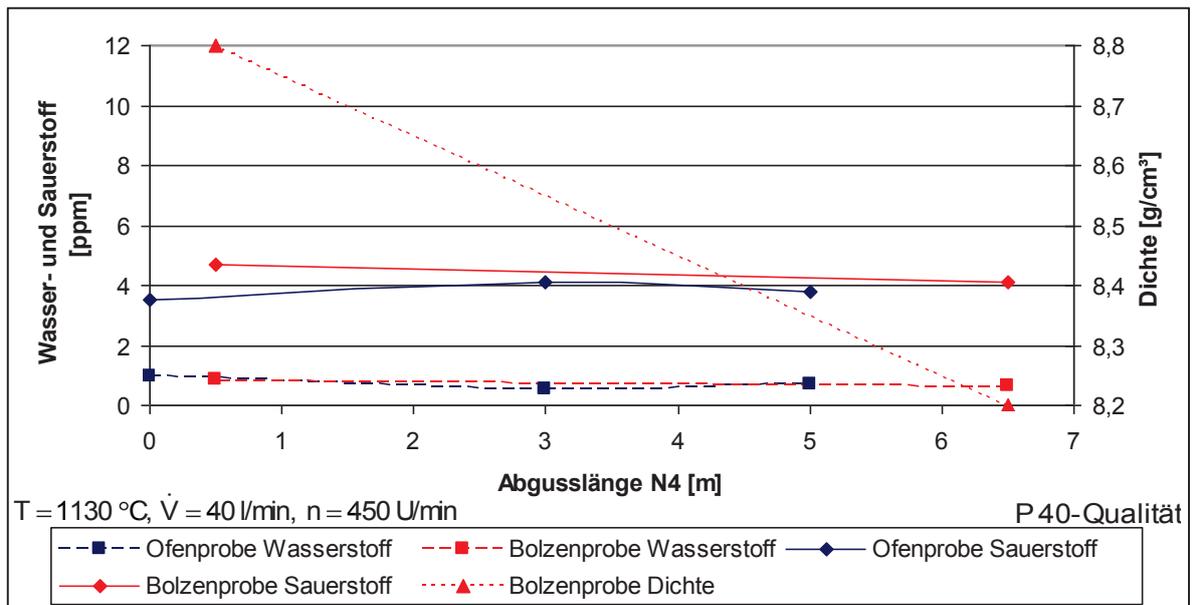


Diagramm 12.24: Versuch N4; Abguss P 40-Qualität

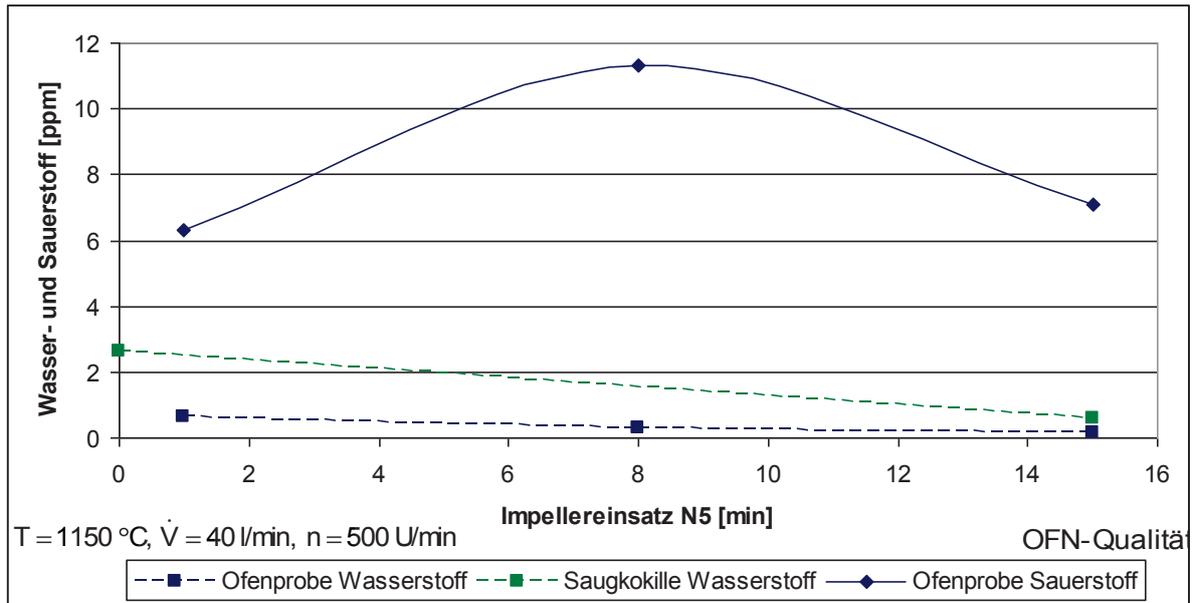


Diagramm 12.25: Versuch N5; Impellereinsatz OFN-Qualität

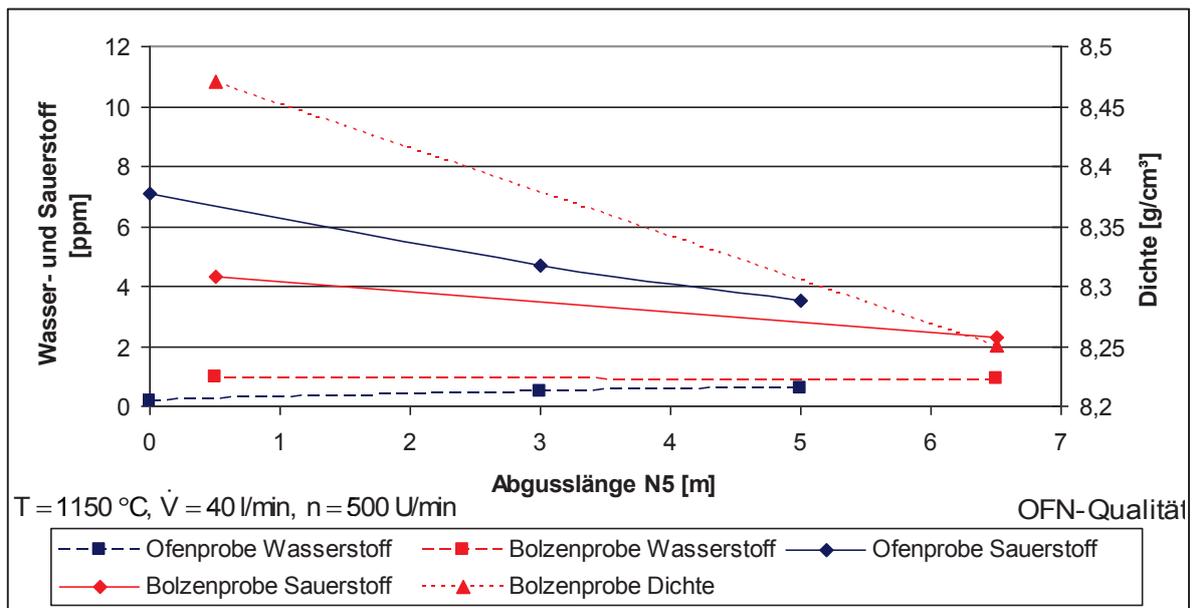


Diagramm 12.26: Versuch N5; Abguss OFN-Qualität

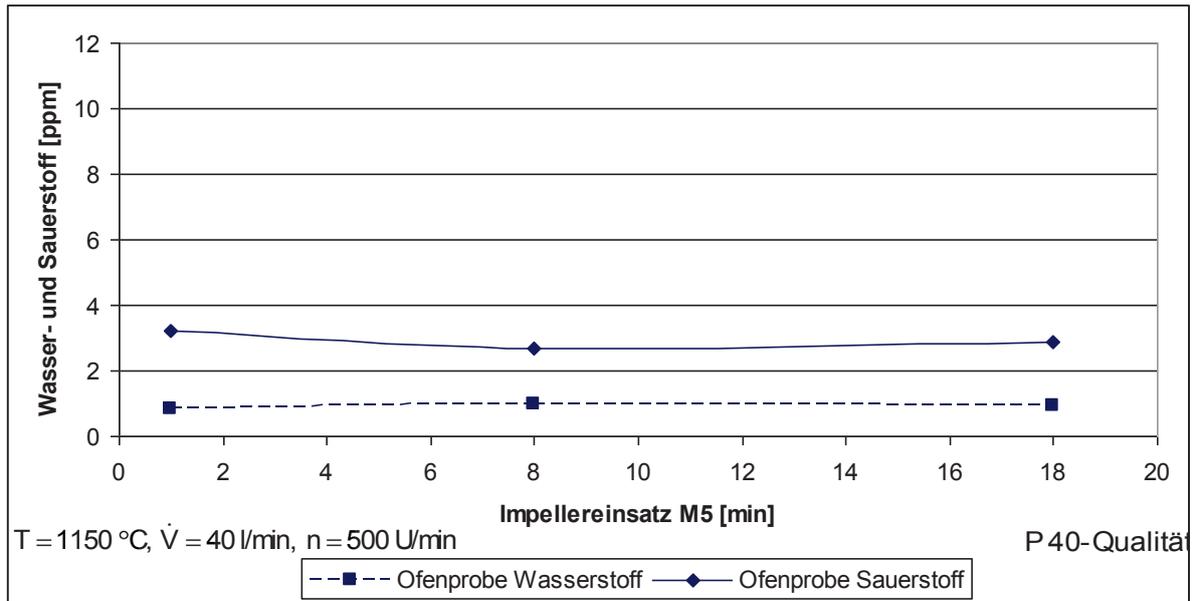


Diagramm 12.27: Versuch M5; Impellereinsatz P 40-Qualität

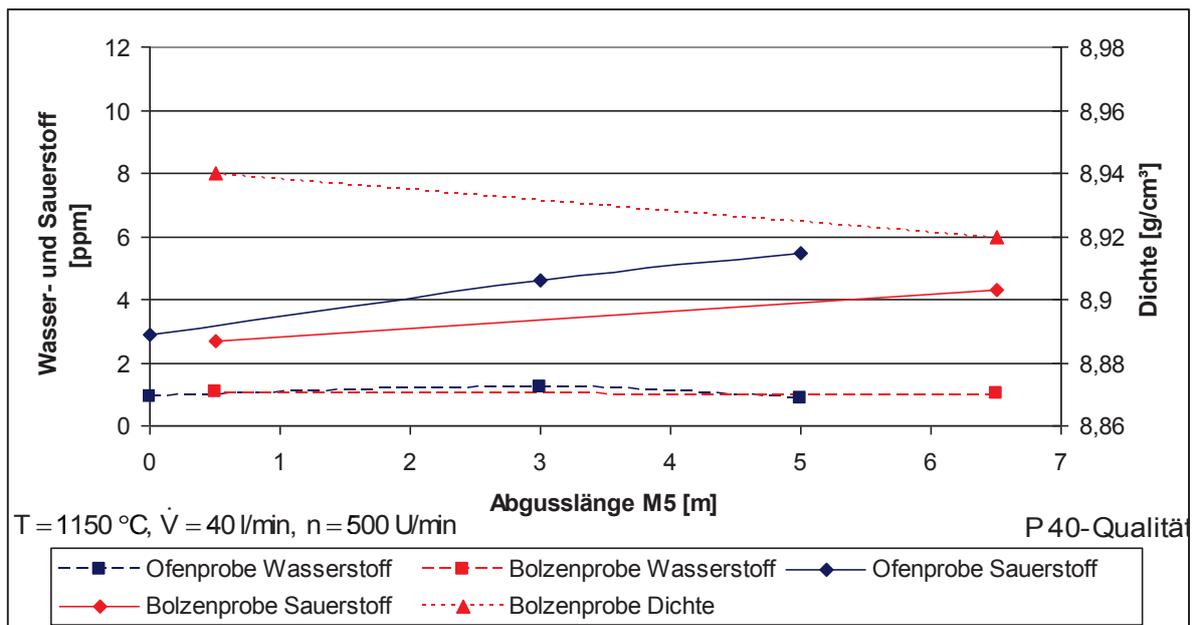


Diagramm 12.28: Versuch M5; Abguss P 40-Qualität

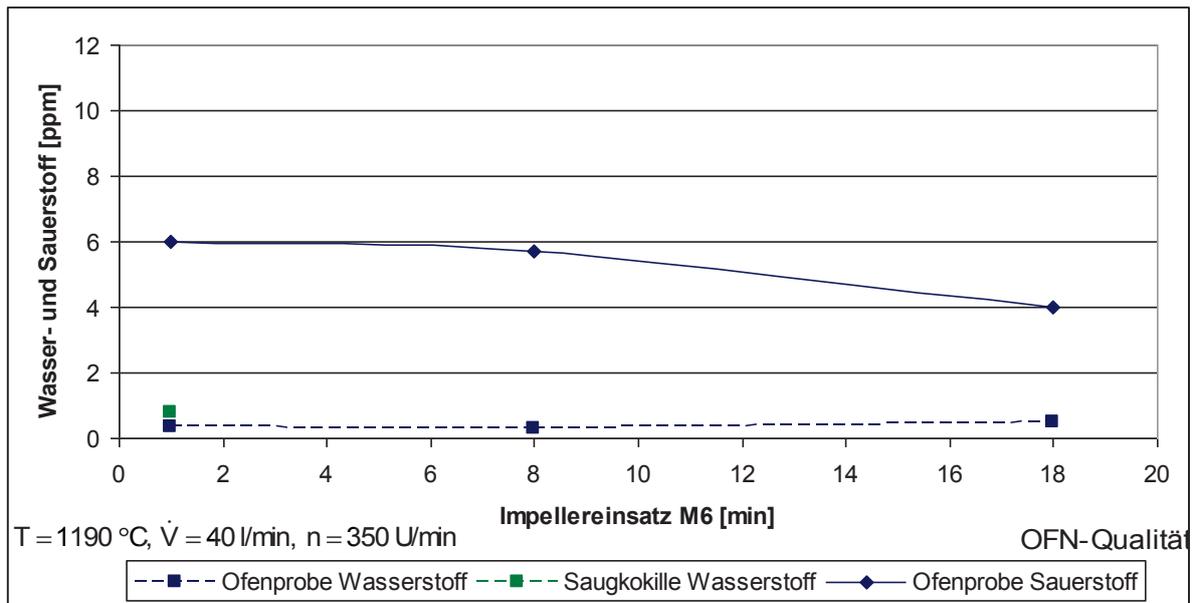


Diagramm 12.29: Versuch M6; Impellereinsatz OFN-Qualität

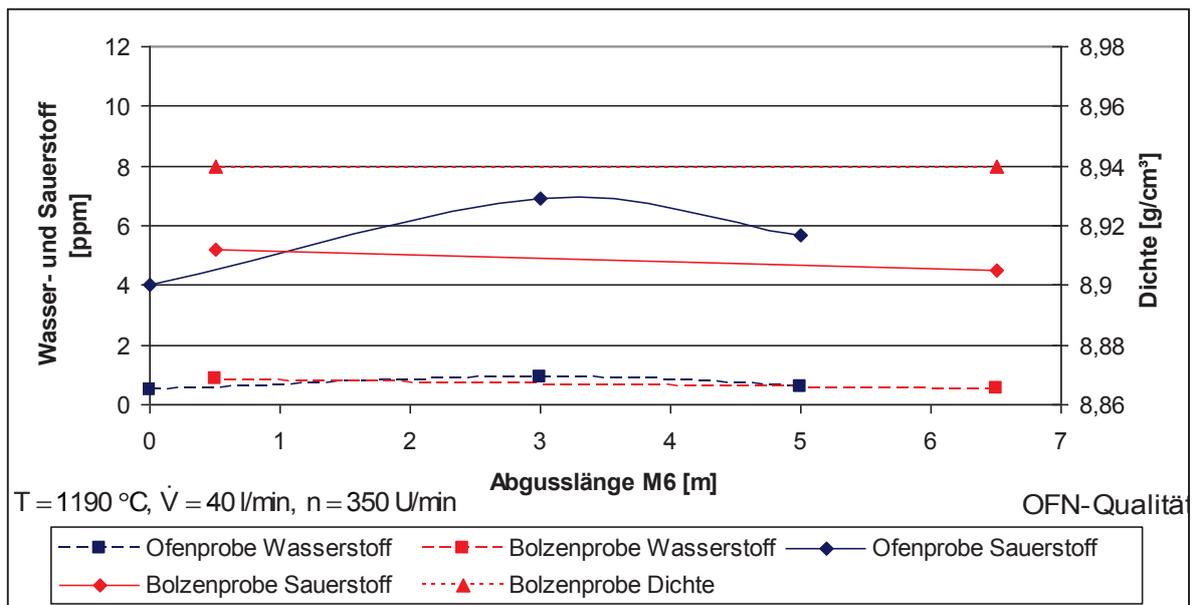


Diagramm 12.30: Versuch M6; Abguss OFN-Qualität

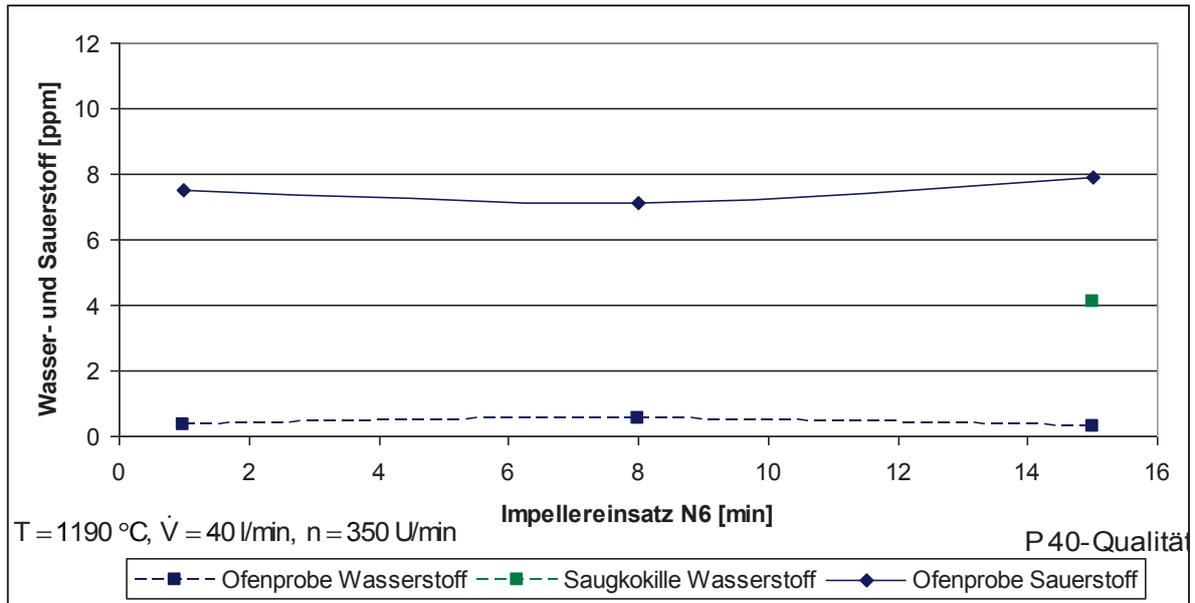


Diagramm 12.31: Versuch N6; Impellereinsatz P 40-Qualität

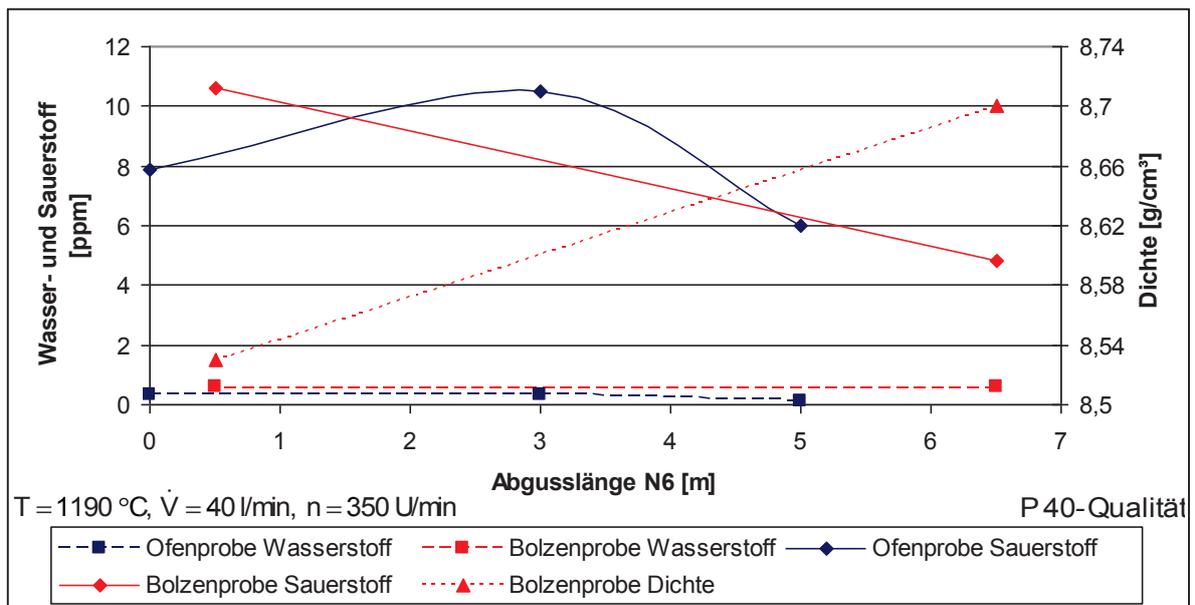


Diagramm 12.32: Versuch N6; Abguss P 40-Qualität

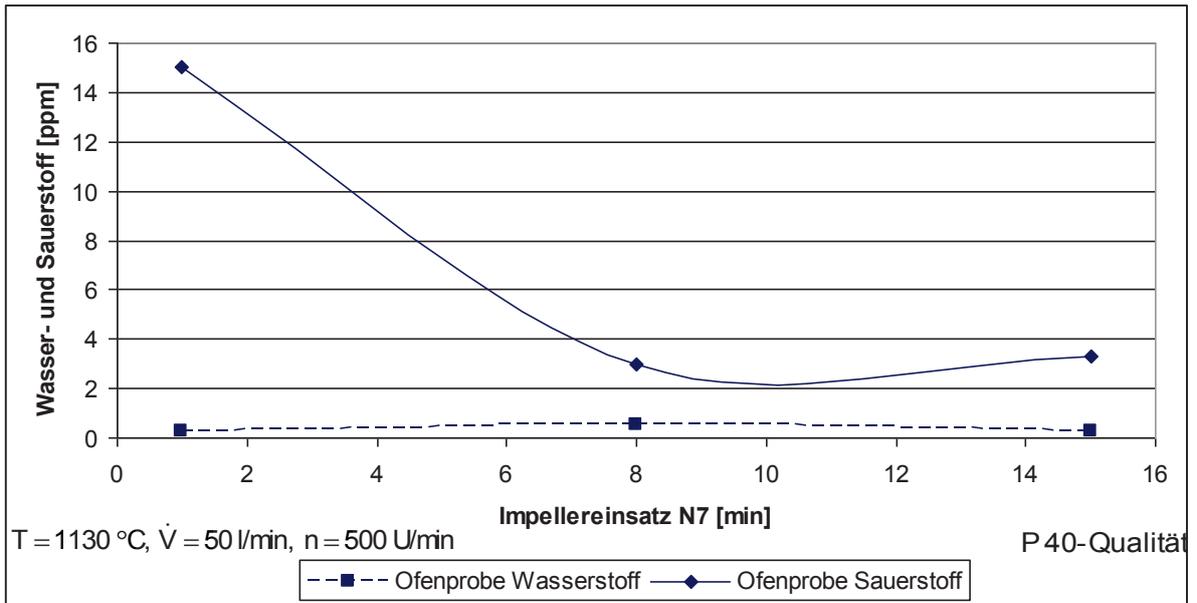


Diagramm 12.33: Versuch N7; Impellereinsatz P 40-Qualität

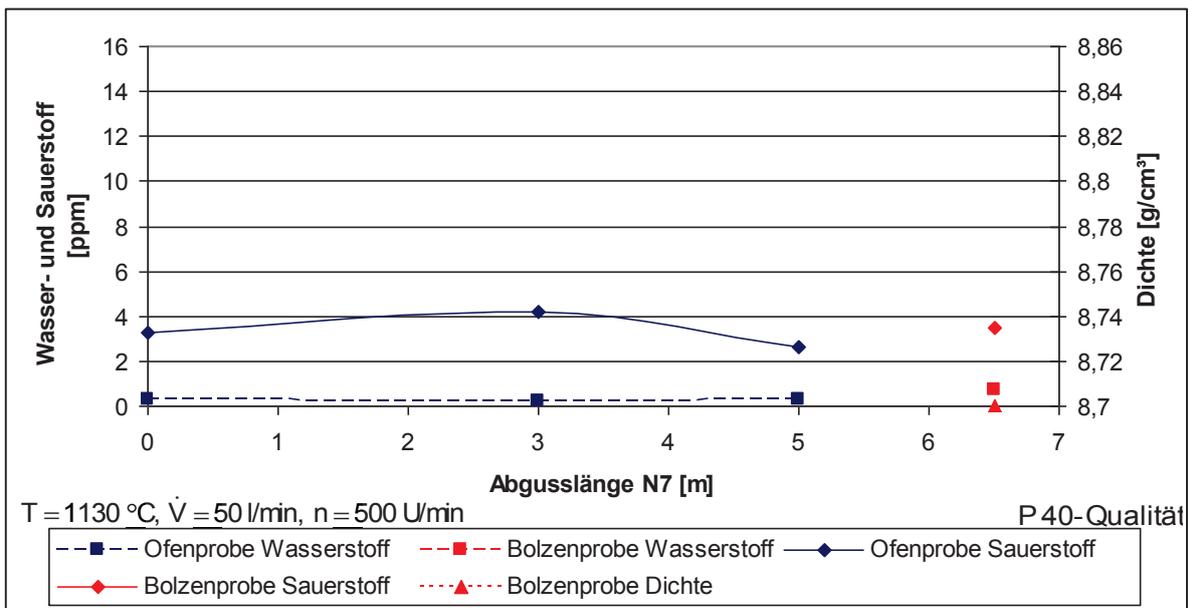


Diagramm 12.34: Versuch N7; Abguss P 40-Qualität

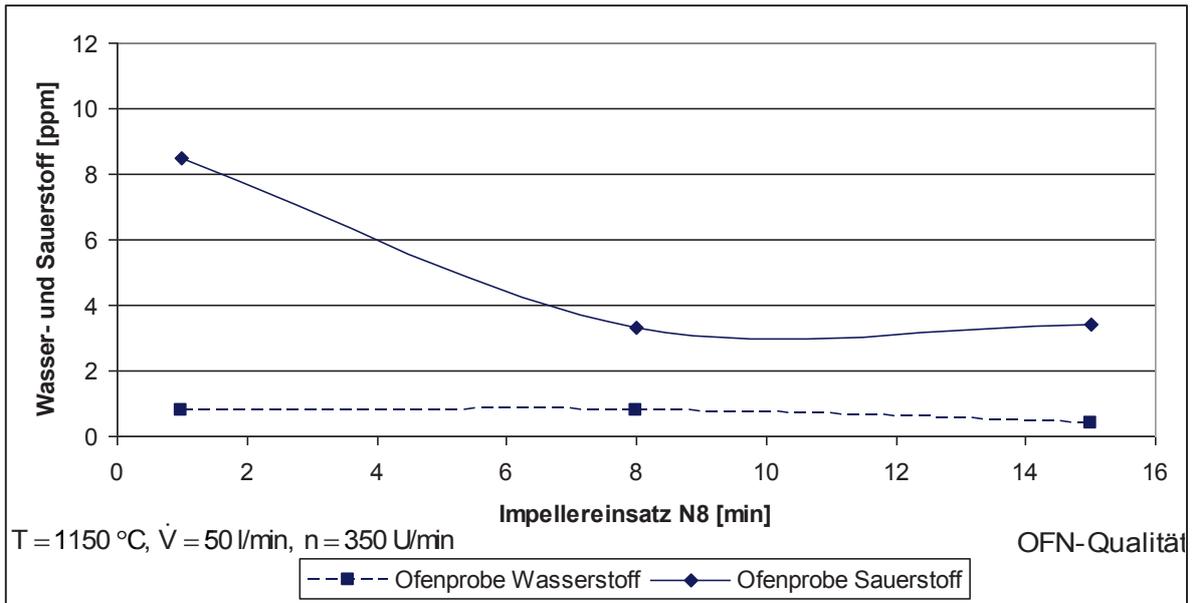


Diagramm 12.35: Versuch N8; Impellereinsatz OFN-Qualität

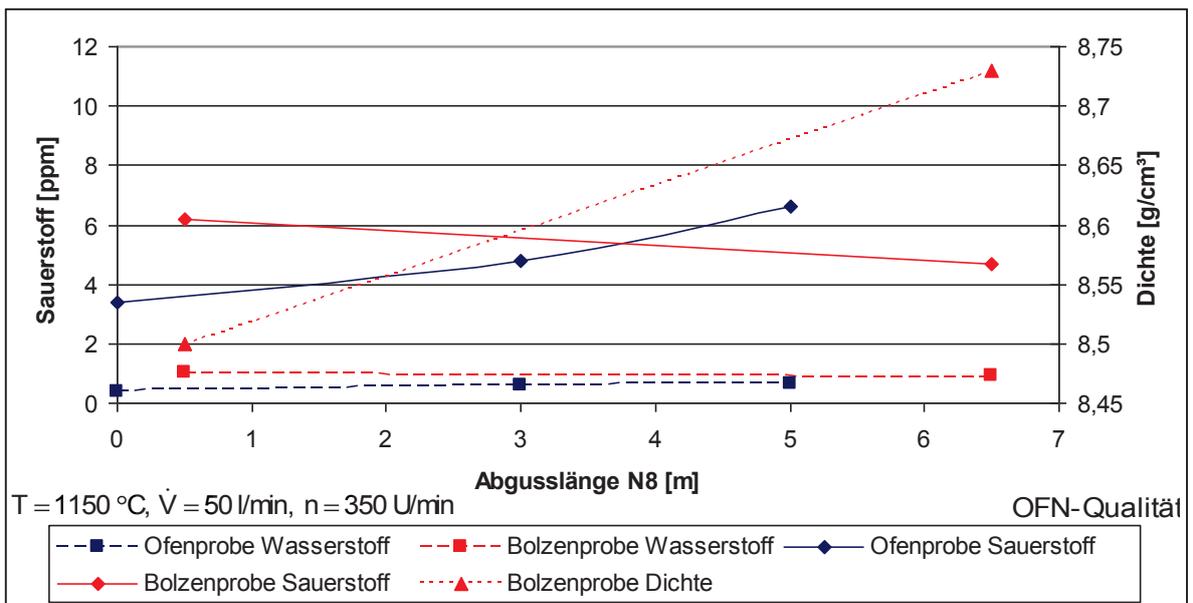


Diagramm 12.36: Versuch N8; Abguss OFN-Qualität

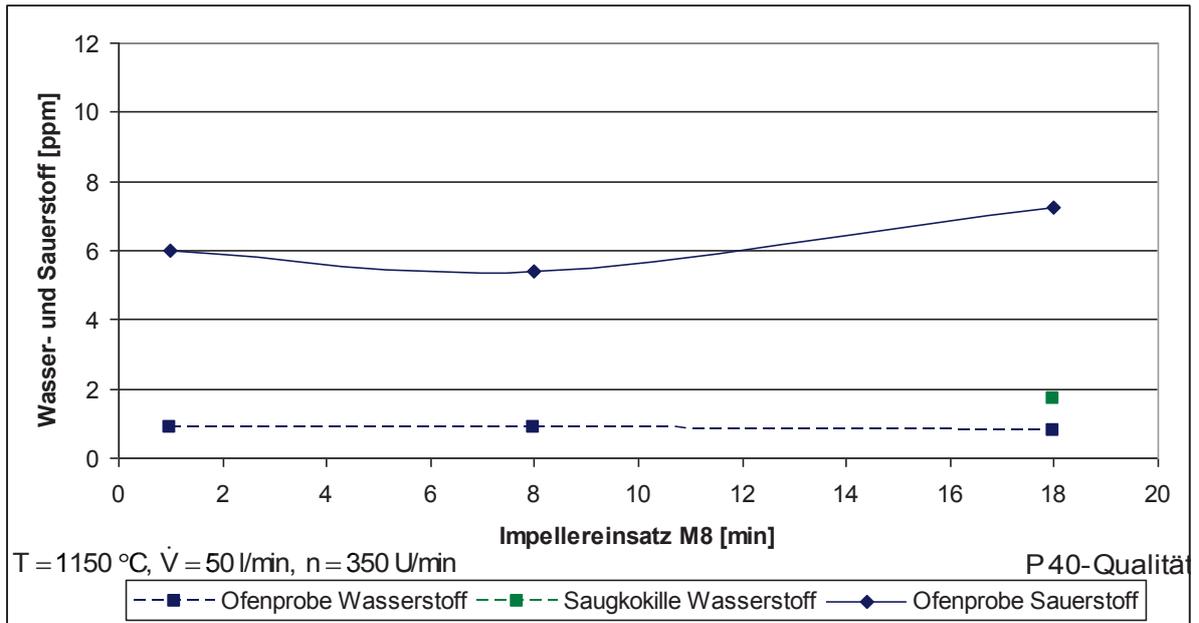


Diagramm 12.37: Versuch M8; Impellereinsatz P 40-Qualität

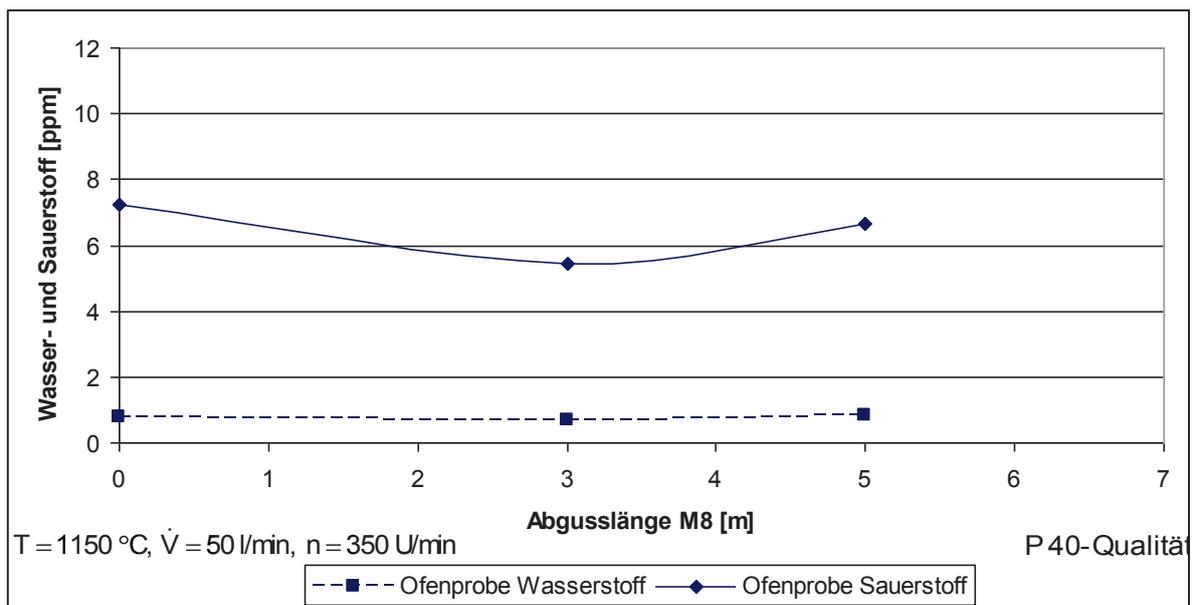


Diagramm 12.38: Versuch M8; Abguss P 40-Qualität

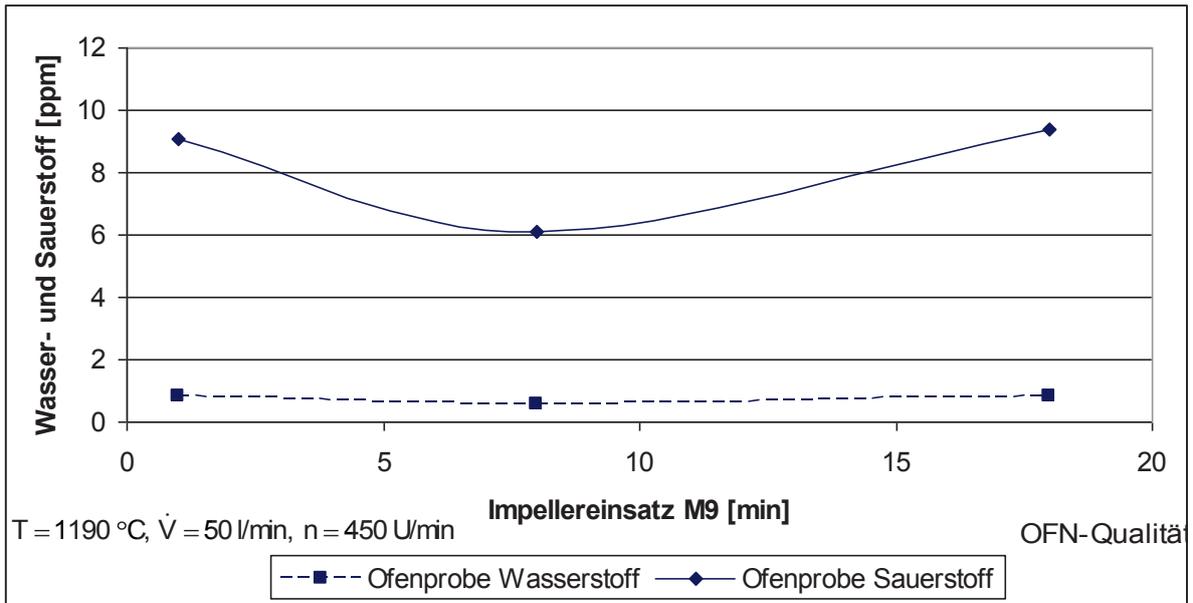


Diagramm 12.39: Versuch M9; Impellereinsatz OFN-Qualität

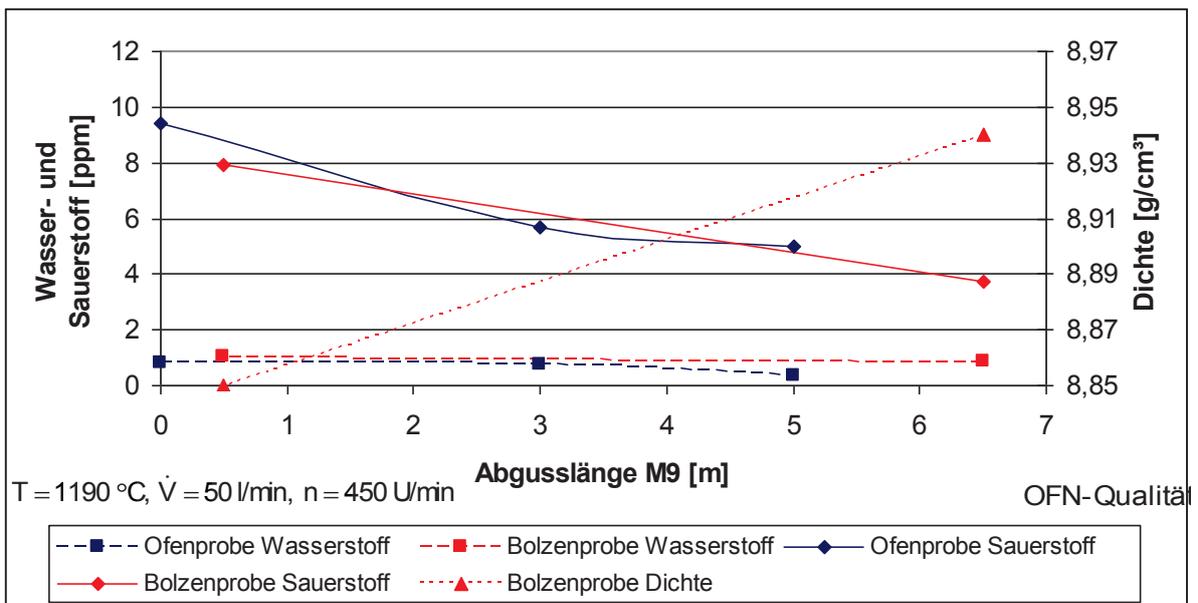


Diagramm 12.40: Versuch M9; Abguss OFN-Qualität

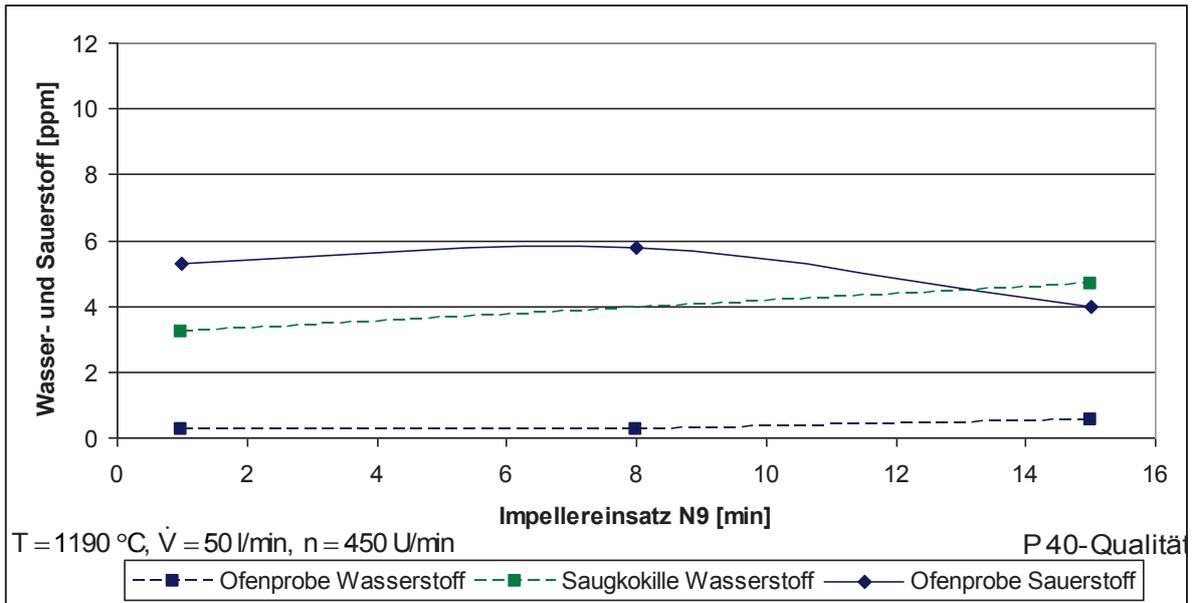


Diagramm 12.41: Versuch N9; Impellereinsatz P 40-Qualität

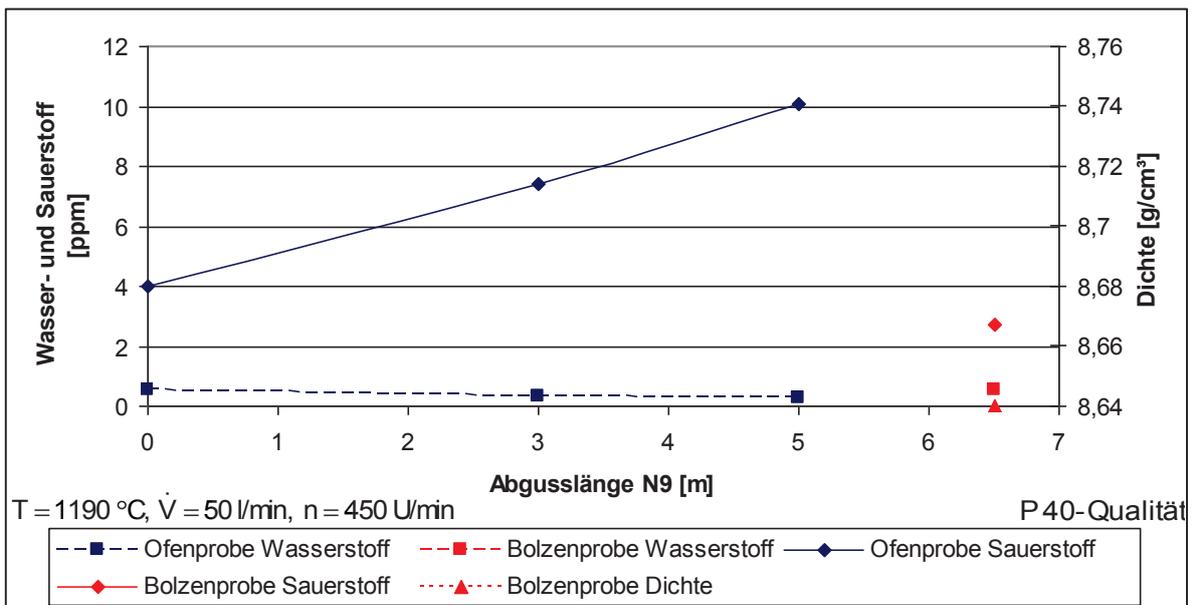


Diagramm 12.42: Versuch N9; Abguss P 40-Qualität

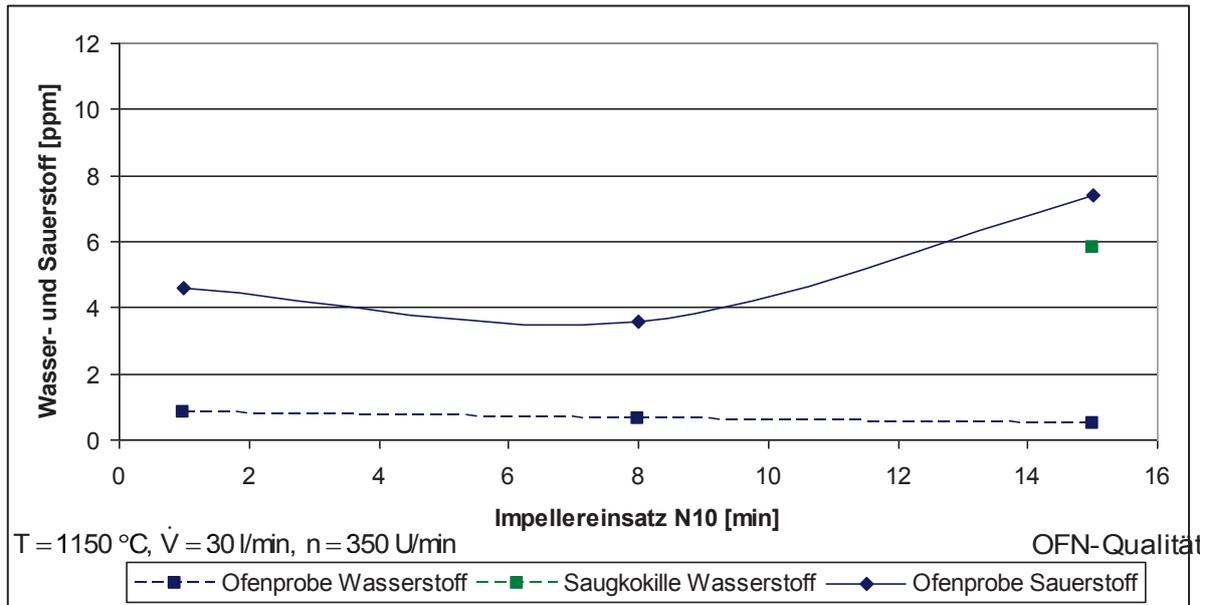


Diagramm 12.43: Versuch N10; Impellereinsatz OFN-Qualität

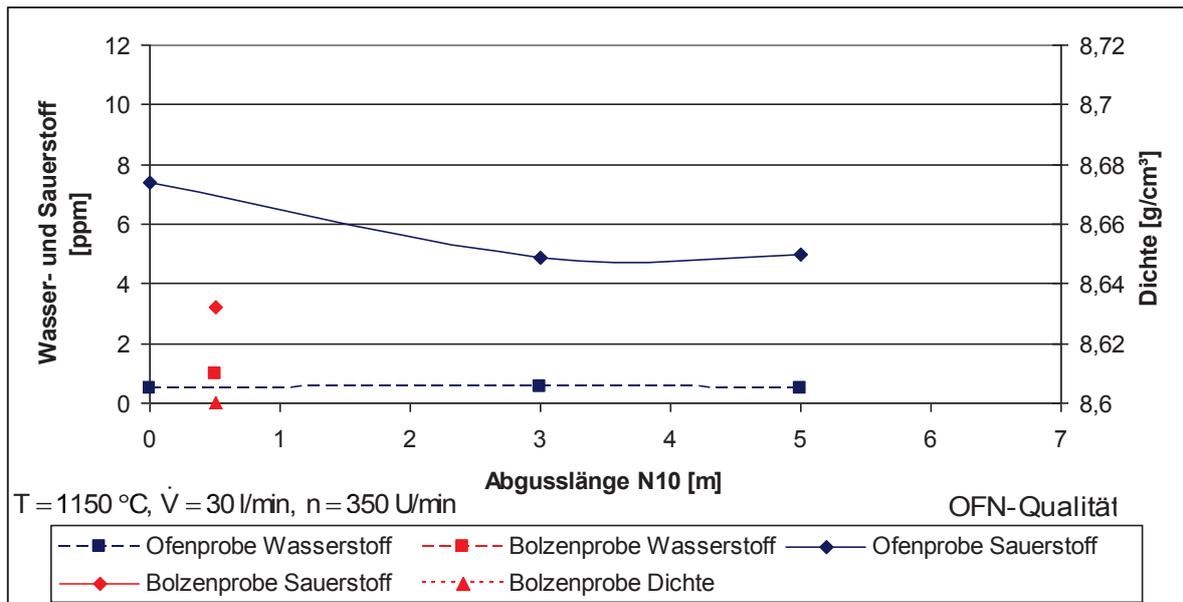


Diagramm 12.44: Versuch N10; Abguss OFN-Qualität

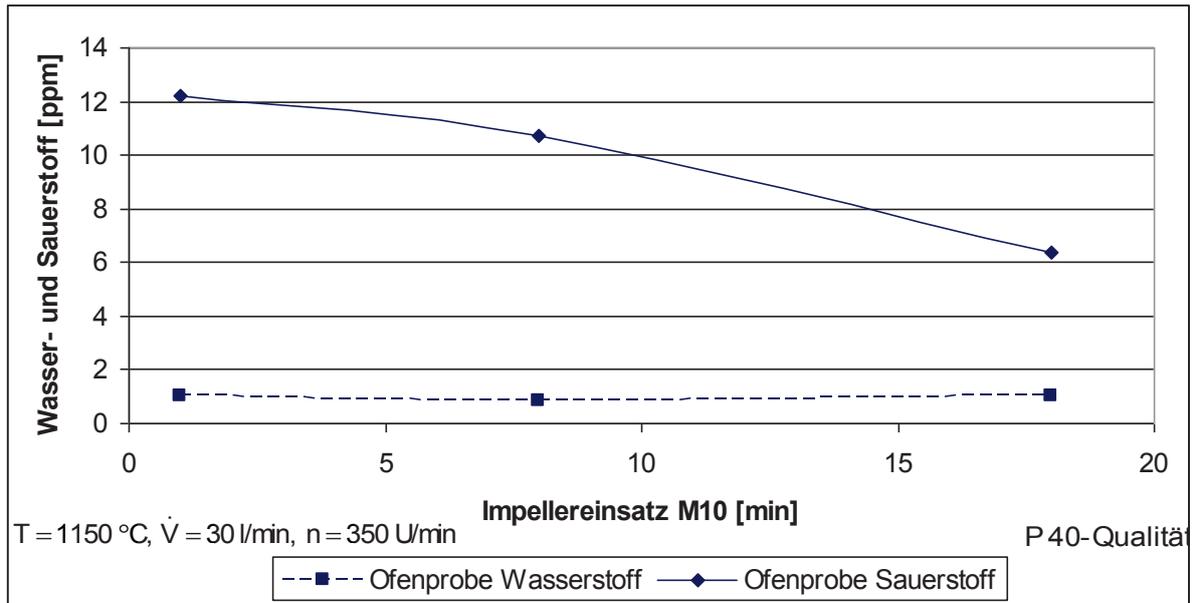


Diagramm 12.45: Versuch M10; Impellereinsatz P 40-Qualität

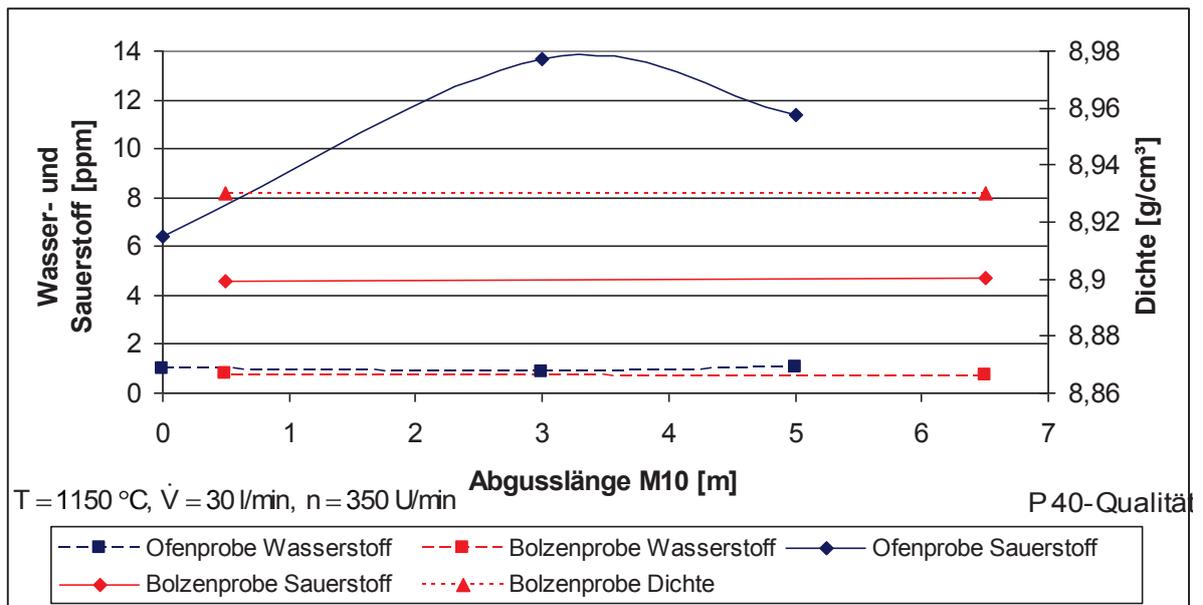


Diagramm 12.46: Versuch M10; Abguss P 40-Qualität

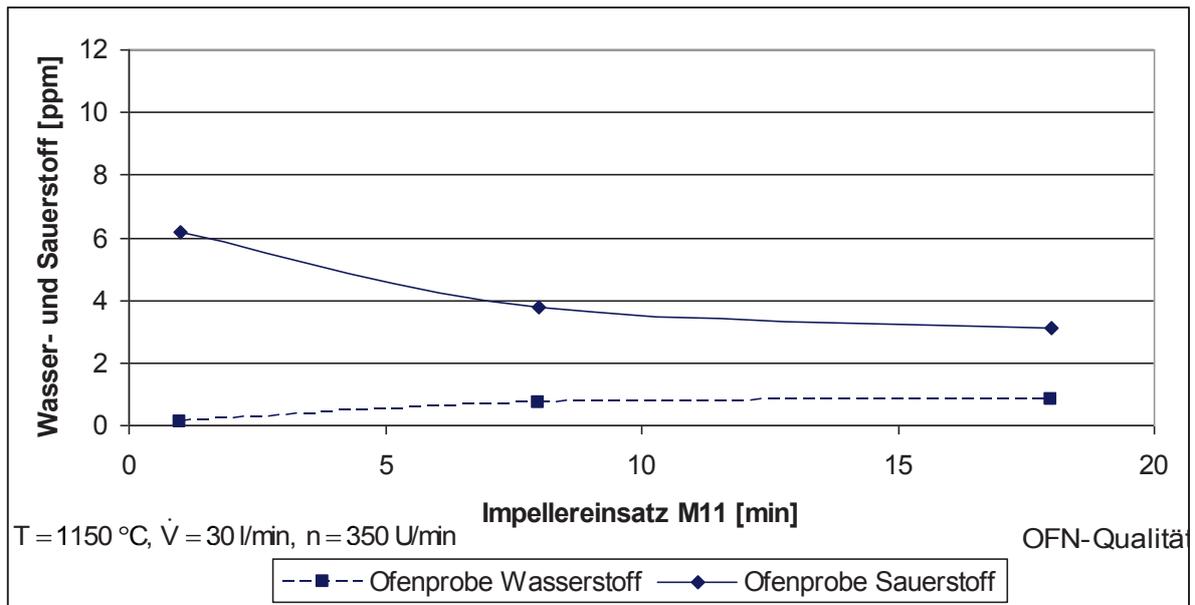


Diagramm 12.47: Versuch M11; Impellereinsatz OFN-Qualität

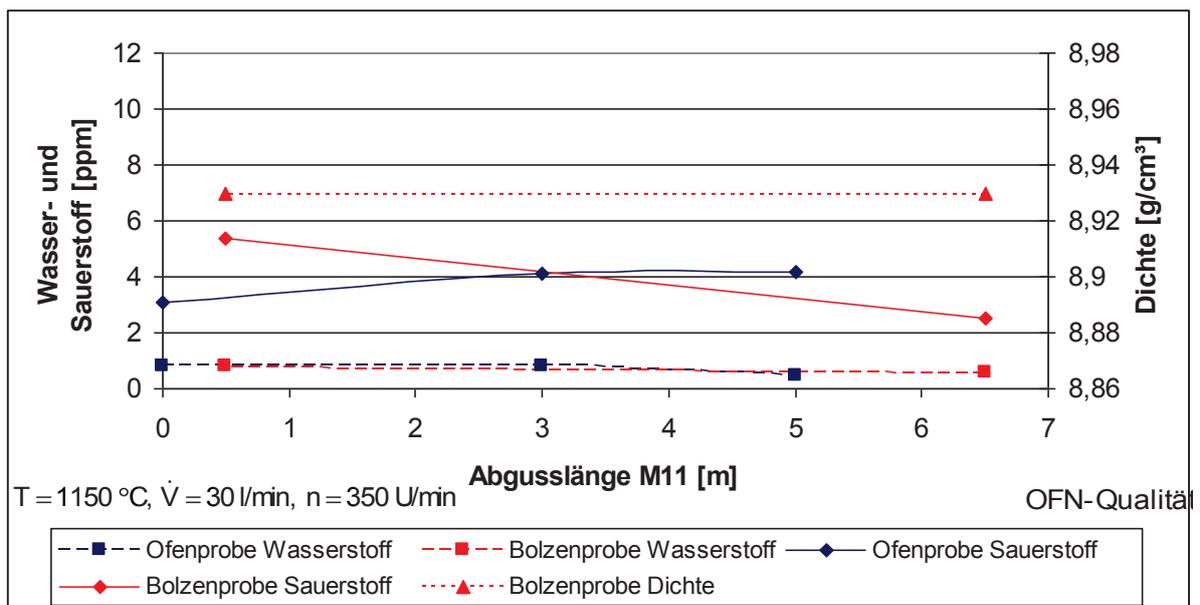


Diagramm 12.48: Versuch M11; Abguss OFN-Qualität

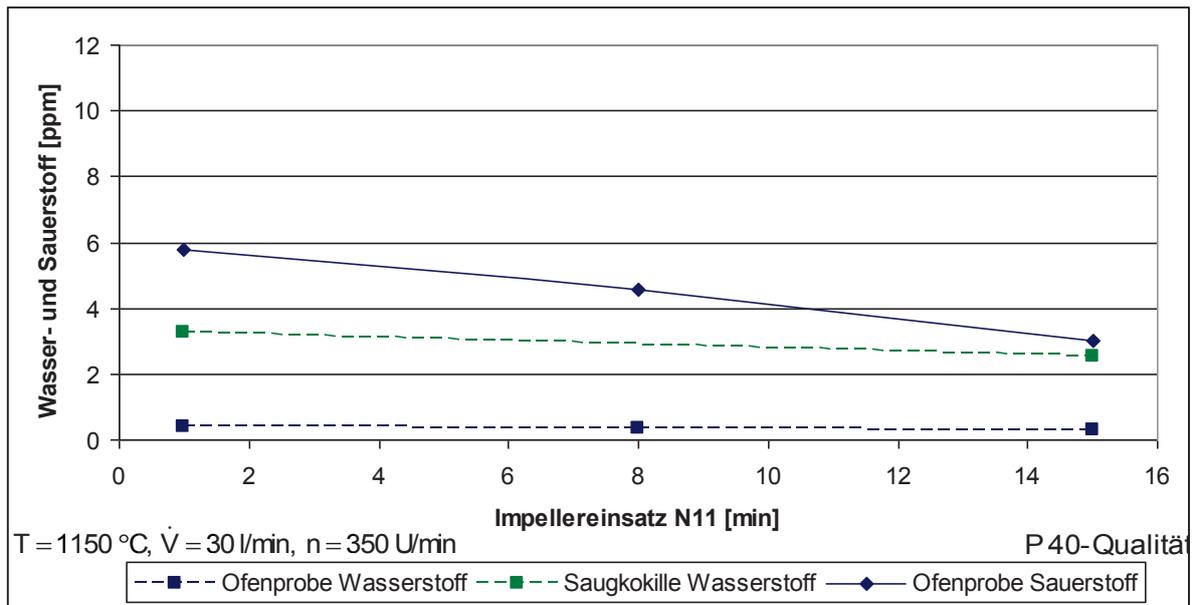


Diagramm 12.49: Versuch N11; Impellereinsatz P 40-Qualität

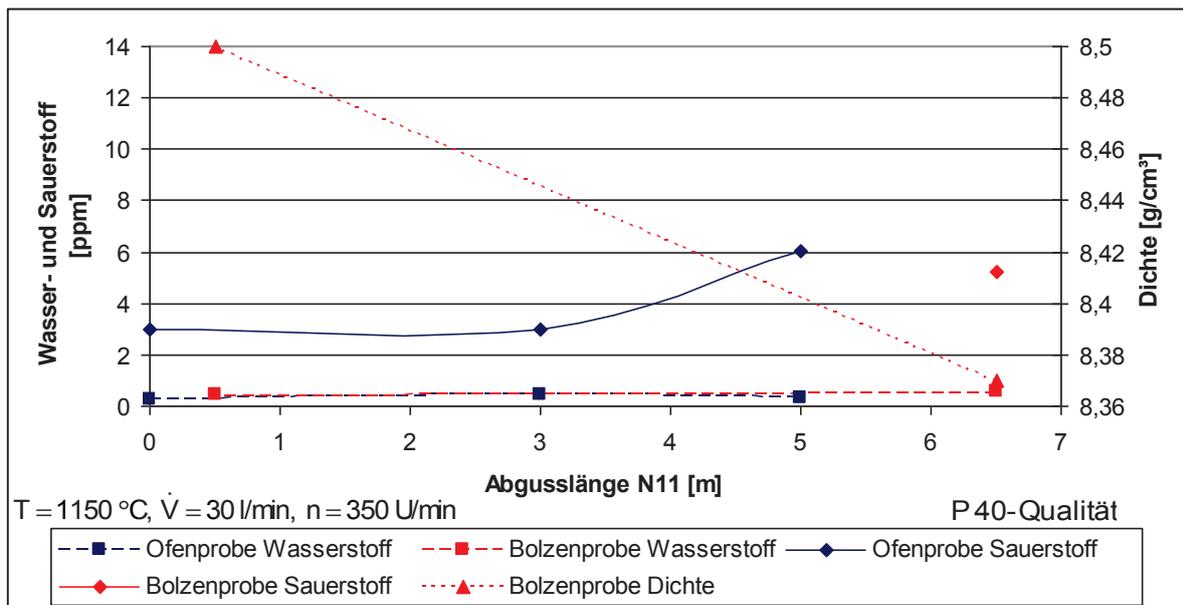


Diagramm 12.50: Versuch N11; Abguss P 40-Qualität

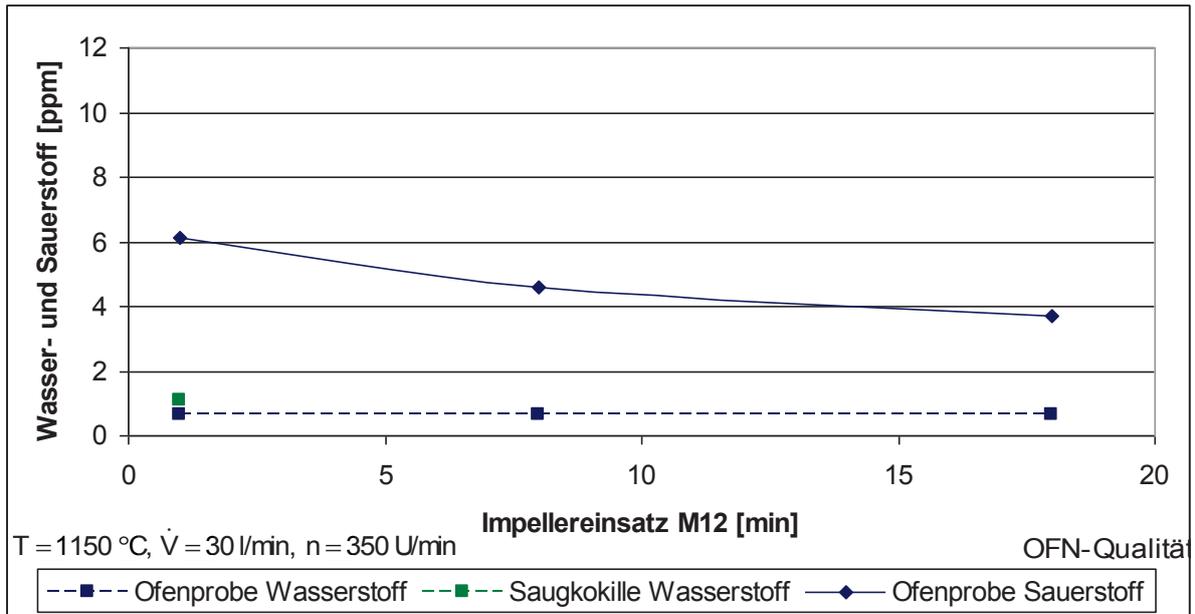


Diagramm 12.51: Versuch M12; Impellereinsatz OFN-Qualität

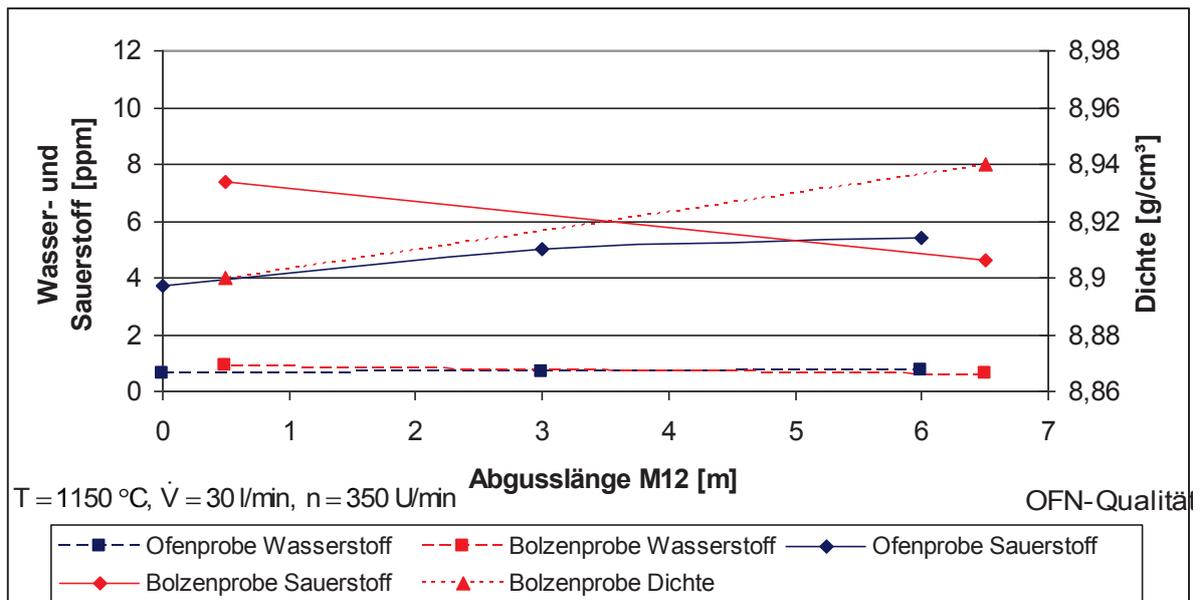


Diagramm 12.52: Versuch M12; Abguss OFN-Qualität

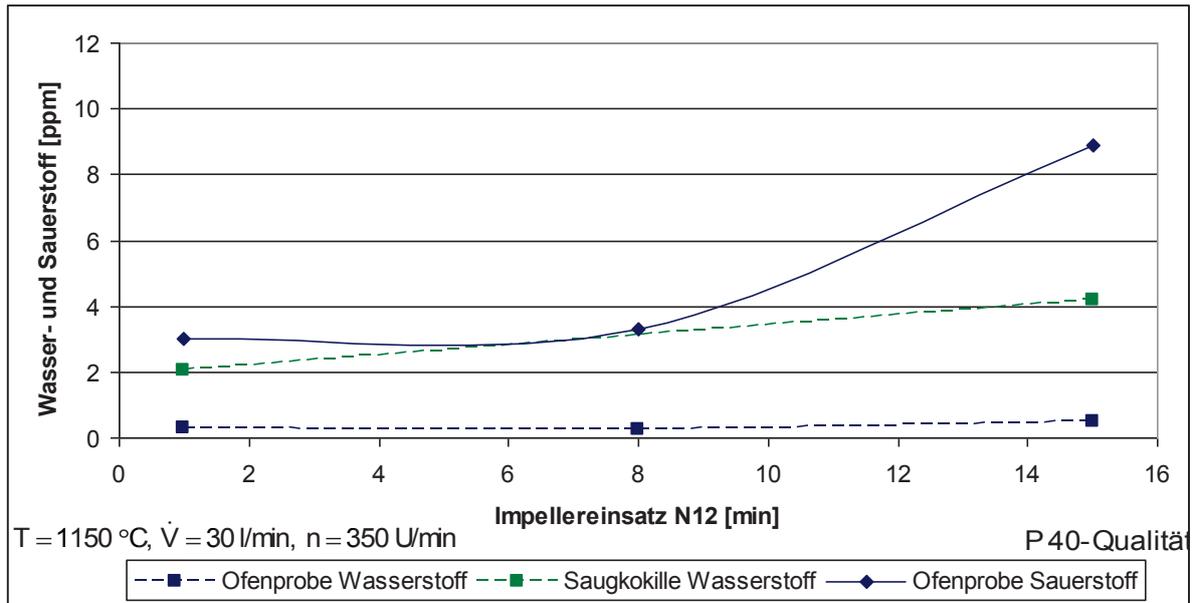


Diagramm 12.53: Versuch N12; Impellereinsatz P 40-Qualität

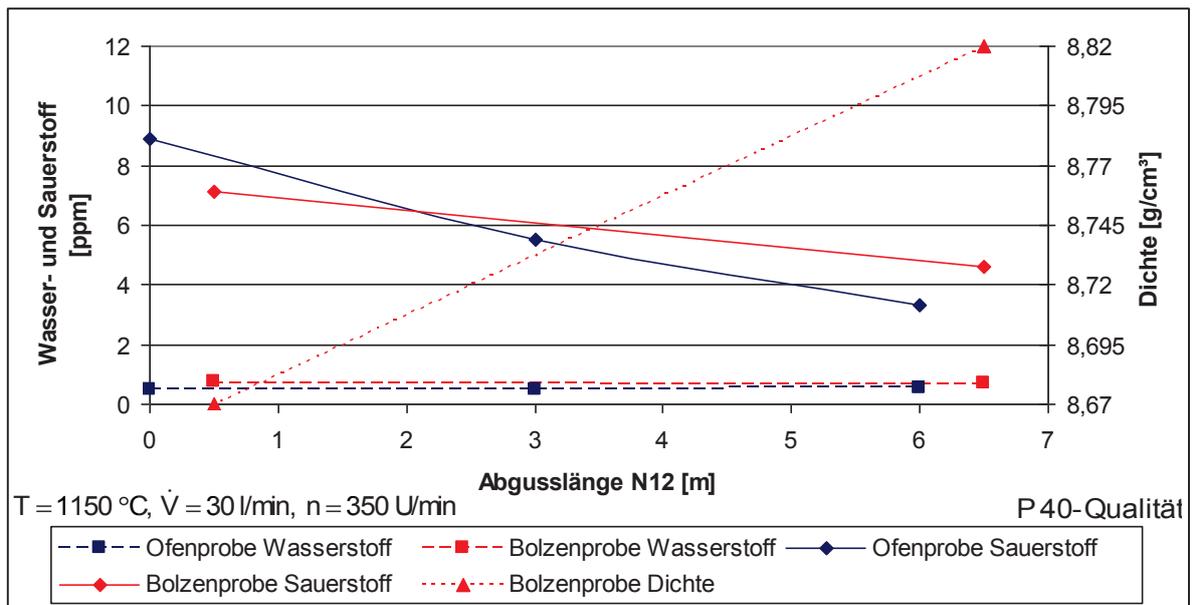


Diagramm 12.54: Versuch N12; Abguss P 40-Qualität

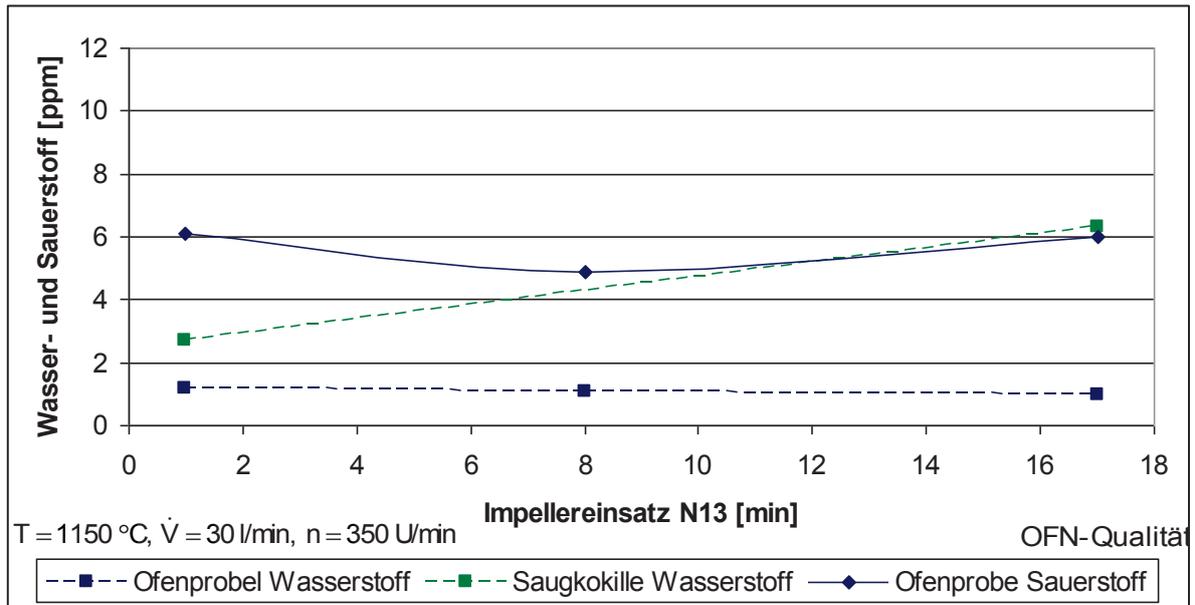


Diagramm 12.55: Versuch N13; Impellereinsatz OFN-Qualität

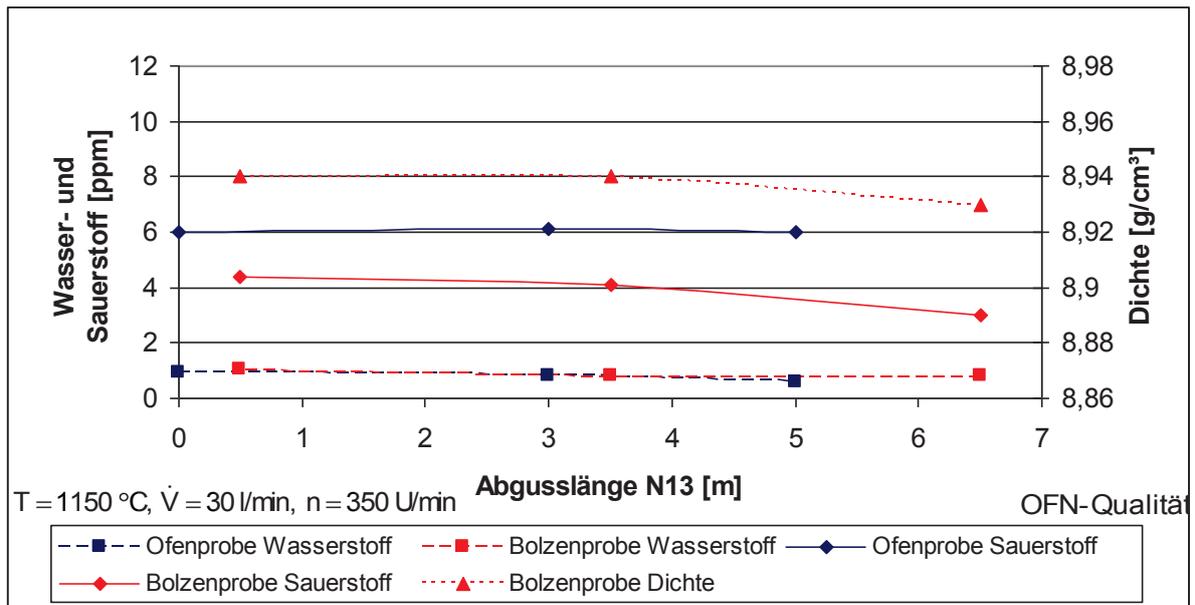


Diagramm 12.56: Versuch N13; Abguss OFN-Qualität

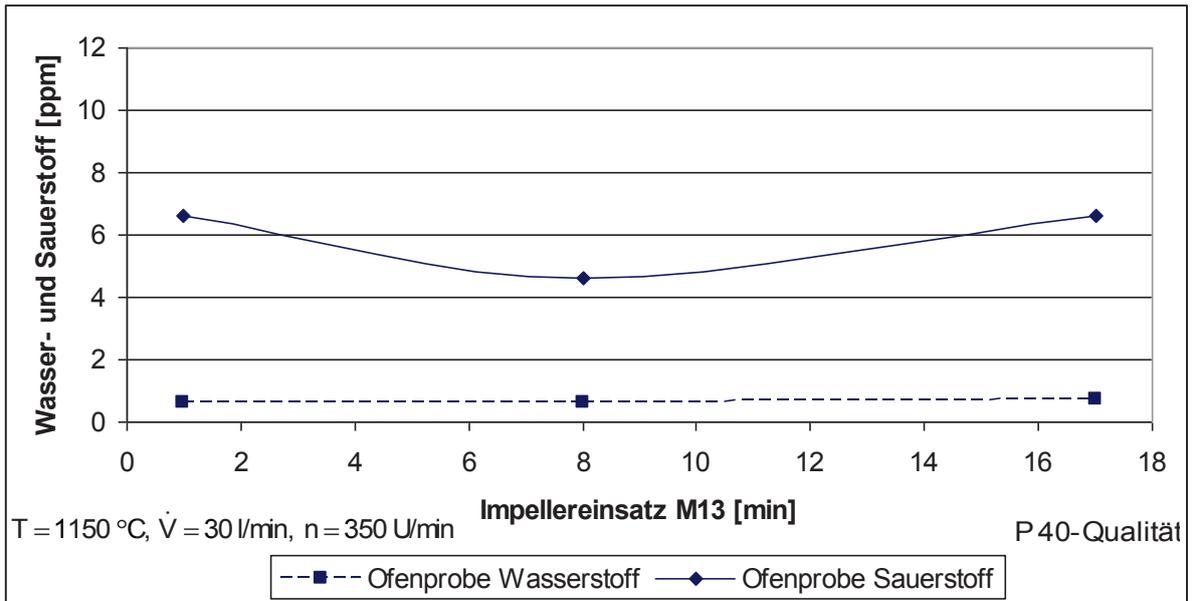


Diagramm 12.57: Versuch M13; Impellereinsatz P 40-Qualität

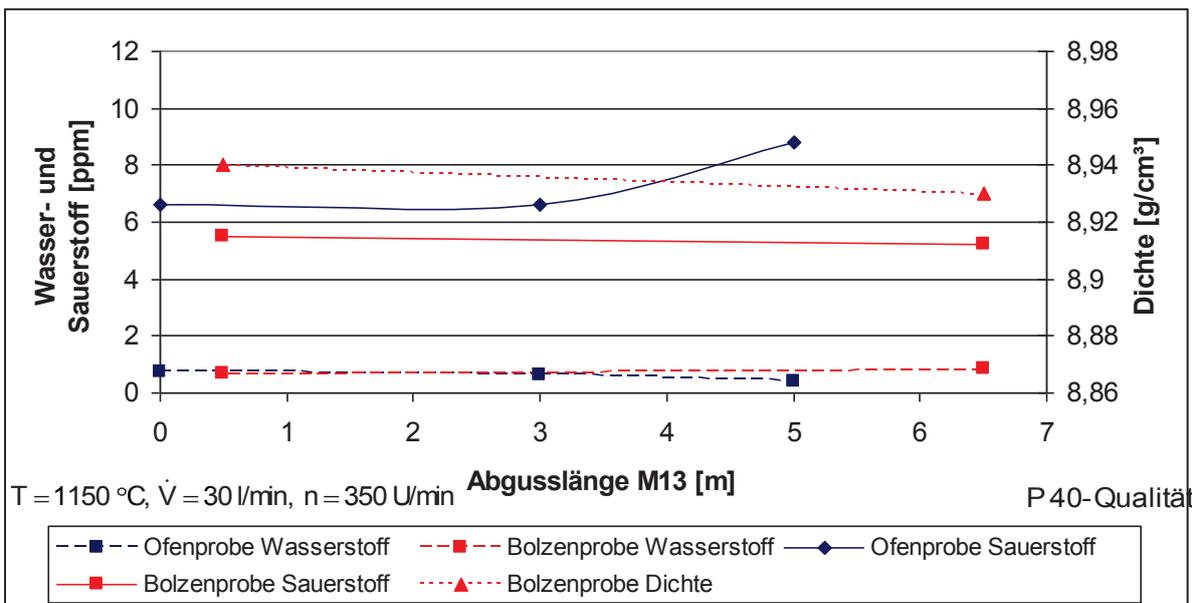


Diagramm 12.58: Versuch M13; Abguss P 40-Qualität

12.2.3 Einzelversuch mit dem Impeller und Calciumhexaborid

Tabelle 12-5: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Rotor [min]	Gießlänge [m]
1520/5	Ofenprobe	0,58	9,2	4,5	-	1	-
1520/5	Ofenprobe	0,86	7,95	7,5	-	5	-
1520/5	Ofenprobe	0,81	6,7	8,6	-	10	-
1520/5	Ofenprobe	0,75	5,3	12,4	-	15	0
1520/5	Ofenprobe	1,955	5,4	7,1	-	-	1
1520/5	Ofenprobe	0,409	6,5	6,5	-	-	3
1520/5	Ofenprobe	0,876	2,9	5,8	-	-	5
1520/5	Saugkokille	1,59	-	-	-	1	-
1520/5	Bolzenprobe	-	-	-	8,93	-	6,5
1520/5	Bolzenprobe	0,77	5,6	5,7	8,94	-	0,47

12.2.4 Einzelversuch mit dem Impeller, Calciumhexaborid, schlechte Kathoden und Abdeckkohle

Tabelle 12-6: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Rotor [min]	Gießlänge [m]
2532/37	Ofenprobe	0,458	8,3	4,8	-	-45	-
2532/37	Ofenprobe	0,64	17,3	5,8	-	-39	-
2532/37	Ofenprobe	0,543	10,6	5,7	-	-35	-
2532/37	Ofenprobe	0,6985	9,3	5,9	-	-30	-
2532/37	Ofenprobe	0,61	9,7	6,3	-	-20	-
2532/37	Ofenprobe	0,9305	8,2	6,9	-	1	-
2532/37	Ofenprobe	0,394	6	8,2	-	5	-
2532/37	Ofenprobe	0,76	6	8,5	-	10	-
2532/37	Ofenprobe	1,36	6,3	11,2	-	18	0
2532/37	Ofenprobe	1,17	7,1	21,6	-	-	0,5
2532/37	Ofenprobe	0,77	5,7	17,7	-	-	2
2532/37	Ofenprobe	0,851	7,2	17,4	-	-	3
2532/37	Ofenprobe	0,665	4,7	16,5	-	-	5
2532/37	Ofenprobe	1,02	5,9	15,5	-	-	6
2532/37	Bolzenprobe	0,933	2,95	16,4	8,93	-	6,5
2532/37	Bolzenprobe	0,939	4,3	17,8	8,94	-	3,5
2532/37	Bolzenprobe	1,00	6,85	14,9	8,89	-	0,5
2535/45	Ofenprobe	0,356	13,1	10,8	-	-45	-
2535/46	Ofenprobe	0,03	60,8	1,9	-	-39	-
2535/47	Ofenprobe	0,00	40,7	1	-	-35	-
2535/48	Ofenprobe	0,007	40,7	0,7	-	-30	-
2535/49	Ofenprobe	0,041	30,2	0,6	-	-20	-
2535/50	Ofenprobe	0,021	22,9	0,5	-	1	-
2535/51	Ofenprobe	0,098	15,6	1,3	-	5	-
2535/52	Ofenprobe	0,33	13,4	2,5	-	10	-
2535/53	Ofenprobe	0,981	11,7	5	-	18	0
2535/54	Ofenprobe	0,714	8,4	13,8	-	-	0,19
2535/55	Ofenprobe	0,508	5,65	14,3	-	-	3
2535/56	Ofenprobe	0,284	9,7	14,1	-	-	5
2535/57	Ofenprobe	0,70	7,9	12,9	-	-	6,5
2535/58	Ofenprobe	0,503	9,4	13,9	-	-	7
2535/59	Saugkokille	1,09	-	-	-	-39	-
2535/60	Saugkokille	1,83	-	-	-	-20	-
2535/61	Saugkokille	3,5	-	-	-	18	-
2535/62	Bolzenprobe	0,88	8,5	15,4	8,94	-	6,5
2535/63	Bolzenprobe	0,887	6,05	16,4	8,94	-	3,5
2535/64	Bolzenprobe	0,991	12,83	13,6	8,9	-	0,5

12.2.5 Einzelversuch mit Impeller bei Qualität OF 101 certified

Tabelle 12-7: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Rotor [min]	Gießlänge [m]
1623/1	Ofenprobe	0,575	8,3	1,1	-	1	-
1623/1	Ofenprobe	0,928	7	1,4	-	5	-
1623/1	Ofenprobe	0,843	7	1,6	-	10	-
1623/1	Ofenprobe	0,55	10,7	1,8	-	15	-
1623/1	Ofenprobe	0,609	6,6	1,8	-	20	0
1623/1	Ofenprobe	0,651	5,2	1,7	-	-	3
1623/1	Ofenprobe	0,59	8,05	1,9	-	-	5
1623/1	Saugkokille	2,79	-	-	-	20	-
1623/1	Bolzenprobe	0,871	5	1,9	-	-	6,5
1623/1	Bolzenprobe	0,796	6,05	1,9	-	-	3,5
1623/1	Bolzenprobe	0,898	6,4	2,7	-	-	0,5

12.3 Versuche für das Abgießen mit Bodenspüler

12.3.1 Versuchsreihe mit Bodenspüler

Tabelle 12-8: Auflistung der Messergebnisse

Versuch	Probenart	H ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	P [ppm]	Dichte [g/cm ³]	Gießlänge [m]
B1	Ofenprobe	0,75	4,70	20,4	-	0
B1	Ofenprobe	0,93	6,00	25	-	3
B1	Ofenprobe	0,66	5,20	23,6	-	5
B1	Bolzenprobe	0,66	5,55	23,9	8,94	6,5
B1	Bolzenprobe	0,92	5,95	26,9	8,95	3,5
B1	Bolzenprobe	0,91	6,05	20,4	8,94	0,5
B2	Ofenprobe	0,97	8,40	23,8	-	0,5
B2	Ofenprobe	0,51	4,60	24,4	-	3,5
B2	Ofenprobe	0,50	6,50	24,5	-	5,5
B2	Bolzenprobe	0,65	8,35	25,1	8,94	6,5
B2	Bolzenprobe	0,66	5,60	24,5	8,94	3,5
B2	Bolzenprobe	0,78	5,60	21,9	8,95	0,5
B3	Ofenprobe	0,69	11,90	10	-	0,5
B3	Ofenprobe	0,56	8,30	25,8	-	3,5
B3	Ofenprobe	0,42	10,00	22	-	5,5
B3	Bolzenprobe	0,51	8,20	18,7	8,9	0,5
B3	Bolzenprobe	0,69	8,00	24,1	8,93	6,5
B3	Bolzenprobe	0,87	6,50	24,5	8,93	3,5
B4	Ofenprobe	0,44	7,10	28,4	-	0,5
B4	Ofenprobe	0,43	5,20	24,6	-	3,5
B4	Ofenprobe	0,42	5,80	26,3	-	5,5
B4	Bolzenprobe	0,66	5,30	26,9	8,95	6,5
B4	Bolzenprobe	0,73	4,70	28,1	8,94	3,5
B4	Bolzenprobe	0,51	8,20	18,7	8,9	0,5
B5	Ofenprobe	0,44	8,30	22,9	-	0,5
B5	Ofenprobe	0,46	6,30	20,7	-	3,5
B5	Ofenprobe	0,70	9,00	20,4	-	5,5
B5	Bolzenprobe	0,69	4,10	23,1	8,94	6,5
B5	Bolzenprobe	1,13	8,10	20,3	8,95	3,5
B6	Ofenprobe	0,42	9,50	17,8	-	0,5
B6	Ofenprobe	0,51	5,30	30,6	-	3,5
B6	Ofenprobe	0,53	8,30	30,8	-	5,5
B6	Bolzenprobe	0,54	5,00	29,1	8,94	6,5
B6	Bolzenprobe	0,84	6,70	32,5	8,93	3,5
B6	Bolzenprobe	0,76	8,20	19,4	8,91	0,5
B7	Ofenprobe	1,32	6,20	24,5	-	0,5
B7	Ofenprobe	0,86	6,30	28,7	-	3,5
B7	Ofenprobe	0,83	5,60	28,8	-	5,5
B7	Bolzenprobe	1,00	5,60	28,7	8,94	6,5
B7	Bolzenprobe	1,15	4,20	28,7	8,94	3,5
B8	Ofenprobe	0,70	11,70	27,9	-	0,5

B8	Ofenprobe	0,79	9,40	31,2	-	3,5
B8	Ofenprobe	0,71	7,00	34,2	-	5,5
B8	Bolzenprobe	0,73	5,30	28,8	8,94	6,5
B8	Bolzenprobe	0,80	5,60	32,3	8,93	3,5
B8	Bolzenprobe	1,07	8,80	23,3	8,87	0,5
B9	Ofenprobe	0,69	5,80	13,2	-	0
B9	Ofenprobe	0,60	5,90	12,5	-	3
B9	Ofenprobe	0,56	5,35	11,6	-	6
B9	Saugkokille	2,39	-	-	-	0
B9	Bolzenprobe	0,94	4,10	11,4	8,93	6,5
B9	Bolzenprobe	0,96	4,90	12,2	8,93	3,5
B9	Bolzenprobe	1,16	4,50	12,6	8,93	0,5
B10	Ofenprobe	0,84	5,10	12,1	-	1
B10	Ofenprobe	0,92	4,80	11,4	-	3
B10	Ofenprobe	0,85	5,20	--	-	5
B10	Saugkokille	6,34	-	-	-	5
B10	Bolzenprobe	0,70	3,20	12,5	8,92	6,5
B10	Bolzenprobe	0,90	3,20	11,9	8,92	3,5
B10	Bolzenprobe	1,18	2,60	12,5	8,94	0,5
B11	Ofenprobe	1,10	11,45	14,4	-	0
B11	Ofenprobe	1,08	4,70	15,8	-	3
B11	Ofenprobe	0,78	5,25	14,9	-	6
B11	Saugkokille	2,98	-	-	-	6
B11	Bolzenprobe	1,05	4,70	15,7	8,92	6,5
B11	Bolzenprobe	1,24	4,40	16,3	8,93	3,5
B11	Bolzenprobe	1,06	4,65	16,2	8,92	0,5
B12	Ofenprobe	0,82	5,60	11,5	-	0
B12	Ofenprobe	0,91	6,20	13,8	-	3
B12	Ofenprobe	0,88	5,80	14,2	-	5
B12	Saugkokille	7,50	-	-	-	0
B12	Saugkokille	8,41	-	-	-	5
B12	Bolzenprobe	0,84	4,30	15,8	8,93	6,5
B12	Bolzenprobe	0,84	5,60	14,5	8,94	3,5
B12	Bolzenprobe	0,83	5,80	14	8,92	0,5
B13	Ofenprobe	1,28	6,20	12,2	-	0,5
B13	Ofenprobe	1,01	8,30	12,7	-	3,5
B13	Ofenprobe	0,85	5,70	12,6	-	5,5
B13	Bolzenprobe	0,75	5,80	13,2	8,94	6,5
B13	Bolzenprobe	1,05	5,90	13,4	8,93	3,5
B13	Bolzenprobe	1,43	5,30	16,1	8,94	0,5
B14	Ofenprobe	1,06	10,75	11,5	-	0
B14	Ofenprobe	0,89	7,50	12,4	-	3
B14	Ofenprobe	0,64	6,75	11	-	5
B14	Saugkokille	6,50	-	-	-	5
B14	Bolzenprobe	0,84	4,20	12,4	8,87	6,5
B14	Bolzenprobe	0,95	6,25	12,3	8,93	3,5
B14	Bolzenprobe	0,96	6,70	10,5	8,94	0,5
B15	Ofenprobe	1,52	6,70	13,9	-	0
B15	Ofenprobe	1,20	7,80	16,9	-	3
B15	Ofenprobe	1,07	6,70	16,9	-	5
B15	Saugkokille	4,16	-	-	-	5
B15	Bolzenprobe	1,16	4,40	16,4	8,93	6,5

B15	Bolzenprobe	1,36	6,50	17	8,92	3,5
B15	Bolzenprobe	1,50	8,25	14,7	8,93	0,5
B16	Ofenprobe	0,59	6,10	17,3	-	1
B16	Ofenprobe	0,77	5,20	17,6	-	3
B16	Ofenprobe	0,79	5,60	15,2	-	5
B16	Saugkokille	6,17	-	-	-	1
B16	Saugkokille	1,29	-	-	-	5
B16	Bolzenprobe	0,80	5,10	14,9	8,93	6,5
B16	Bolzenprobe	0,83	5,10	15,5	8,94	3,5
B16	Bolzenprobe	0,97	5,80	18,2	8,92	0,5
B17	Ofenprobe	0,94	5,60	13,7	-	0,5
B17	Ofenprobe	0,90	6,40	13,9	-	3,5
B17	Ofenprobe	0,88	3,80	13	-	5,5
B17	Bolzenprobe	0,83	3,10	13,1	8,95	6,5
B17	Bolzenprobe	0,89	5,20	14,2	8,95	3,5
B17	Bolzenprobe	0,99	5,50	13,2	8,95	0,5
B18	Ofenprobe	0,45	5,20	12	-	0,5
B18	Ofenprobe	0,85	5,30	14,2	-	3,5
B18	Ofenprobe	0,34	6,60	15,1	-	5,5
B18	Bolzenprobe	0,80	6,40	16,2	8,94	6,5
B18	Bolzenprobe	0,92	5,00	14,7	8,94	3,5
B18	Bolzenprobe	1,01	6,15	10,9	8,94	0,5
B19	Ofenprobe	1,35	6,20	13,6	-	0,5
B19	Ofenprobe	1,28	4,10	14,7	-	3,5
B19	Ofenprobe	1,09	6,40	12,3	-	5,5
B19	Bolzenprobe	0,93	6,15	11,6	8,94	6,5
B19	Bolzenprobe	0,98	3,35	14,2	8,94	3,5
B19	Bolzenprobe	1,47	4,25	13,8	8,94	0,5
B20	Ofenprobe	1,77	6,50	12,3	-	0,5
B20	Ofenprobe	1,41	5,10	11,7	-	3,5
B20	Ofenprobe	0,97	7,70	12,5	-	5,5
B20	Bolzenprobe	1,13	6,70	11,9	8,94	6,5
B20	Bolzenprobe	1,32	4,10	11,8	8,94	3,5
B20	Bolzenprobe	1,28	6,50	11,8	8,95	0,5

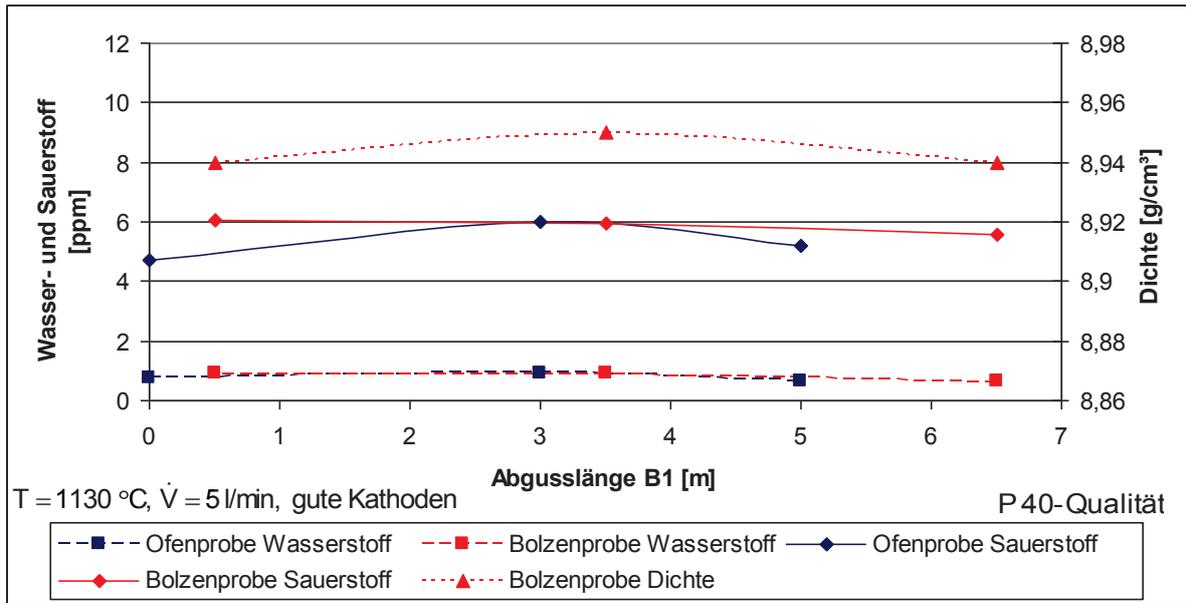


Diagramm 12.59: Versuch B1; Abguss P 40- Qualität

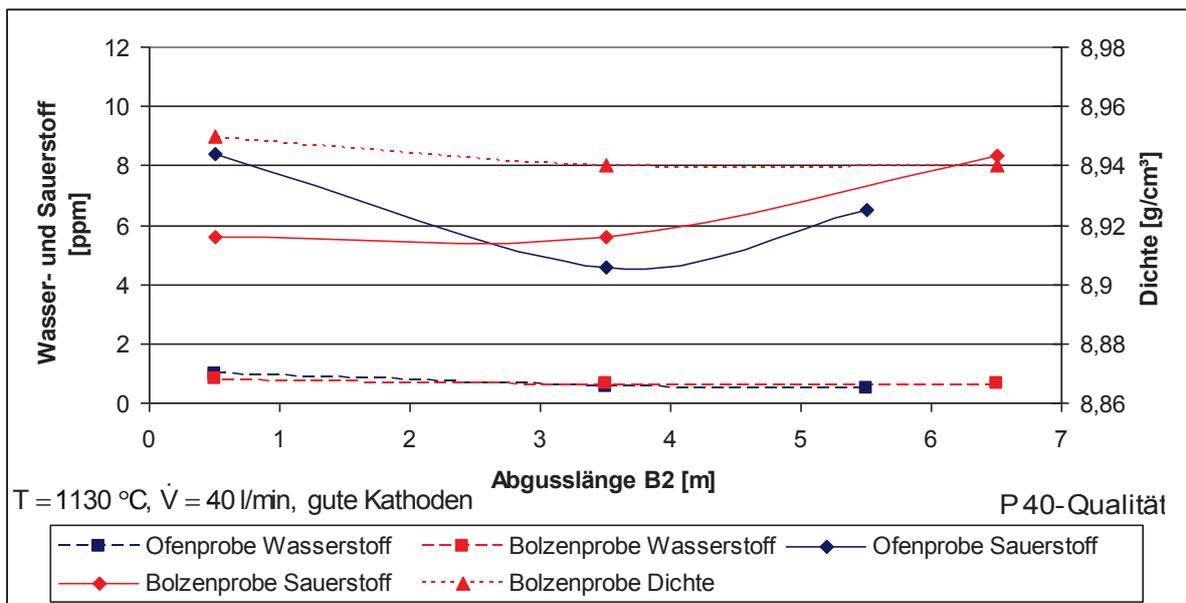


Diagramm 12.60: Versuch B2; Abguss P 40- Qualität

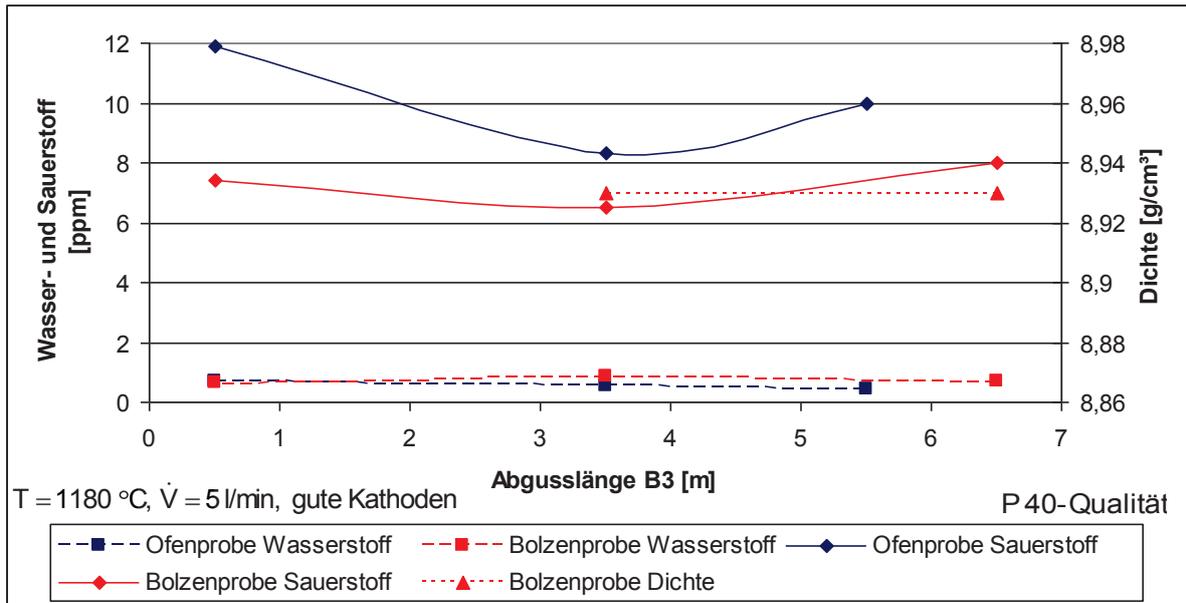


Diagramm 12.61: Versuch B3; Abguss P 40-Qualität

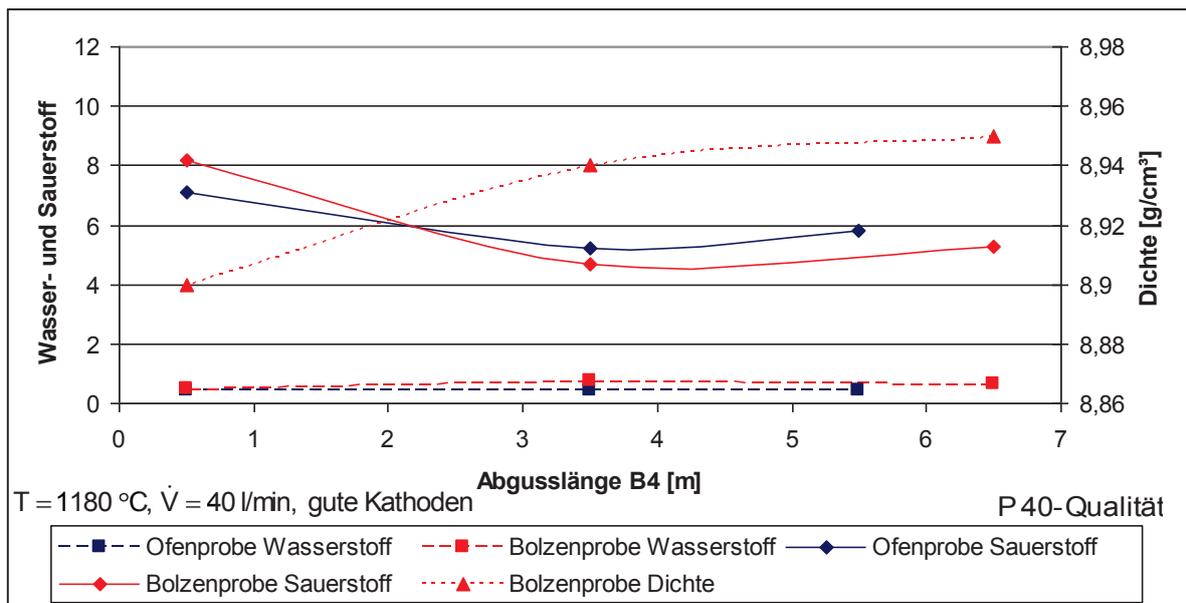


Diagramm 12.62: Versuch B4; Abguss P 40-Qualität

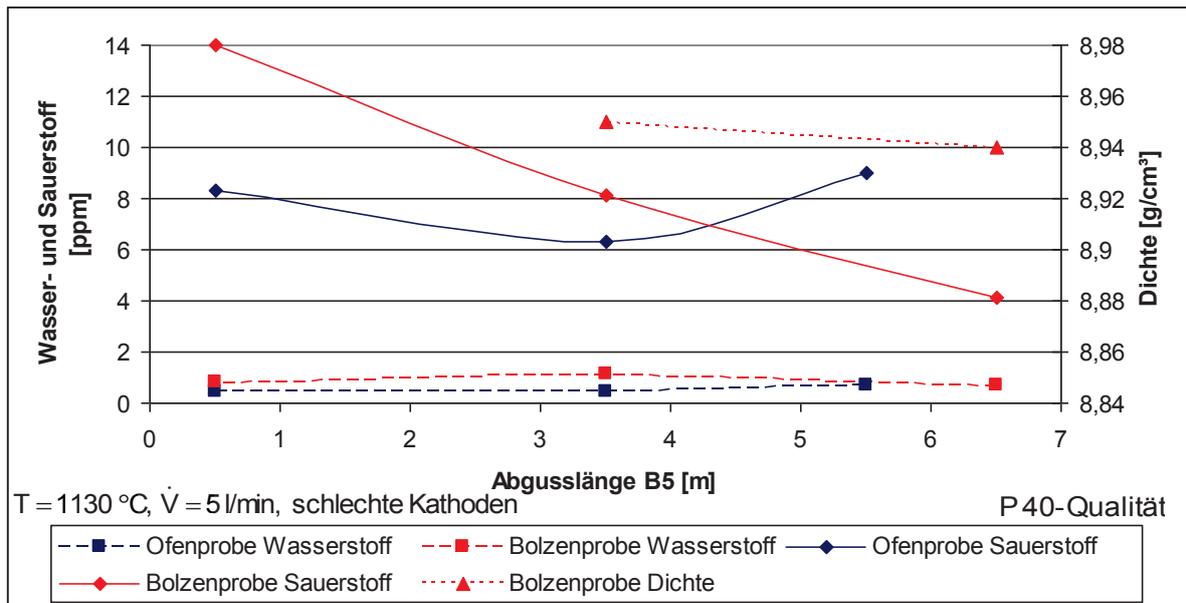


Diagramm 12.63: Versuch B5; Abguss P 40-Qualität

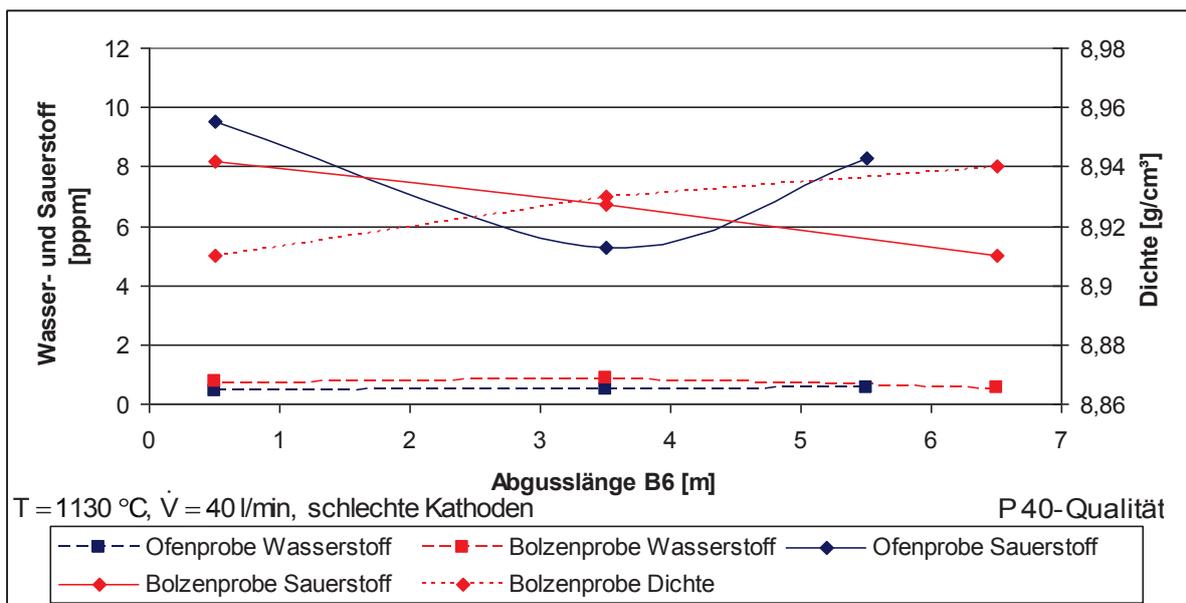


Diagramm 12.64: Versuch B6; Abguss P 40-Qualität

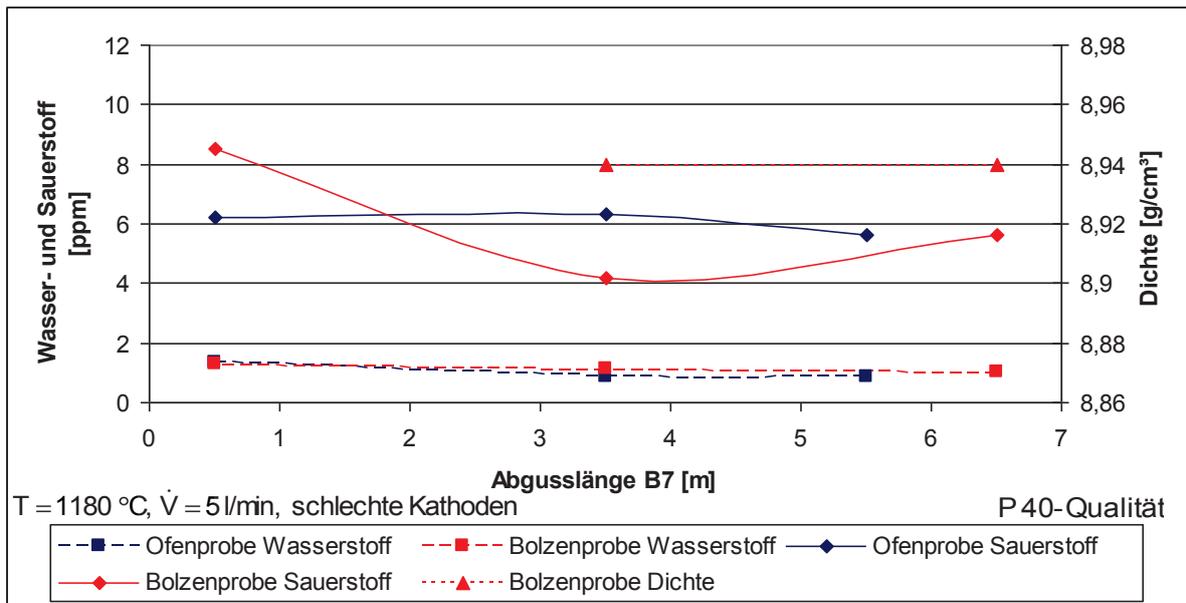


Diagramm 12.65: Versuch B7; Abguss P 40-Qualität

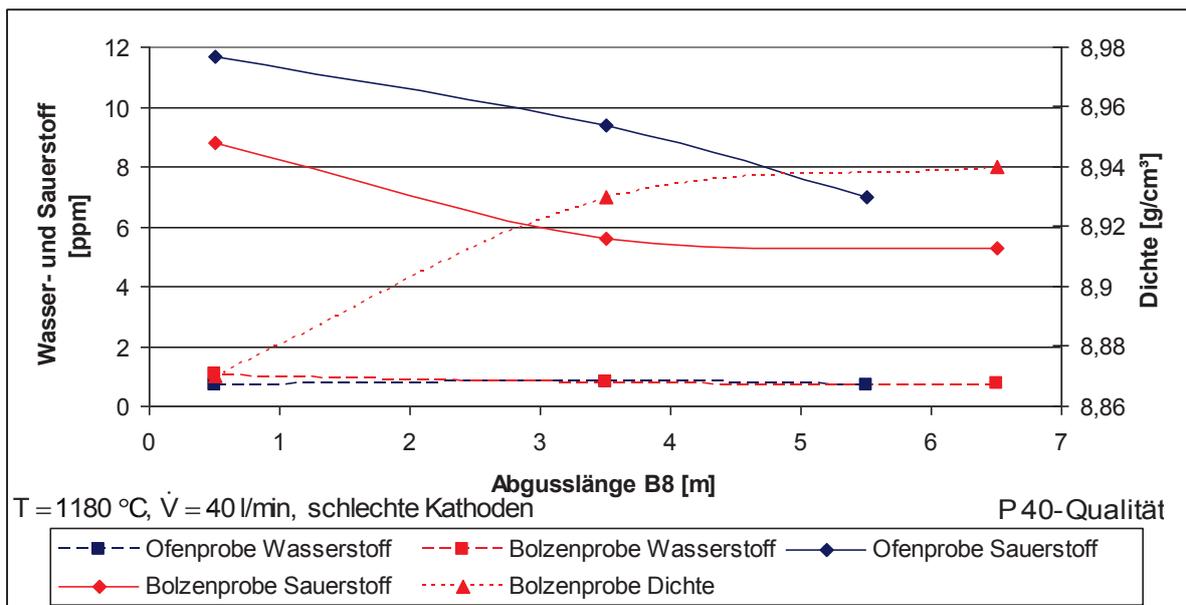


Diagramm 12.66: Versuch B8; Abguss P 40-Qualität

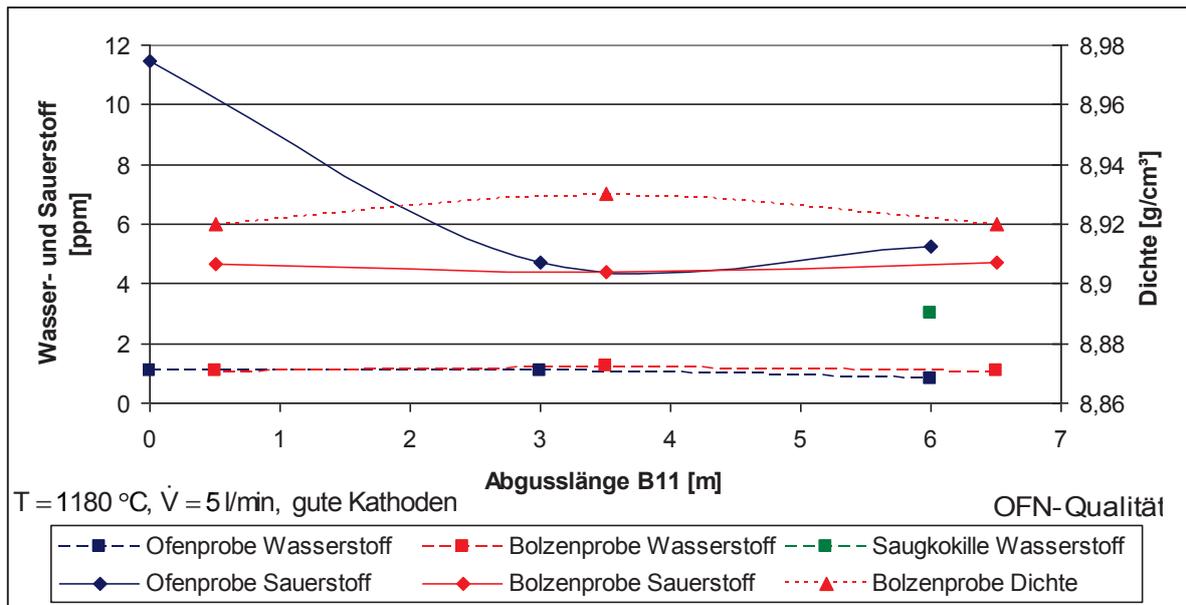


Diagramm 12.67: Versuch B11; Abguss OFN-Qualität

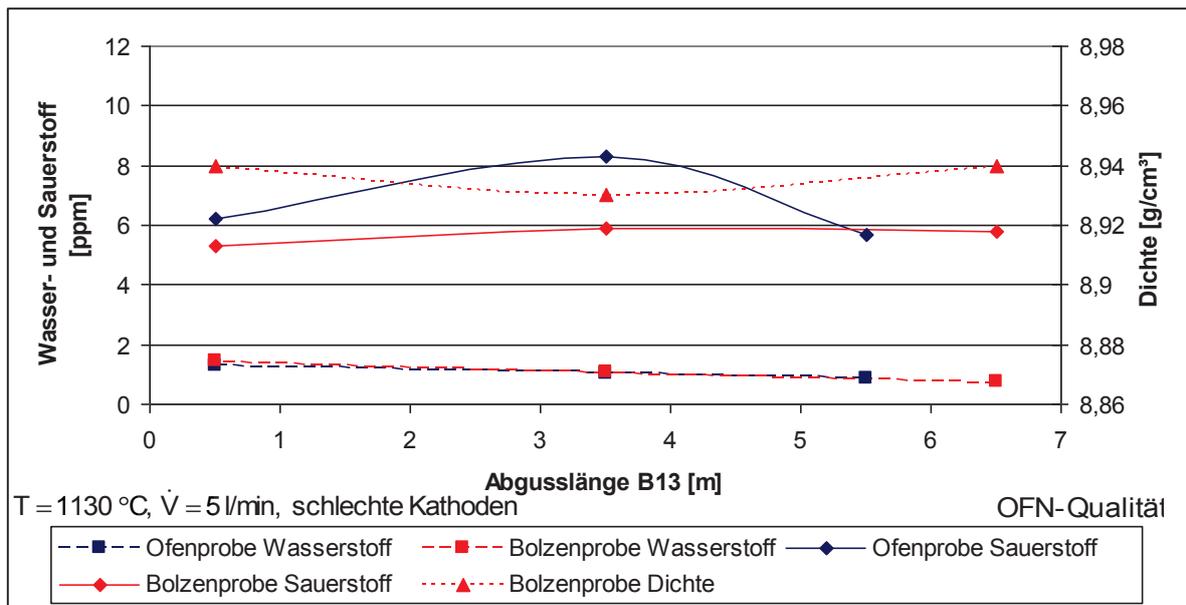


Diagramm 12.68: Versuch B13; Abguss OFN-Qualität

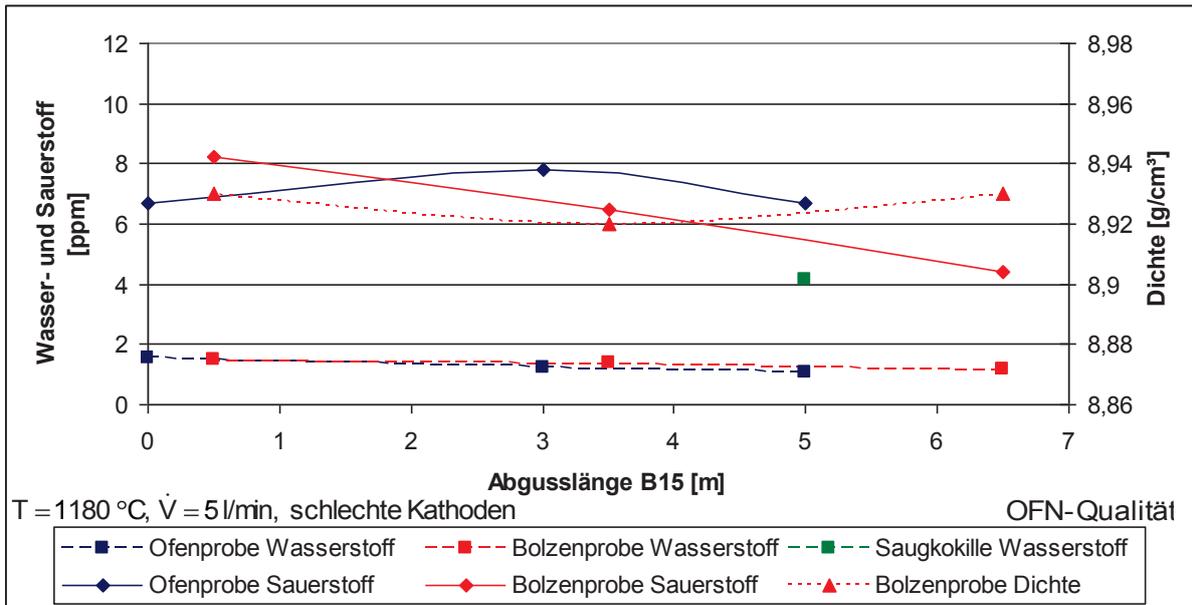


Diagramm 12.69: Versuch B15; Abguss OFN-Qualität

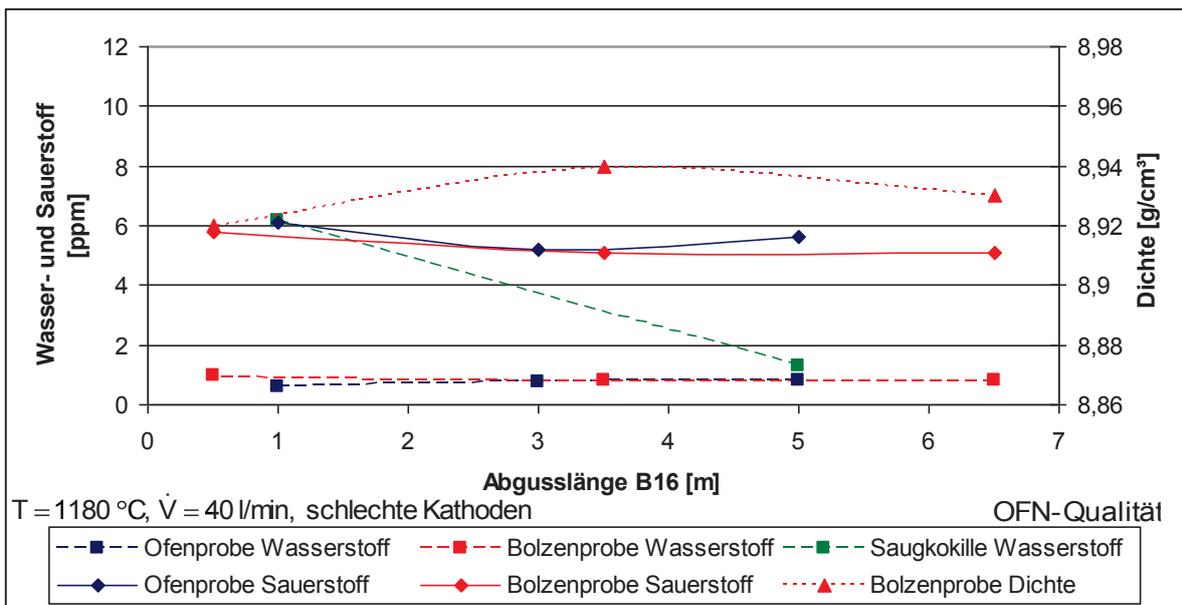


Diagramm 12.70: Versuch B16; Abguss OFN-Qualität

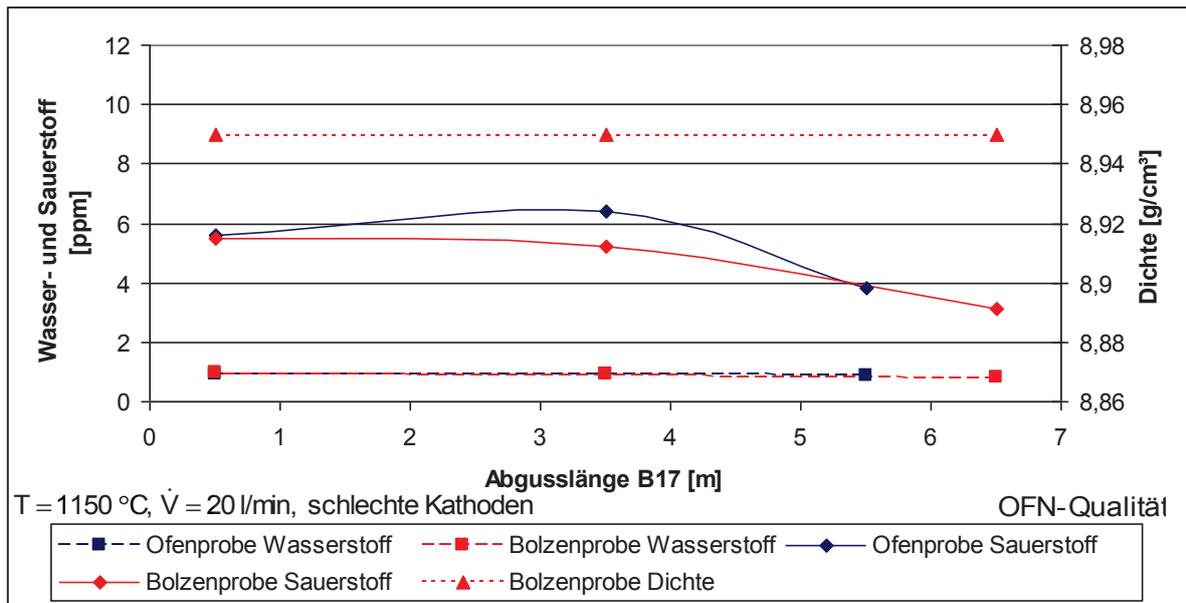


Diagramm 12.71: Versuch B17; Abguss OFN-Qualität

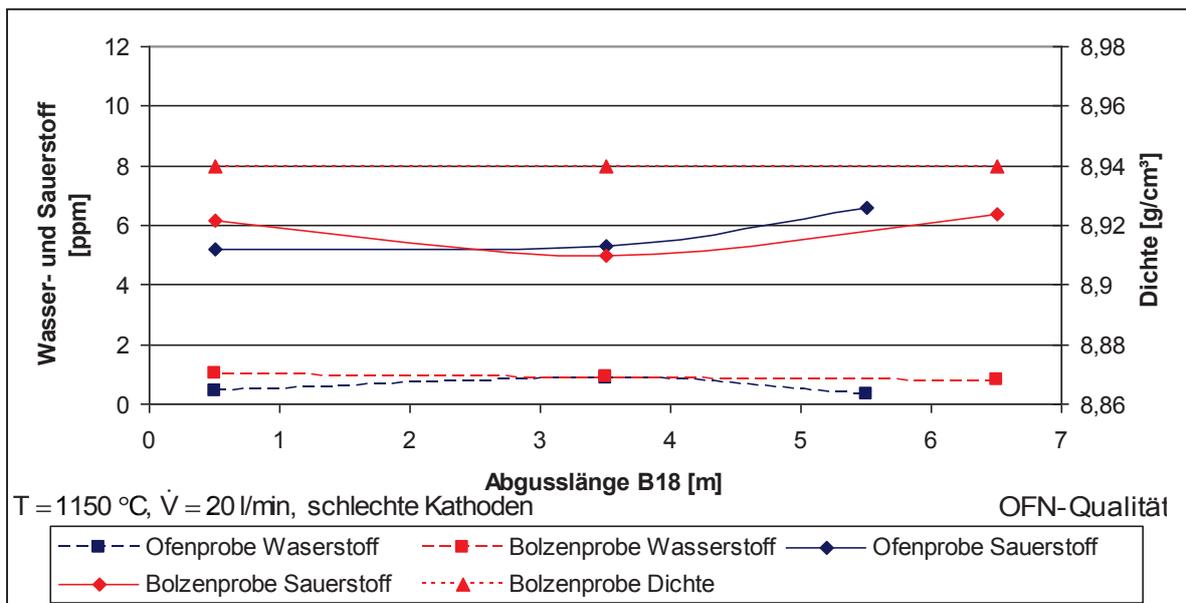


Diagramm 12.72: Versuch B18; Abguss OFN-Qualität

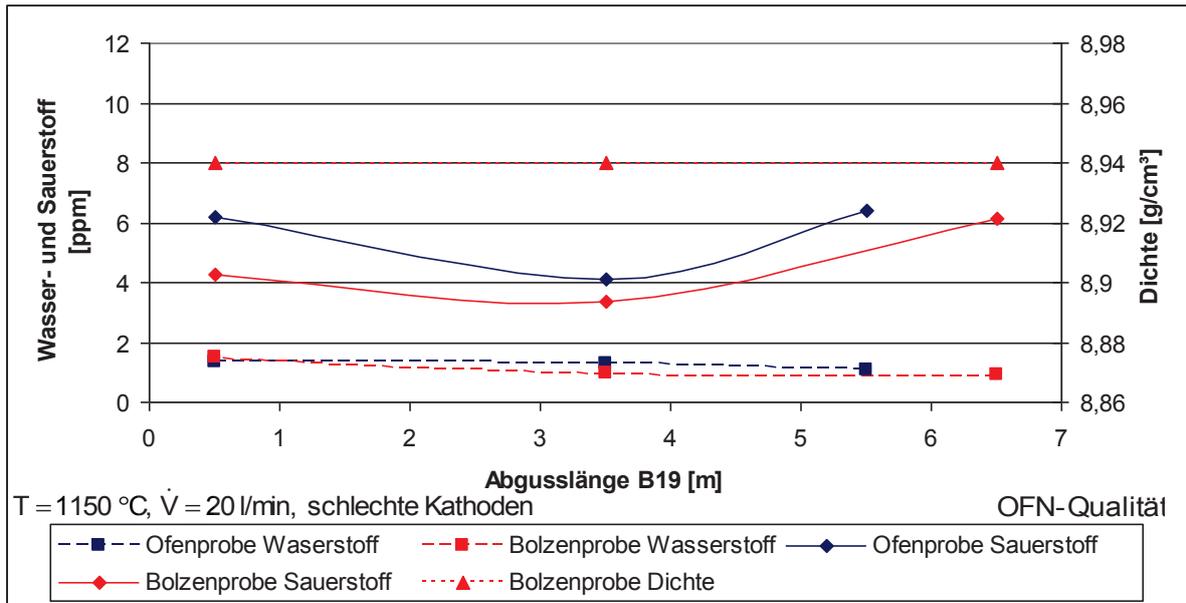


Diagramm 12.73: Versuch B19; Abguss OFN-Qualität

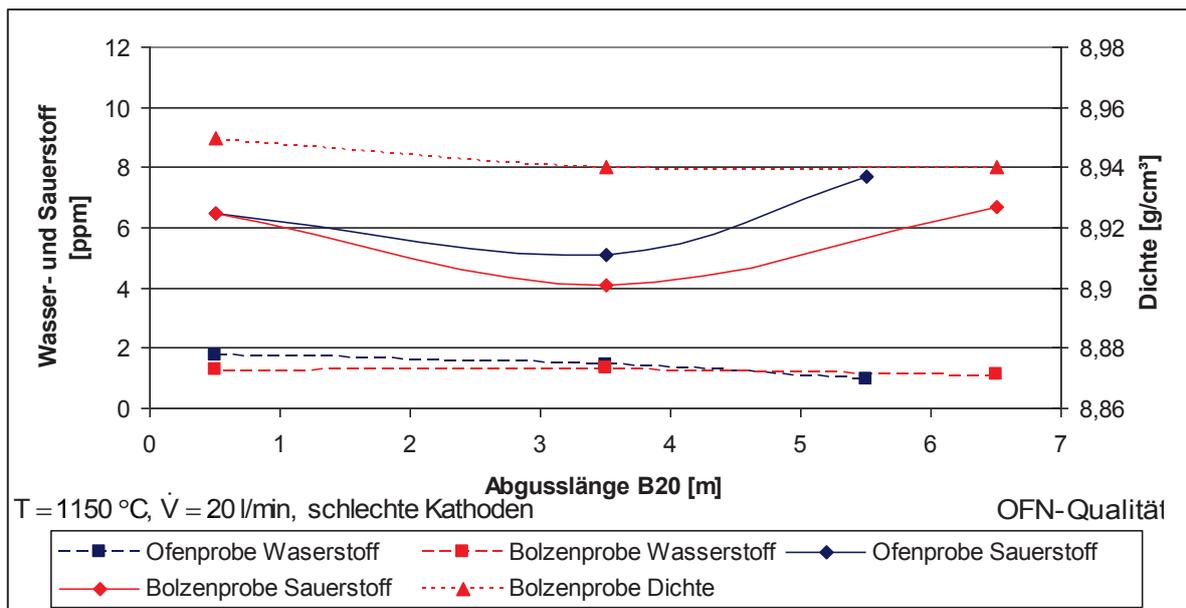


Diagramm 12.74: Versuch B20; Abguss OFN-Qualität

12.3.2 Einsatz guter und schlechter Kathoden im Vergleich

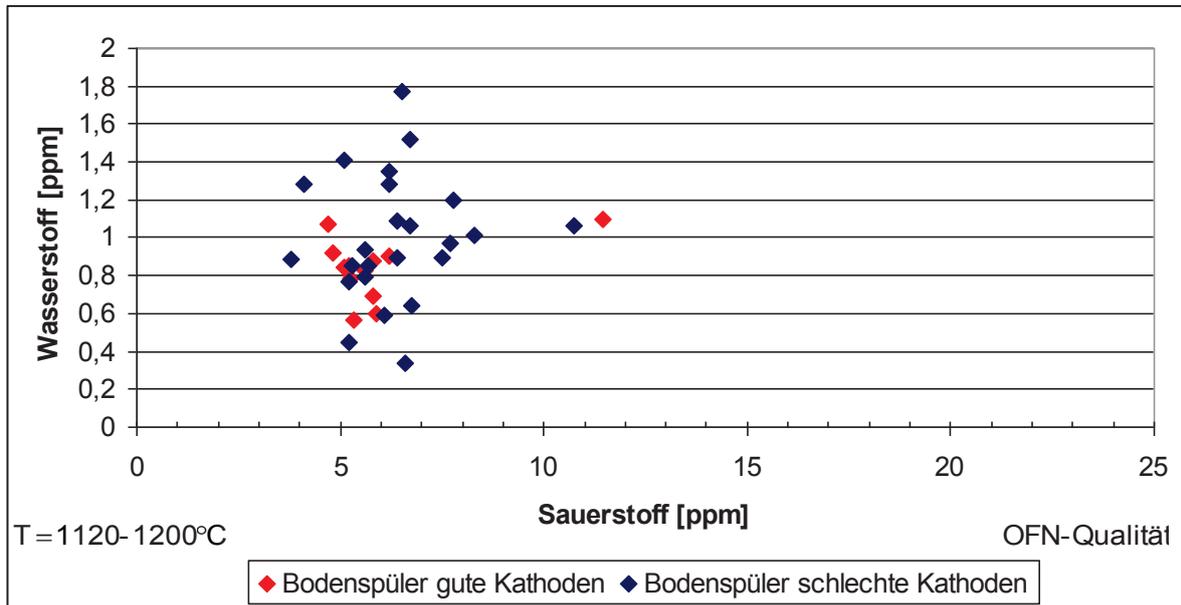


Diagramm 12.75: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen

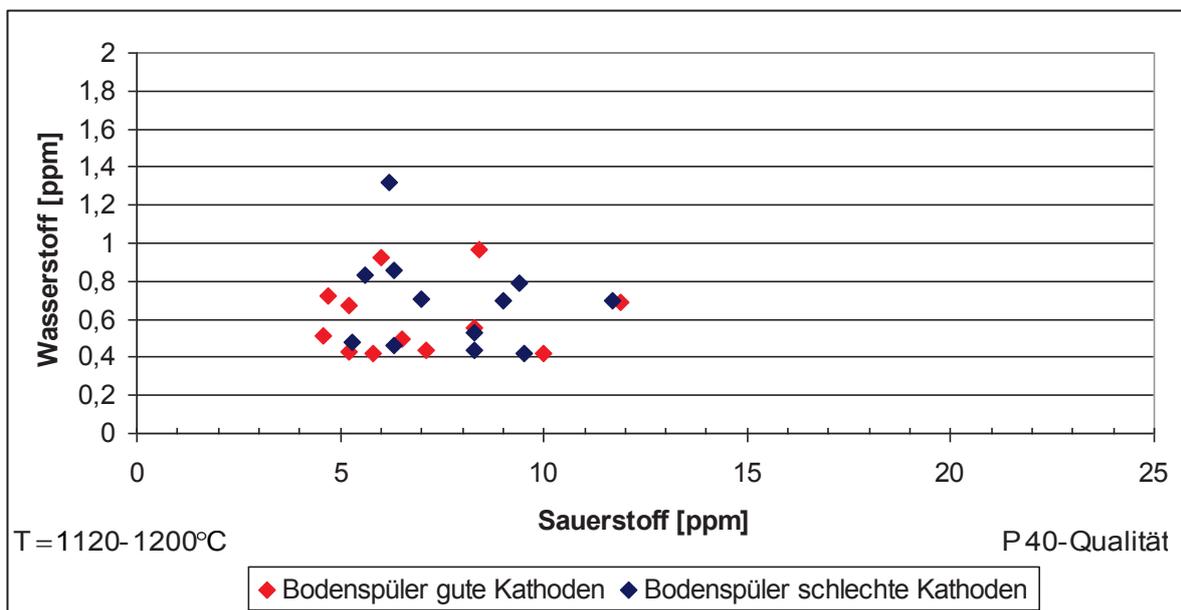


Diagramm 12.76: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

12.4 Vergleich der Gasgehalte über die Abgusslänge

12.4.1 Vergleich des Wasserstoffgehalts über die Abgusslänge

12.4.1.1 Ohne Spülbehandlung

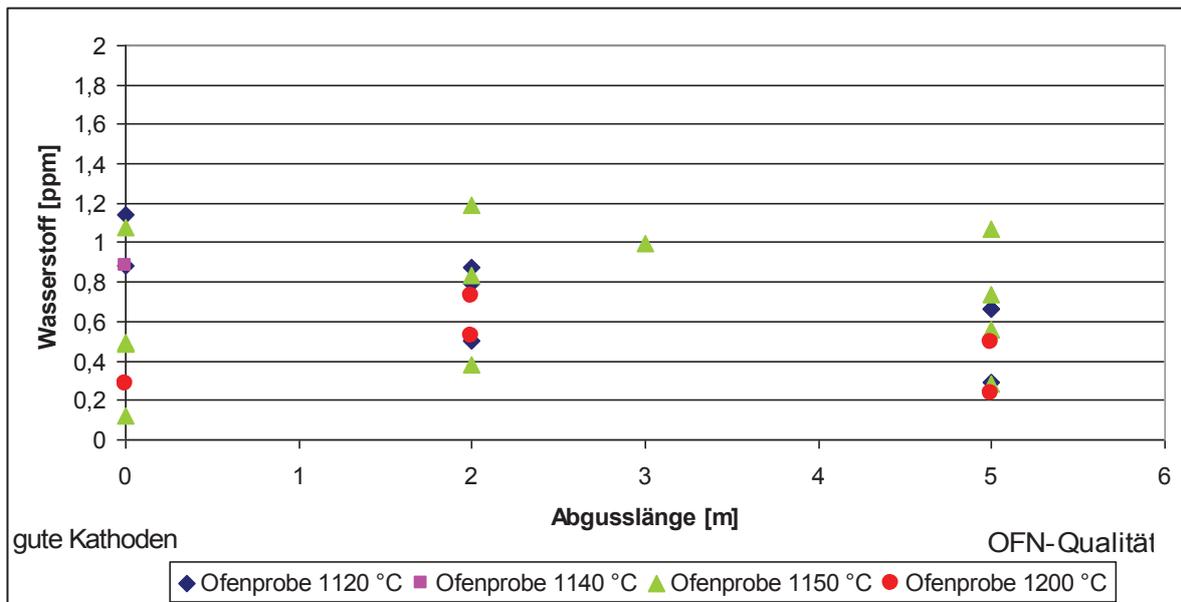


Diagramm 12.77: OFN-Qualität, gute Kathoden

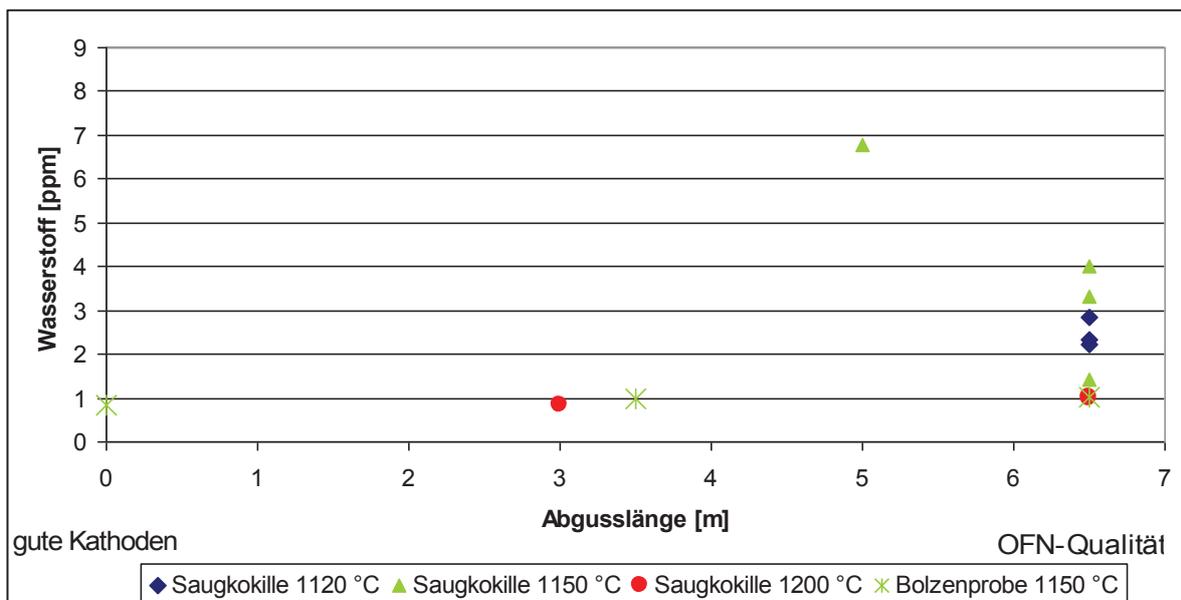


Diagramm 12.78: OFN-Qualität, gute Kathoden

12.4.1.2 Impeller

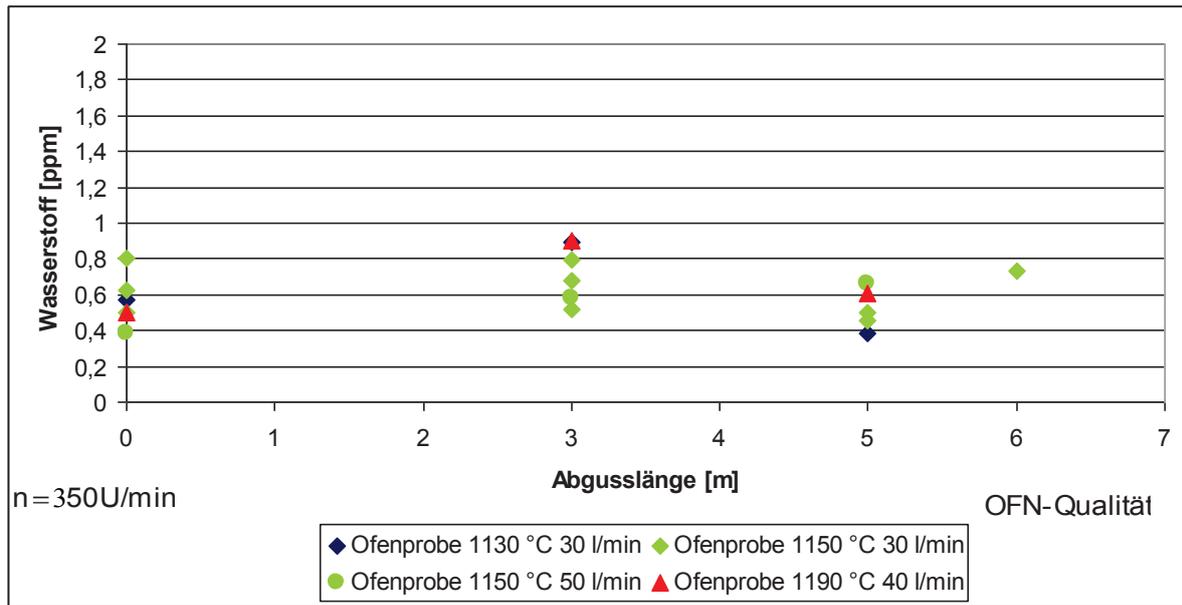


Diagramm 12.79: OFN-Qualität, gute Kathoden

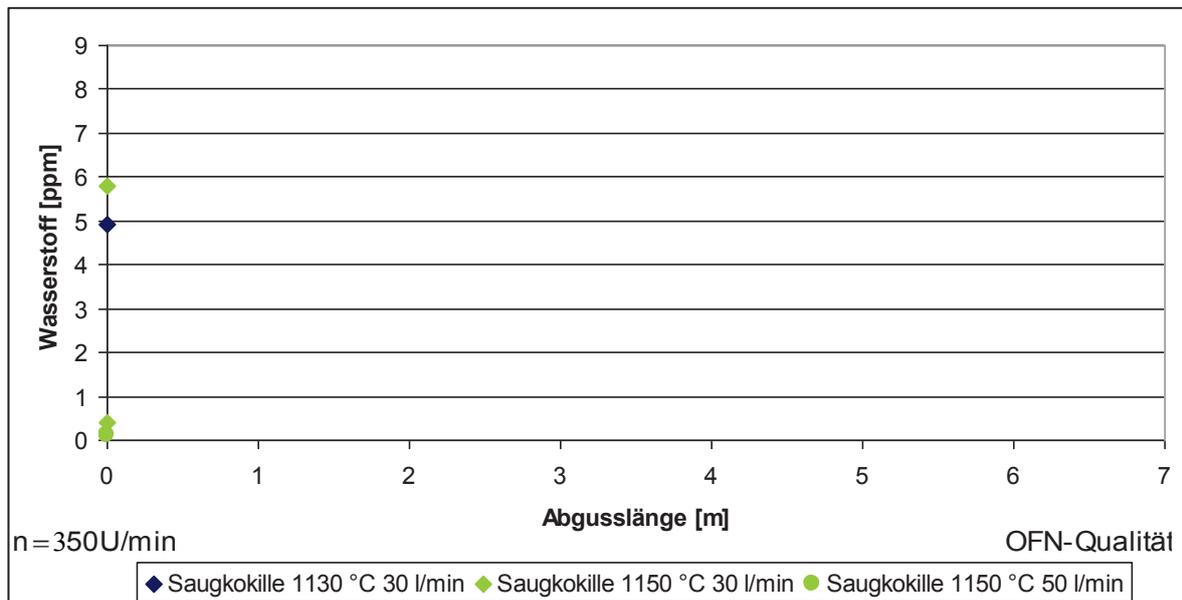


Diagramm 12.80: OFN-Qualität, gute Kathoden

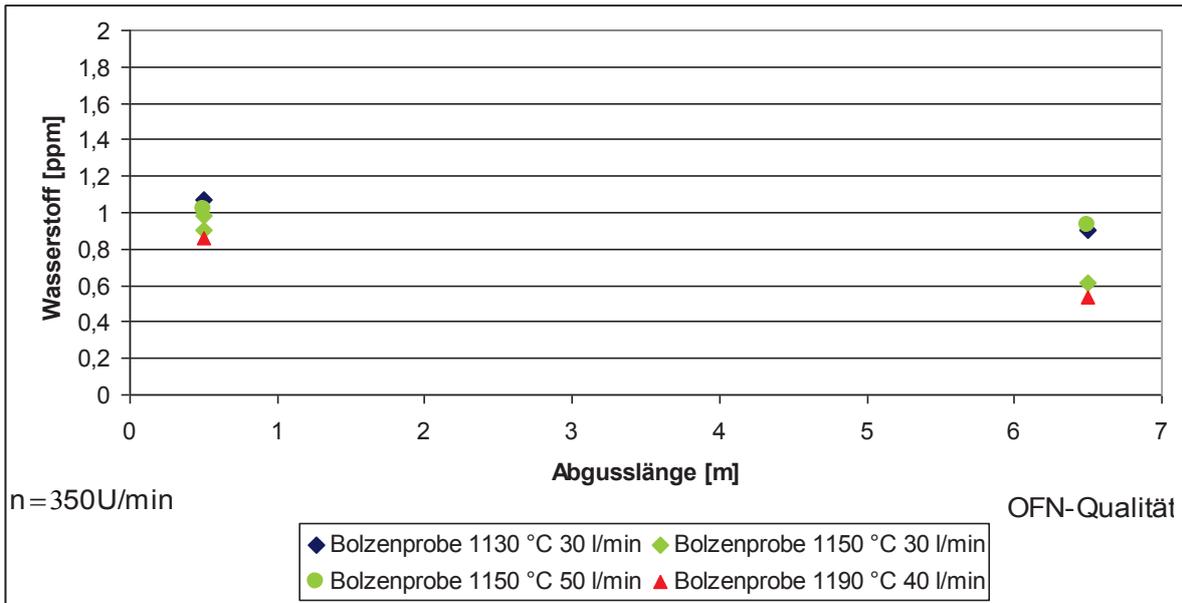


Diagramm 12.81: OFN-Qualität, gute Kathoden

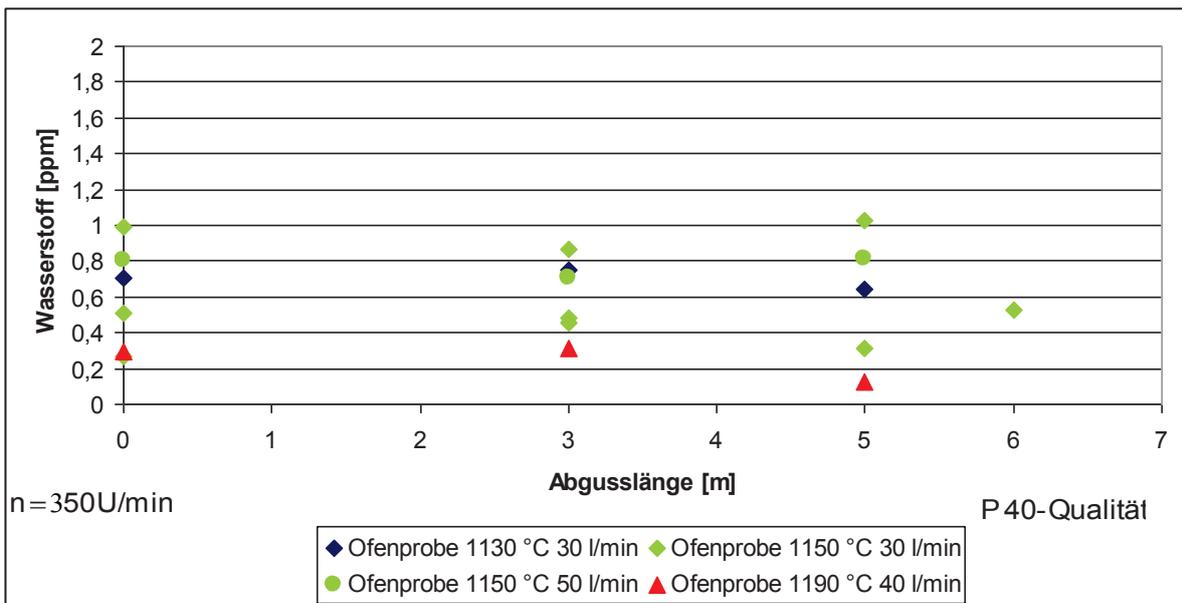


Diagramm 12.82: P 40-Qualität, gute Kathoden

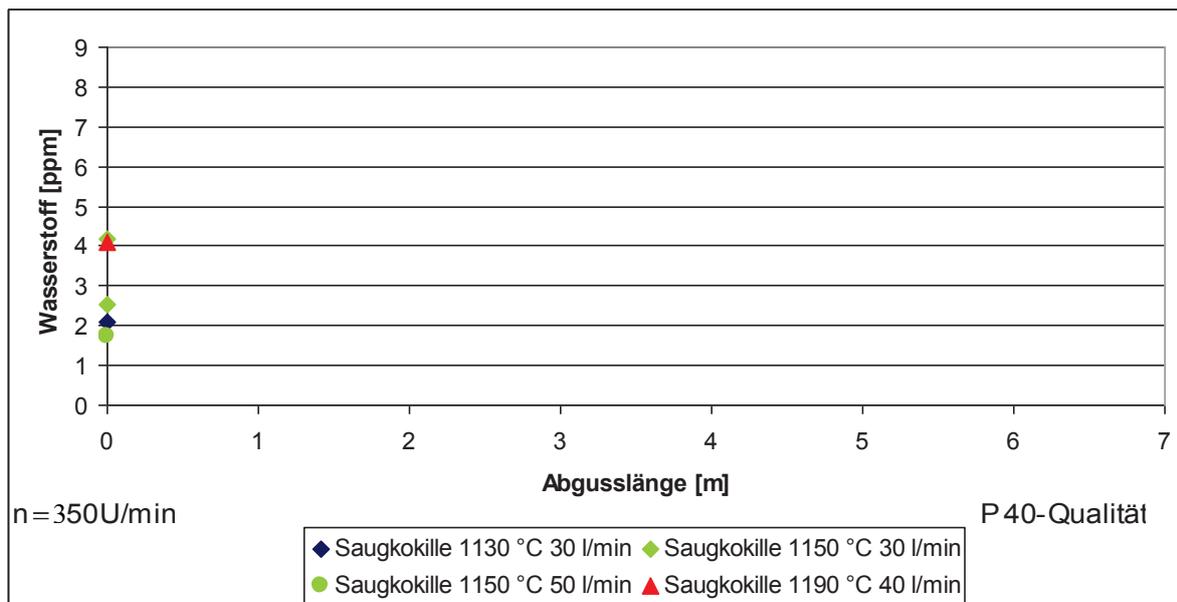


Diagramm 12.83: P 40-Qualität, gute Kathoden

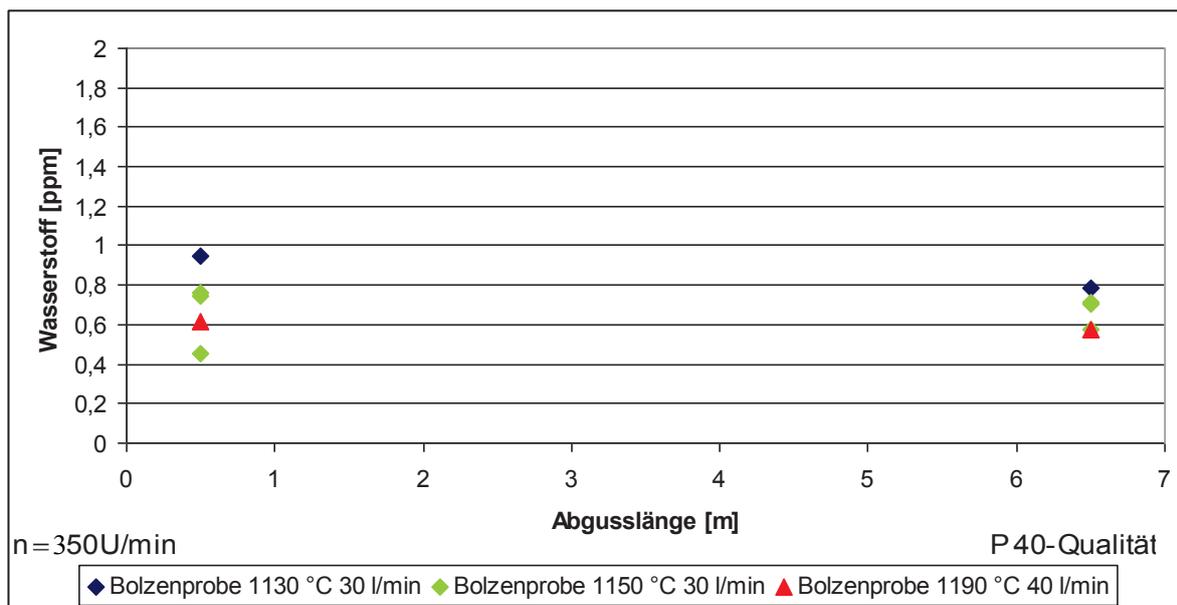


Diagramm 12.84: P 40-Qualität, gute Kathoden

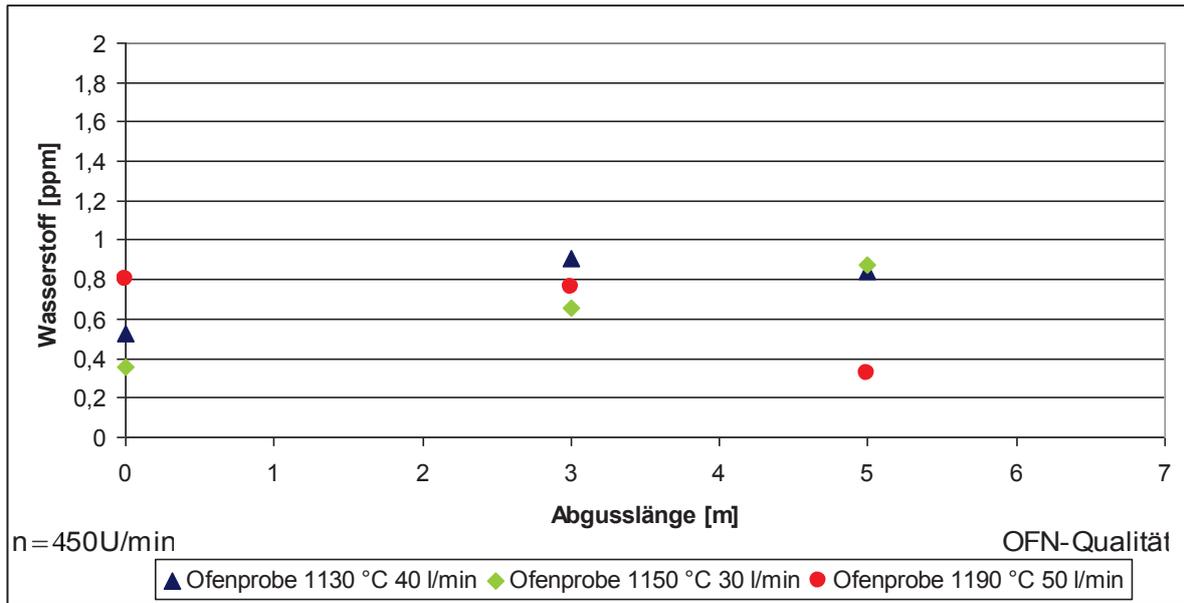


Diagramm 12.85: OFN-Qualität, gute Kathoden

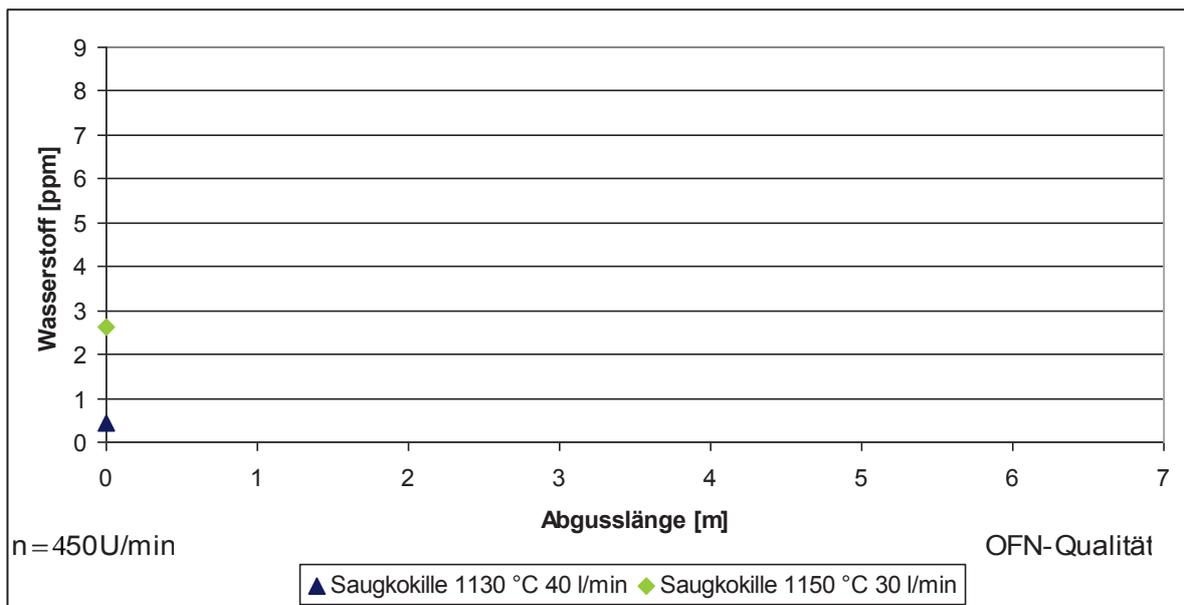


Diagramm 12.86: OFN-Qualität, gute Kathoden

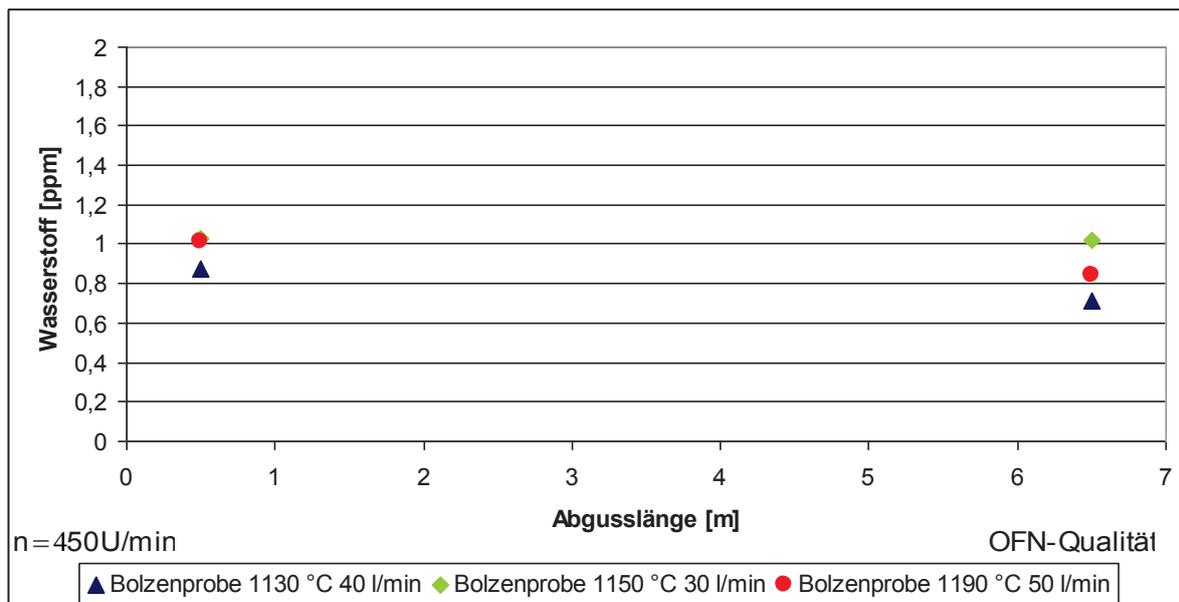


Diagramm 12.87: OFN-Qualität, gute Kathoden

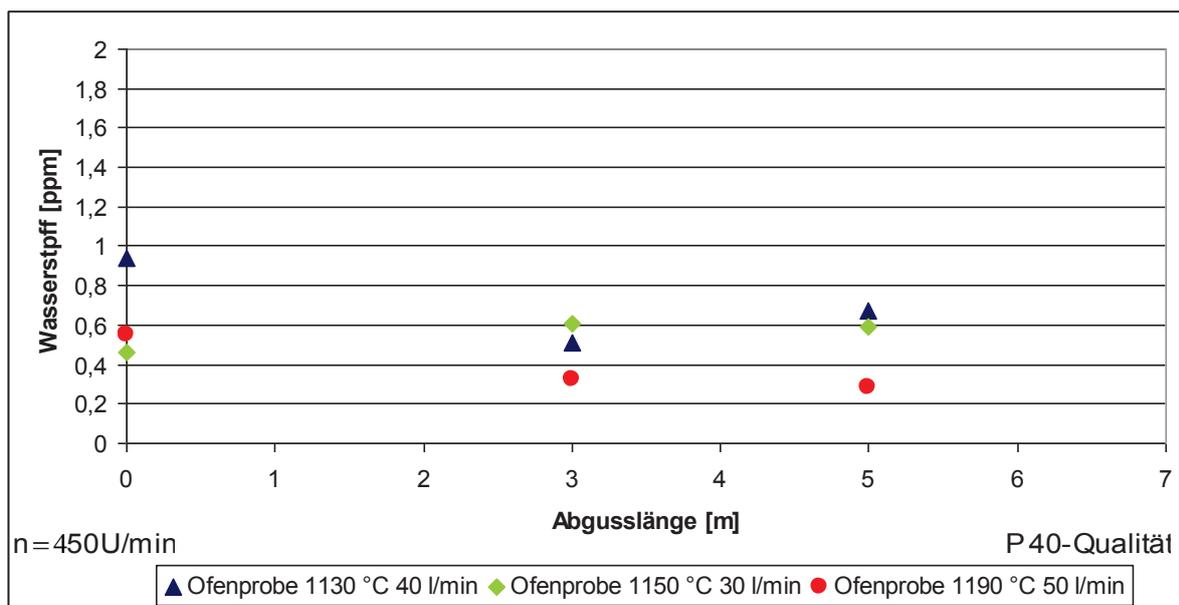


Diagramm 12.88: P 40-Qualität, gute Kathoden

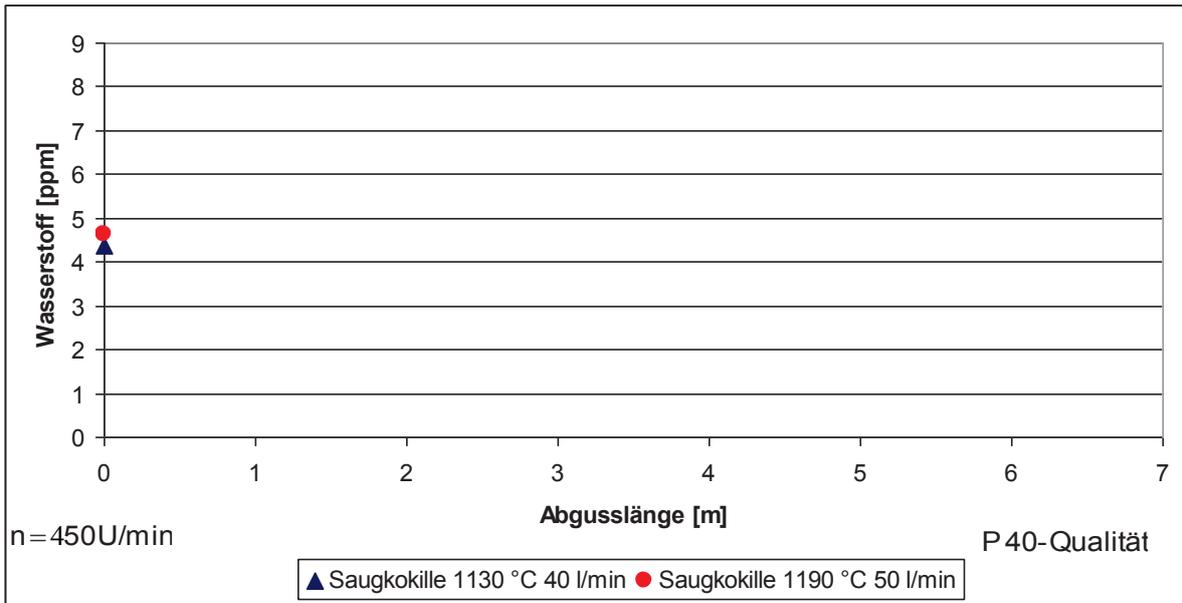


Diagramm 12.89: P 40-Qualität, gute Kathoden

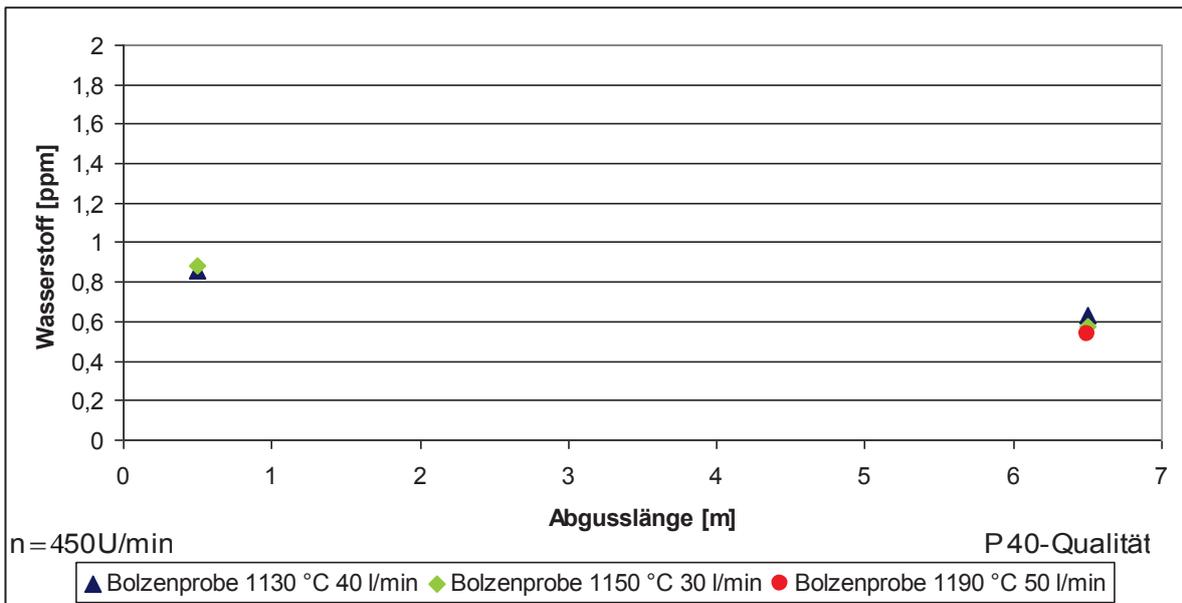


Diagramm 12.90: P 40-Qualität, gute Kathoden

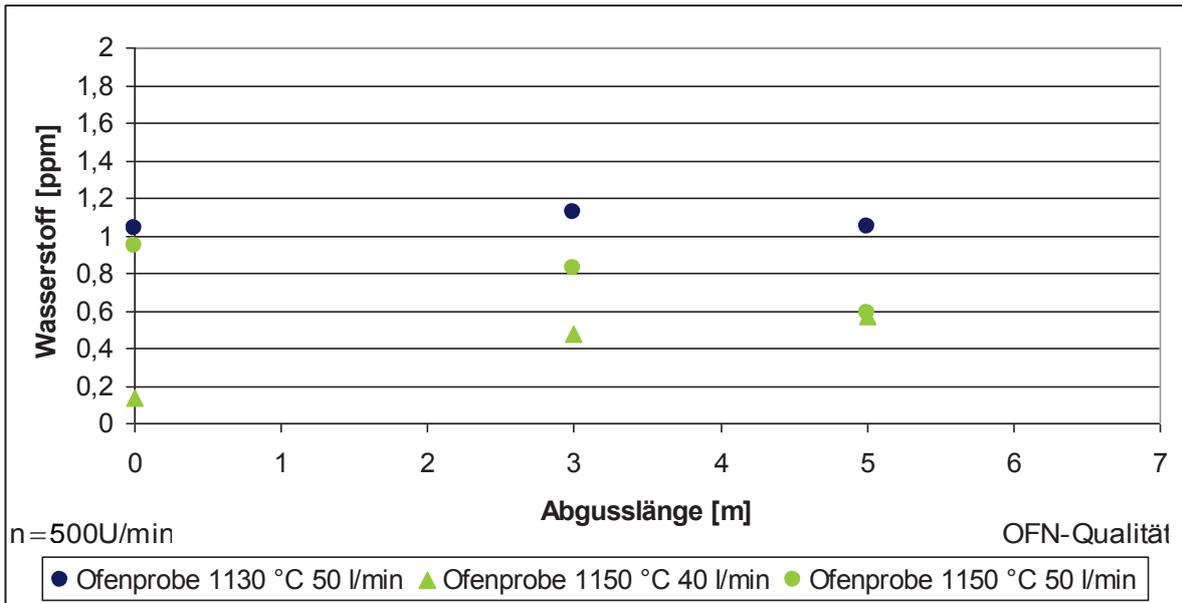


Diagramm 12.91: OFN-Qualität, gute Kathoden

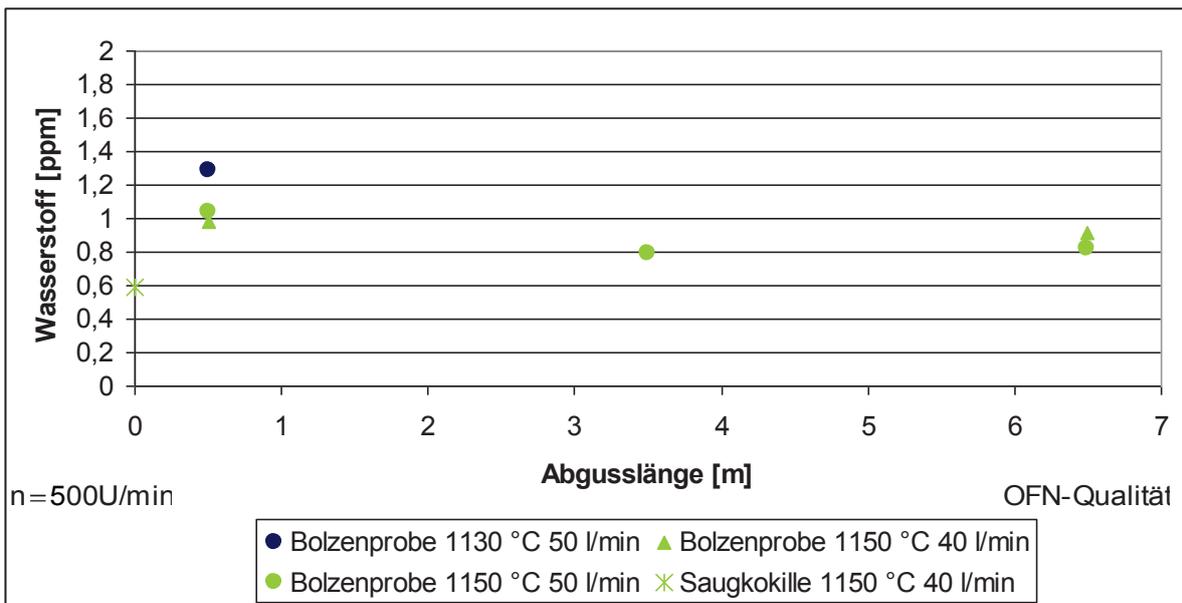


Diagramm 12.92: OFN-Qualität, gute Kathoden

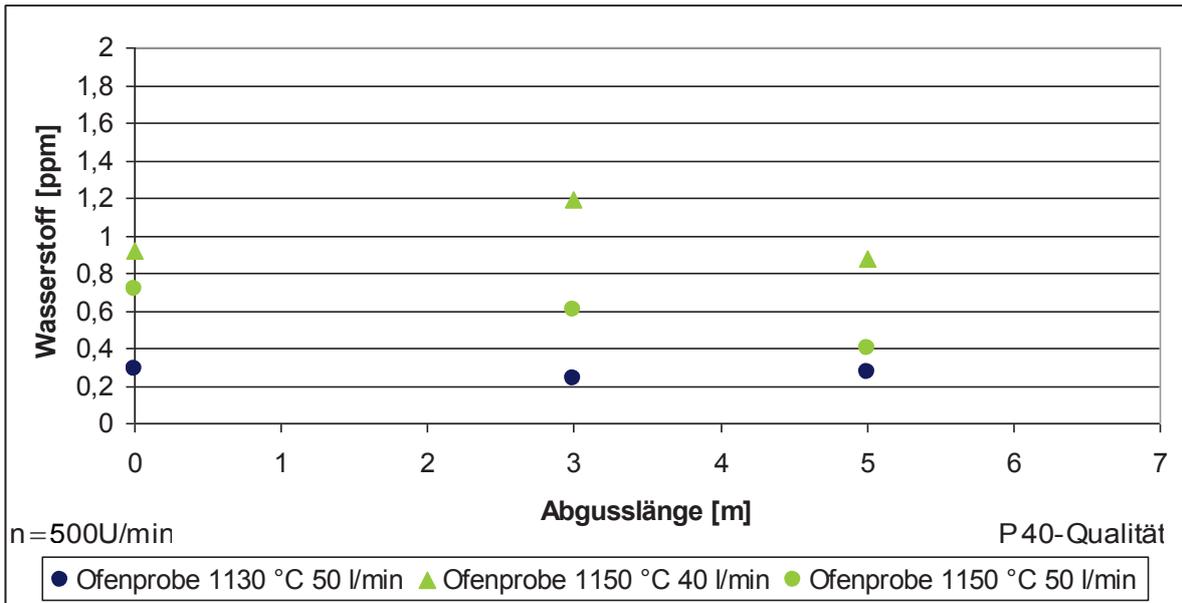


Diagramm 12.93: P 40-Qualität, gute Kathoden

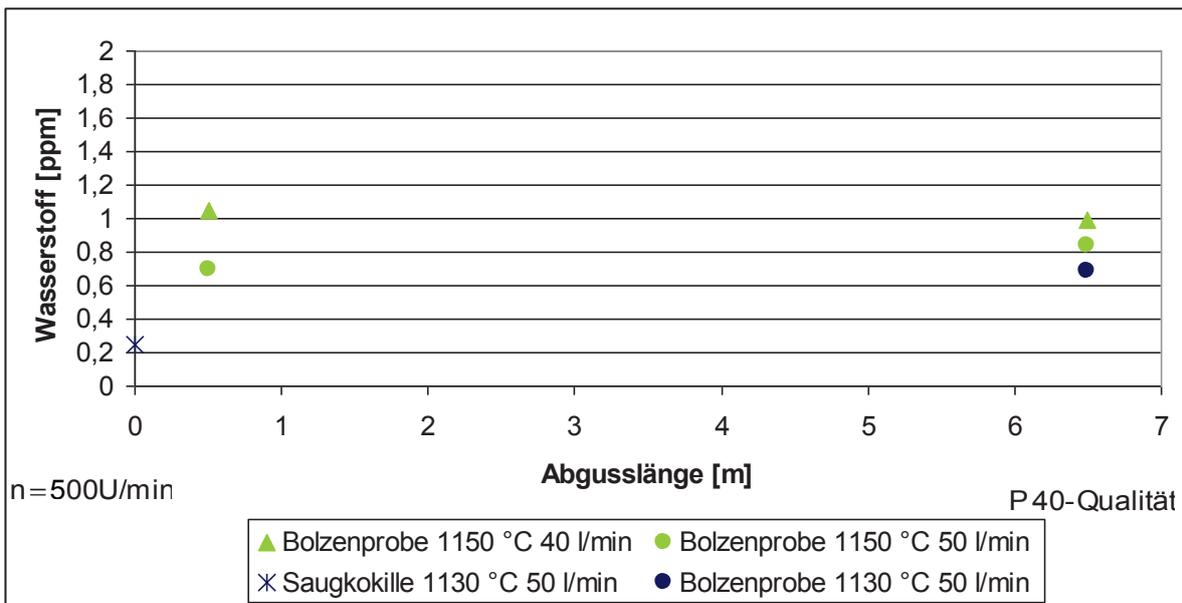


Diagramm 12.94: P 40-Qualität, gute Kathoden

12.4.1.3 Bodenspüler

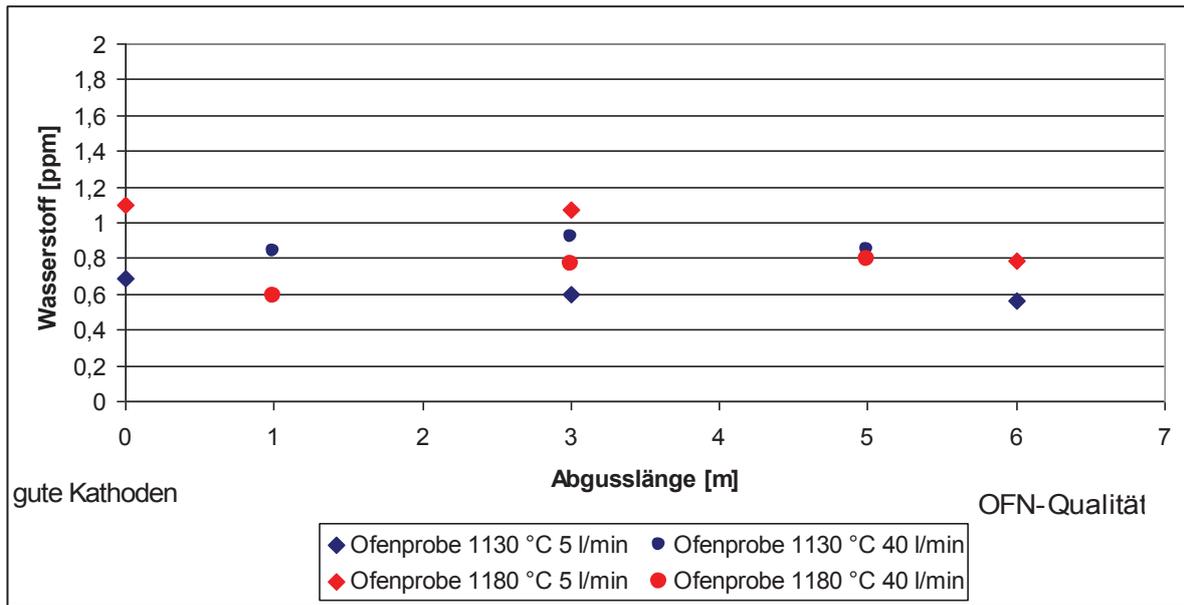


Diagramm 12.95: OFN-Qualität, gute Kathoden

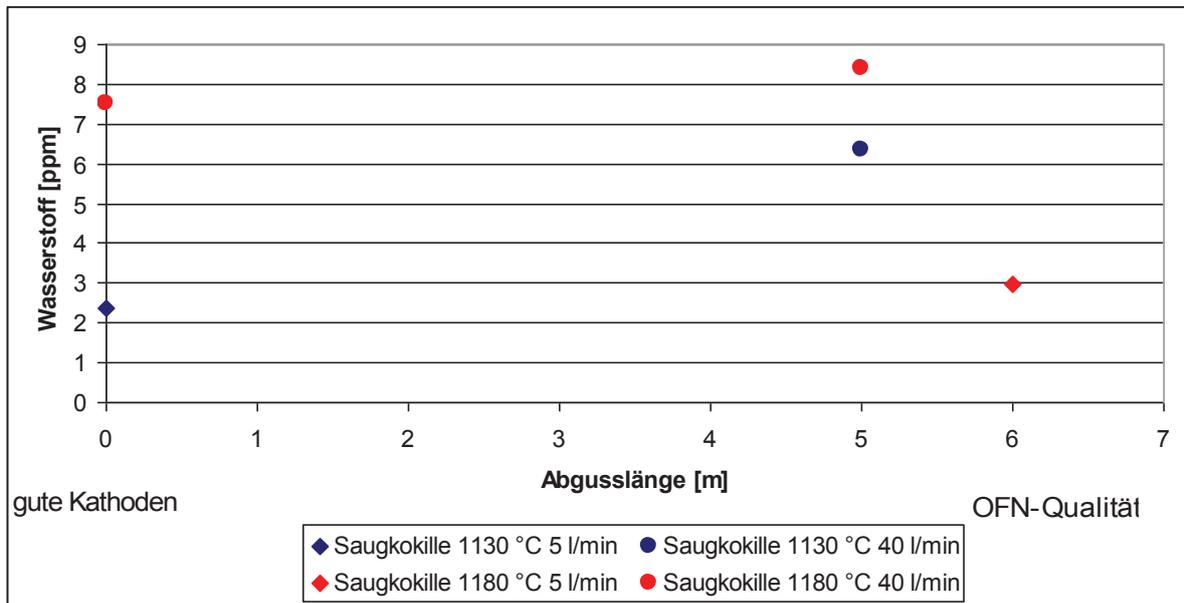


Diagramm 12.96: OFN-Qualität, gute Kathoden

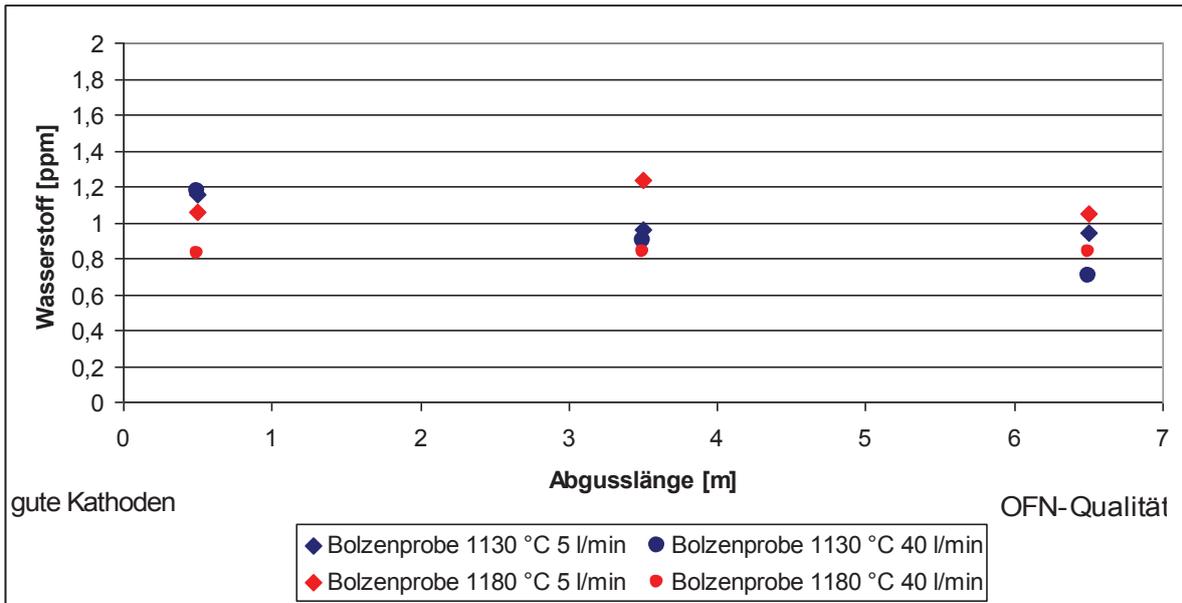


Diagramm 12.97: OFN-Qualität, gute Kathoden

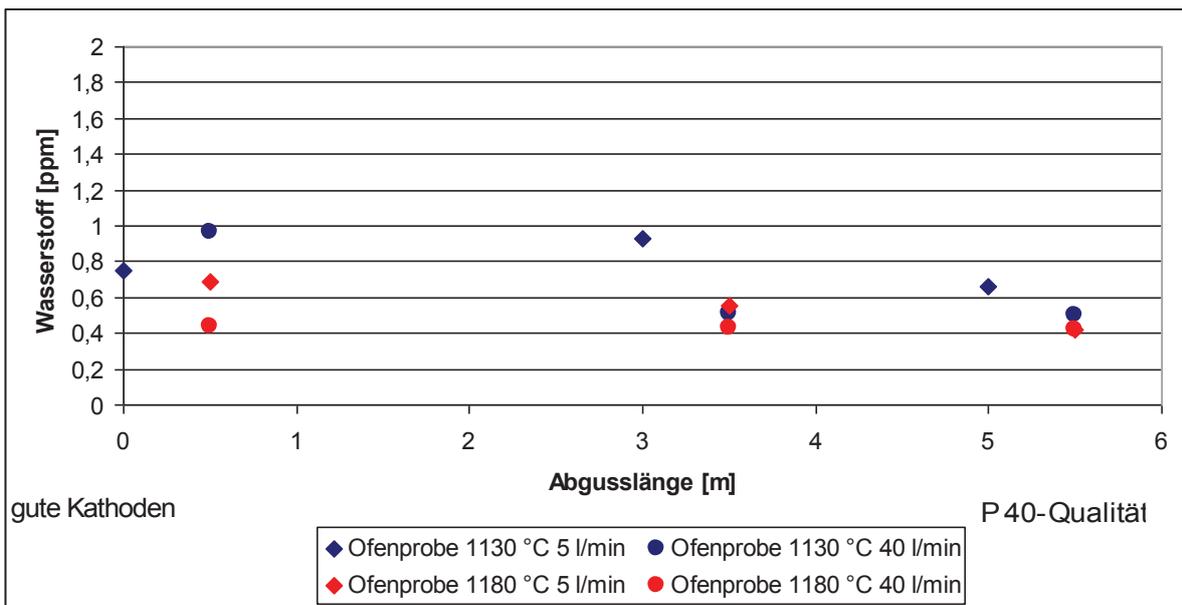


Diagramm 12.98: P 40-Qualität, gute Kathoden

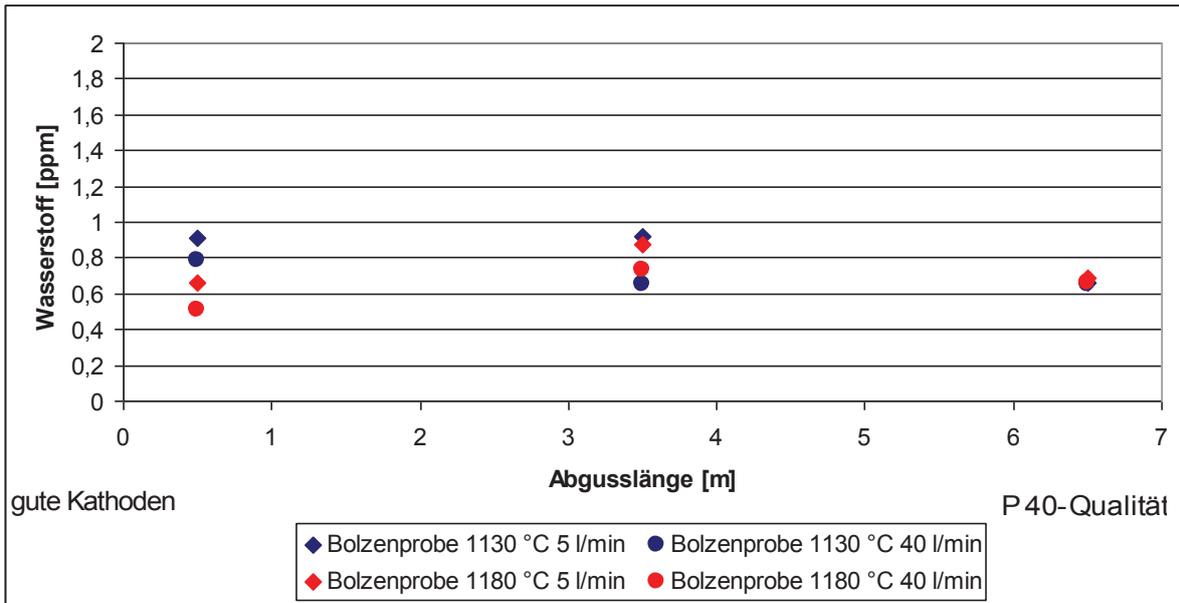


Diagramm 12.99: P 40-Qualität, gute Kathoden

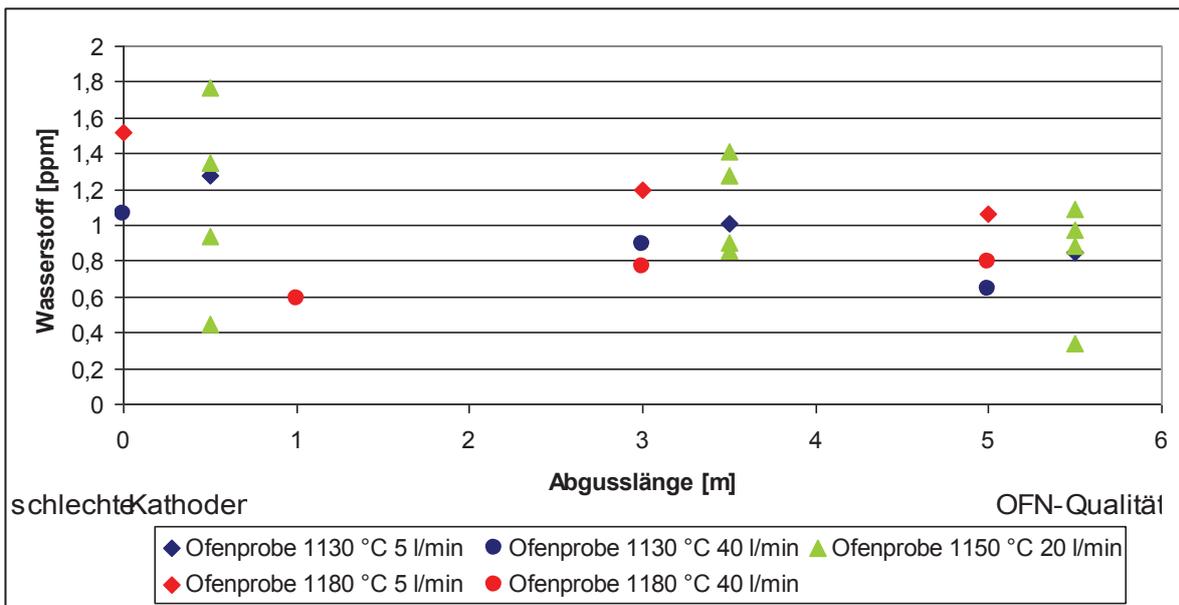


Diagramm 12.100: OFN-Qualität, schlechte Kathoden

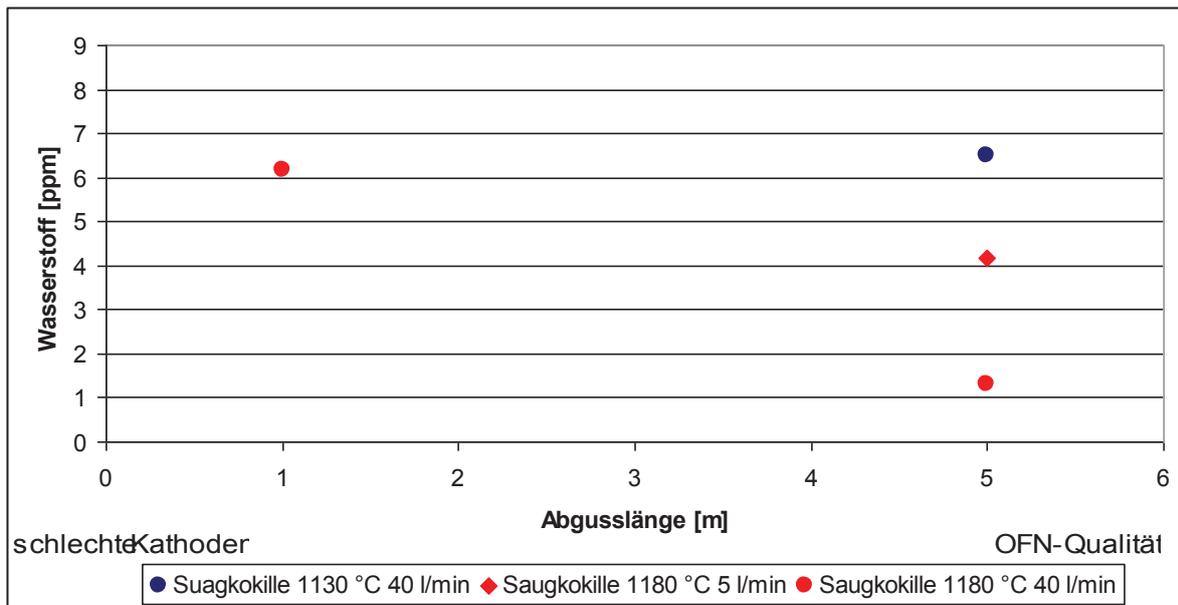


Diagramm 12.101: OFN-Qualität, schlechte Kathoden

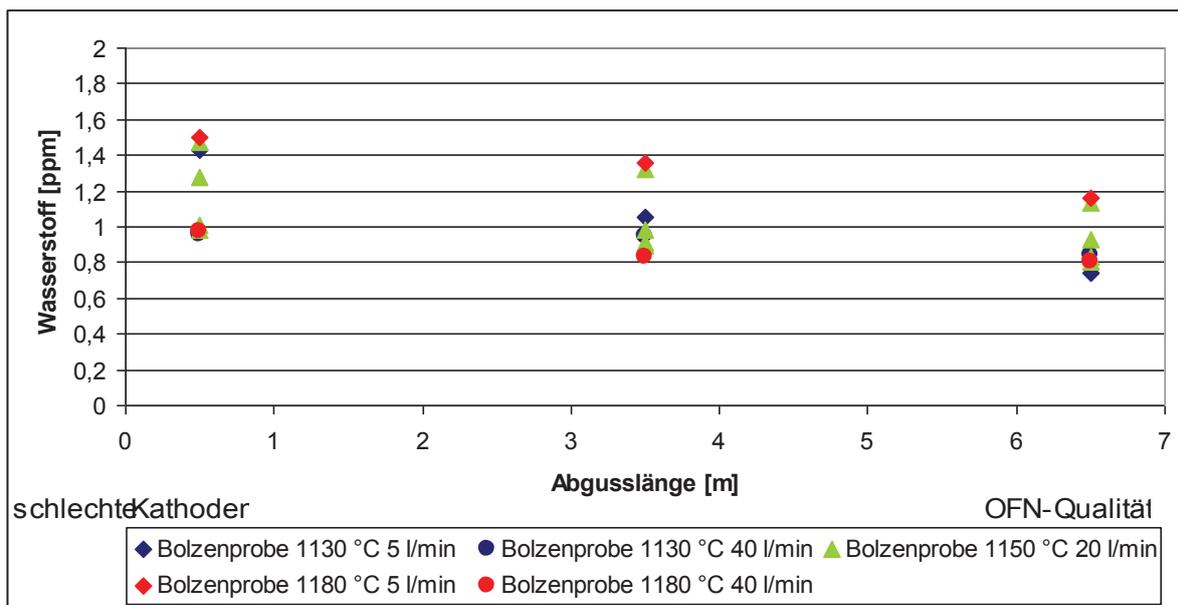


Diagramm 12.102: OFN-Qualität, schlechte Kathoden

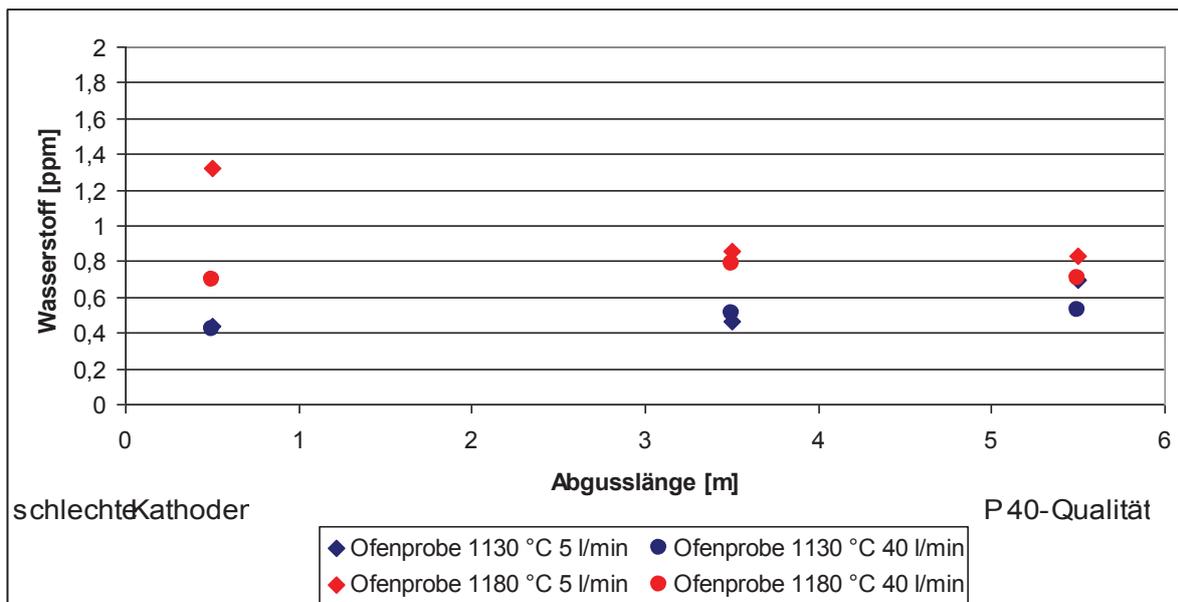


Diagramm 12.103: P 40-Qualität, schlechte Kathoden

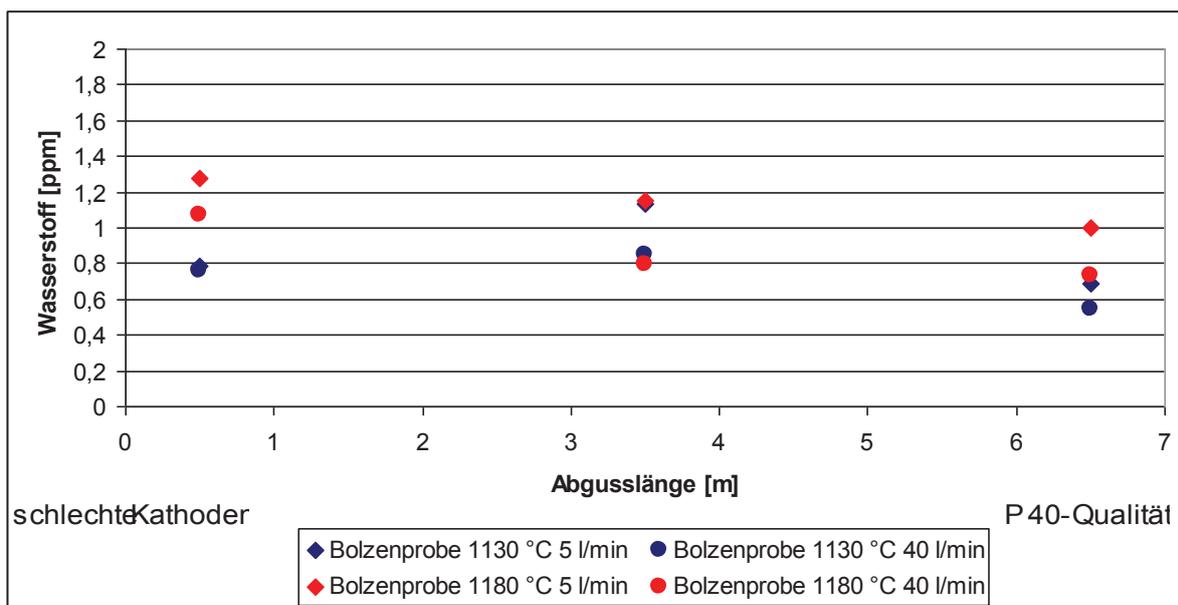


Diagramm 12.104: P 40-Qualität, schlechte Kathoden

12.4.2 Vergleich des Sauerstoffgehalts über die Abgusslänge

12.4.2.1 Impeller

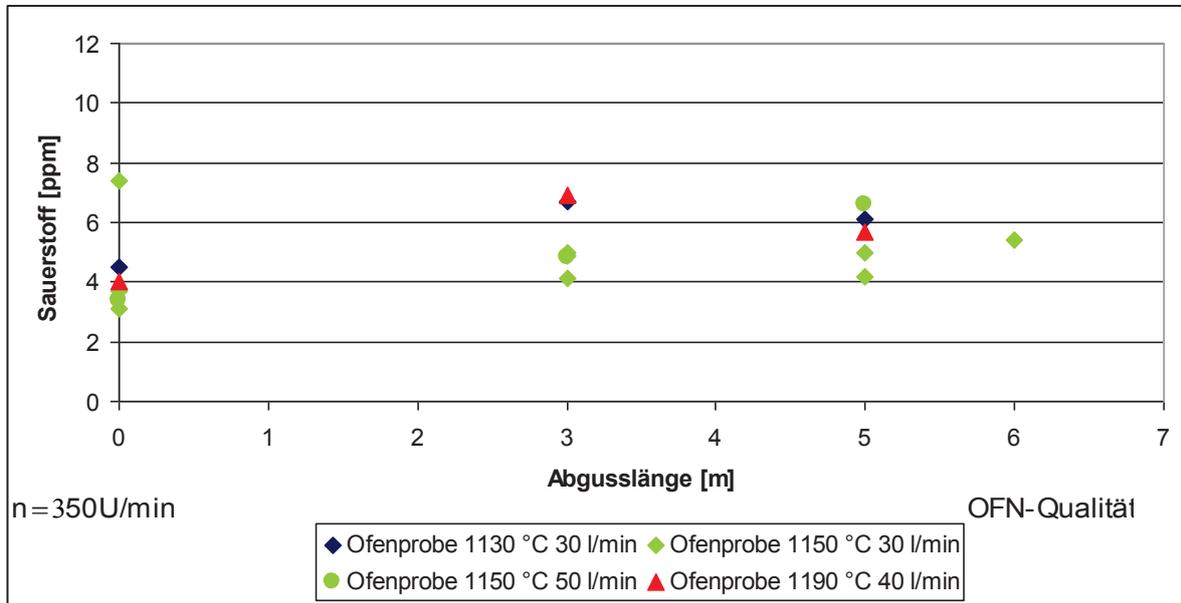


Diagramm 12.105: OFN-Qualität, gute Kathoden

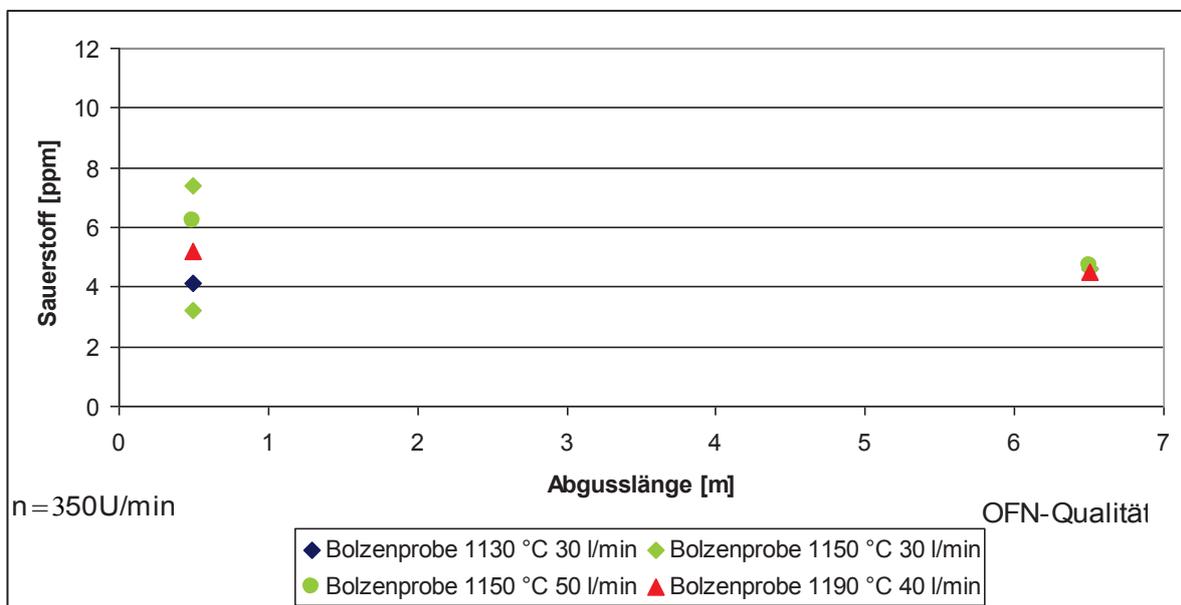


Diagramm 12.106: OFN-Qualität, gute Kathoden

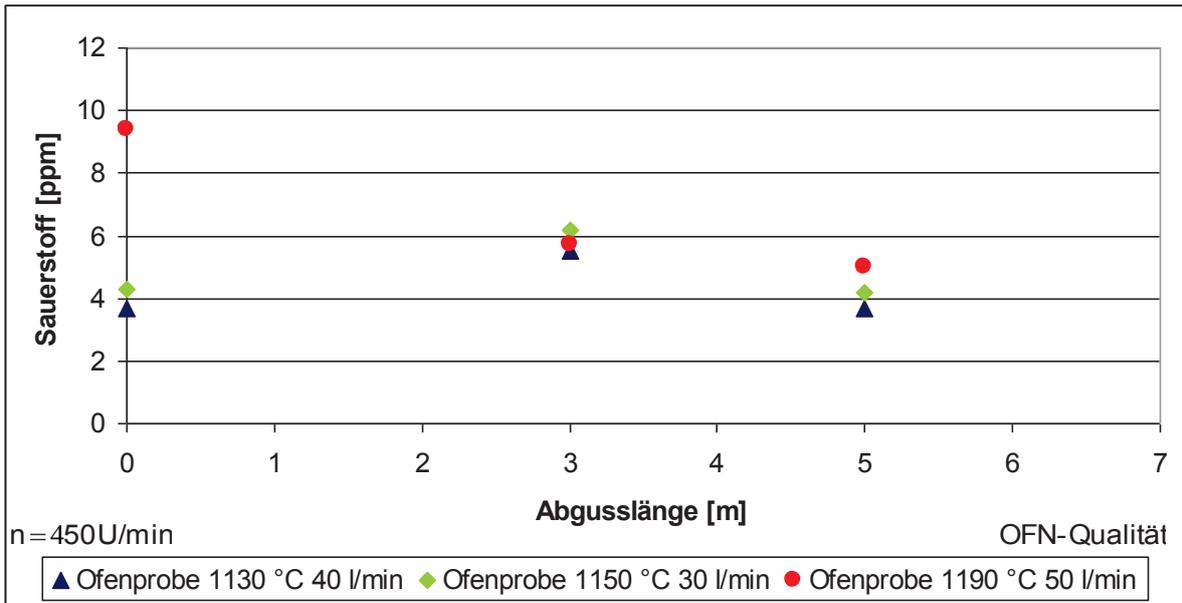


Diagramm 12.107: OFN-Qualität, gute Kathoden

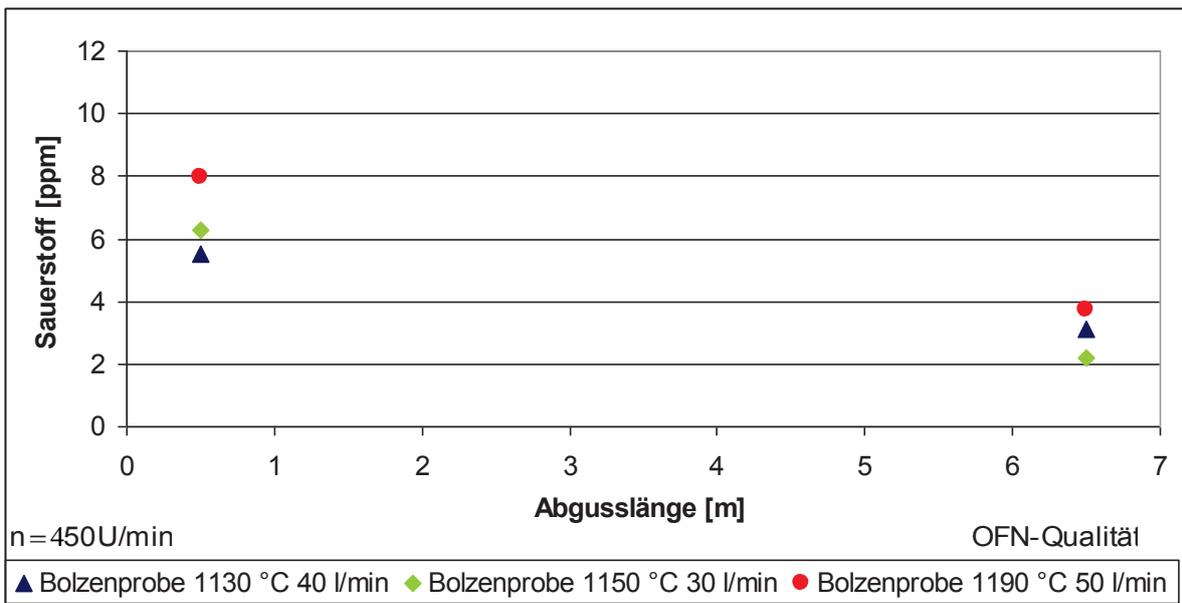


Diagramm 12.108: OFN-Qualität, gute Kathoden

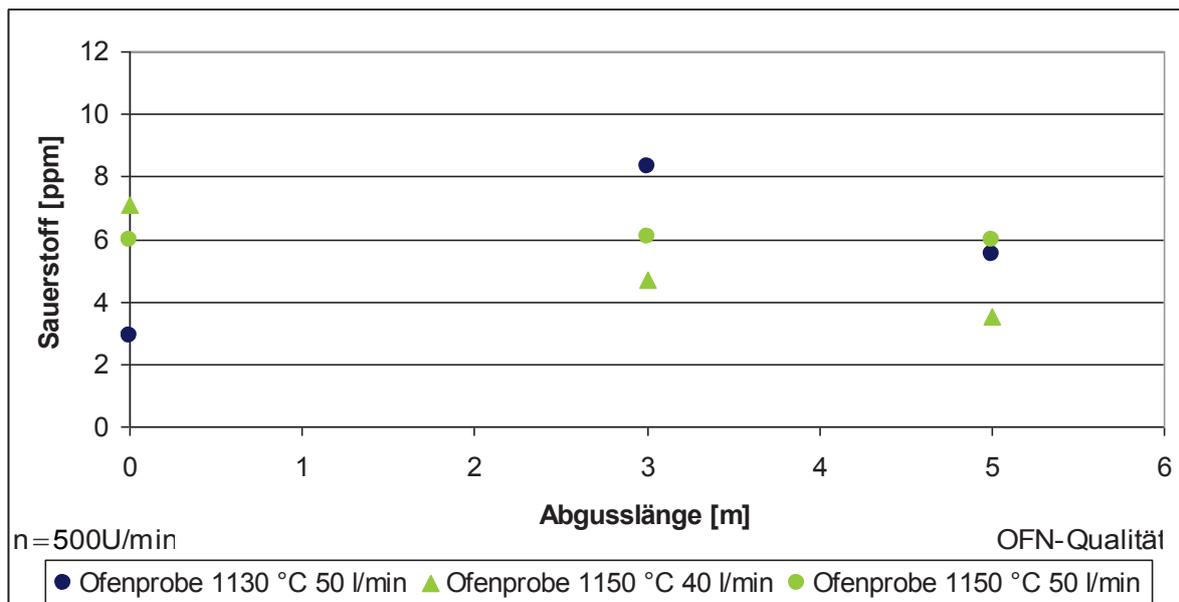


Diagramm 12.109: OFN-Qualität, gute Kathoden

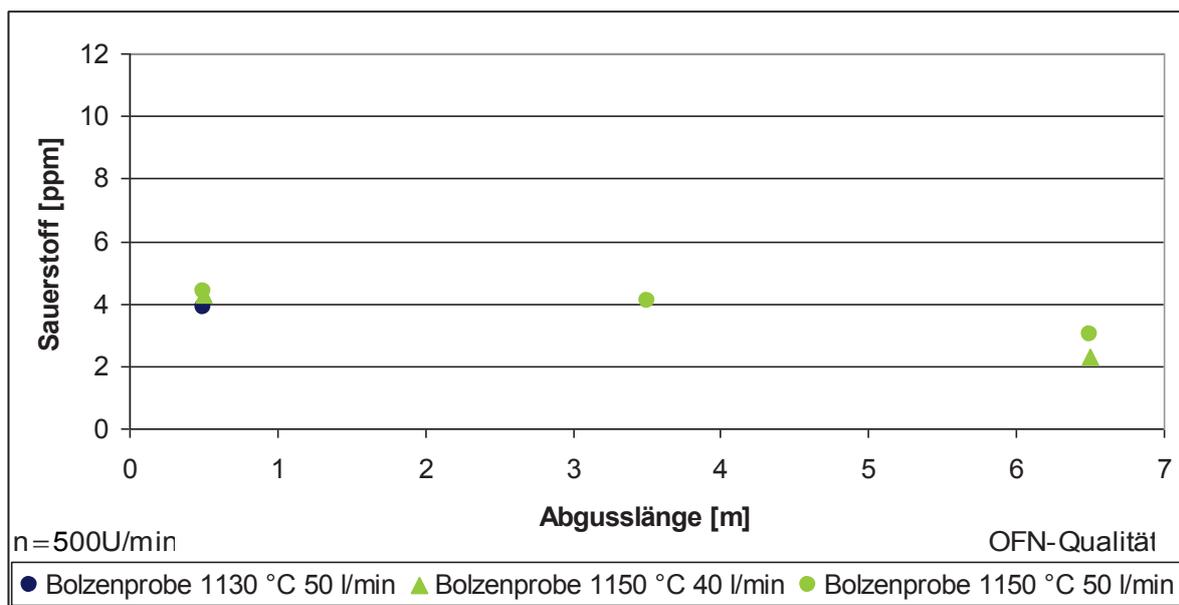


Diagramm 12.110: OFN-Qualität, gute Kathoden

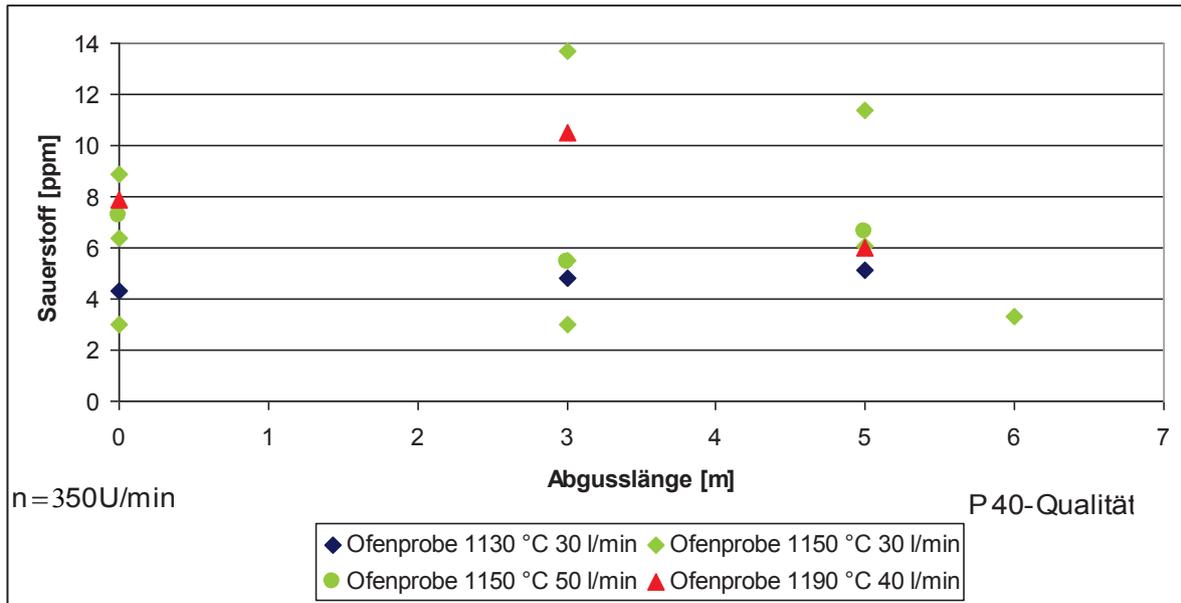


Diagramm 12.111: P 40-Qualität, gute Kathoden

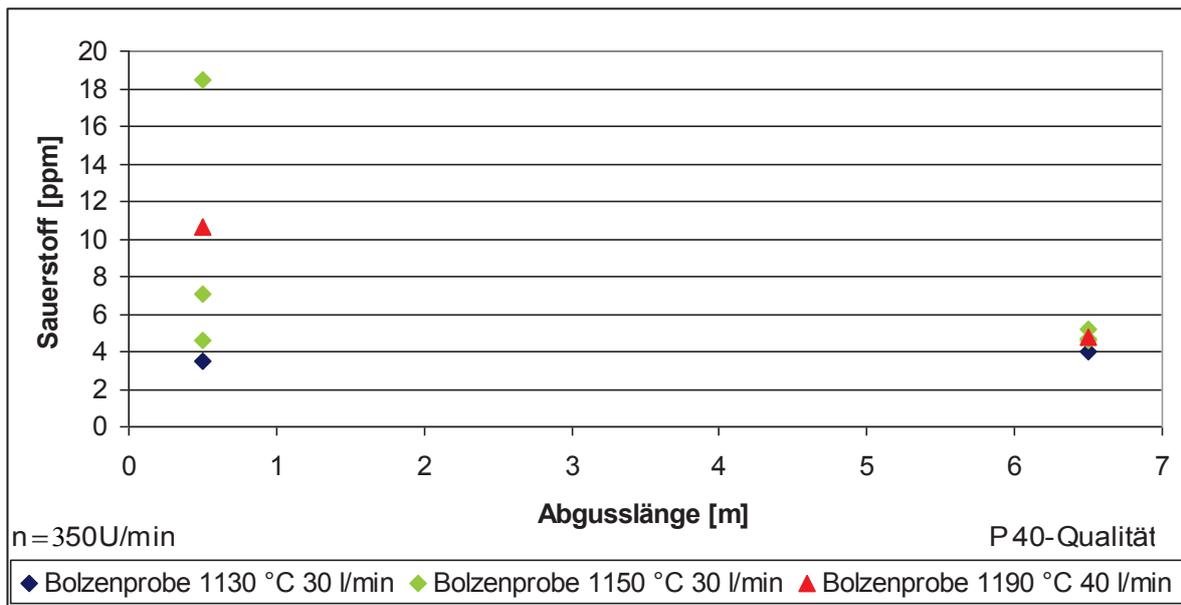


Diagramm 12.112: P 40-Qualität, gute Kathoden

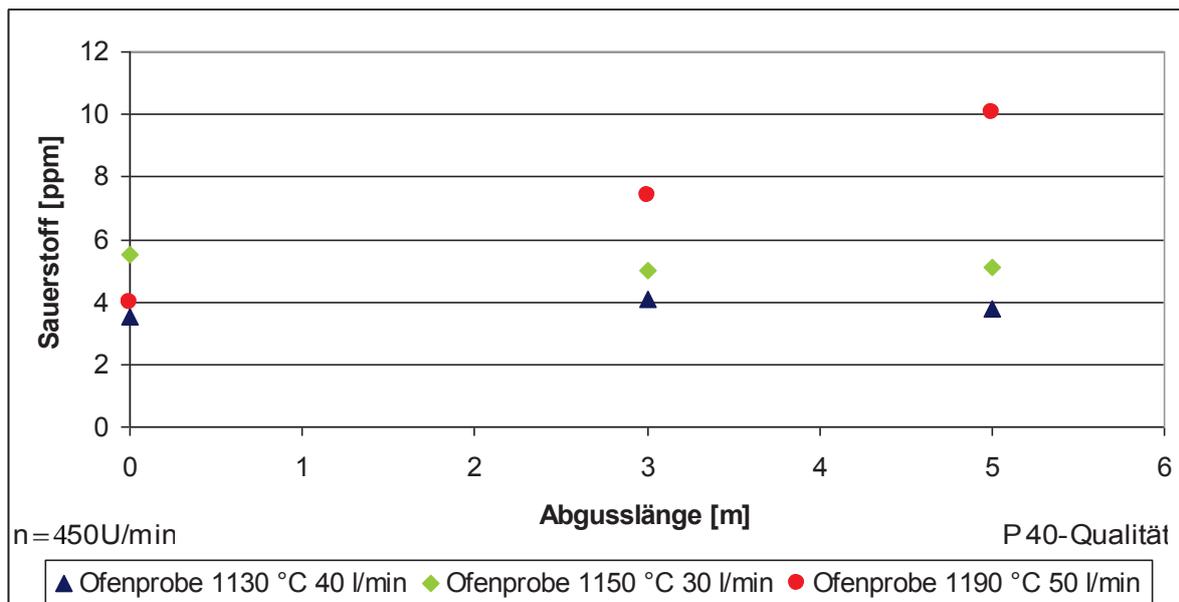


Diagramm 12.113: P 40-Qualität, gute Kathoden

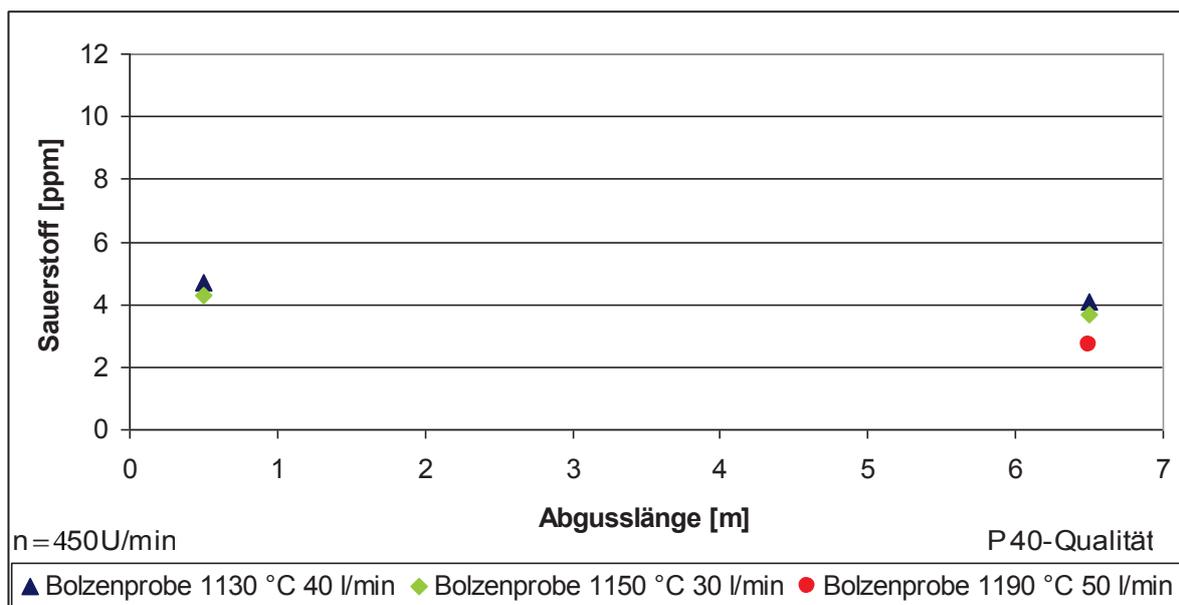


Diagramm 12.114: P 40-Qualität, gute Kathoden

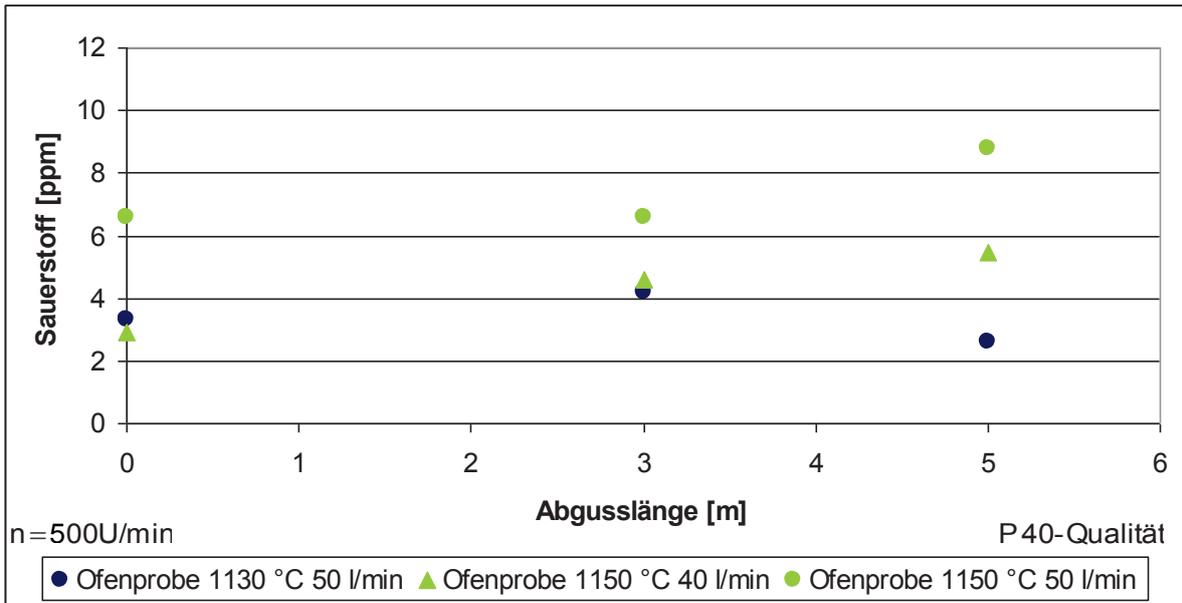


Diagramm 12.115: P 40-Qualität, gute Kathoden

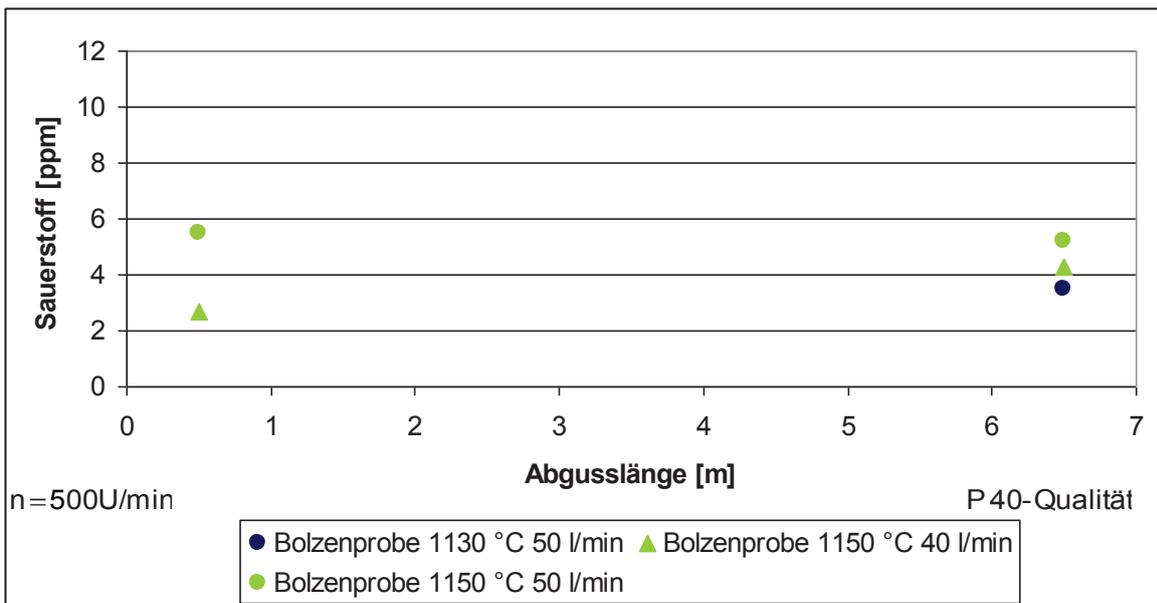


Diagramm 12.116: P 40-Qualität, gute Kathoden

12.4.2.2 Bodenspüler

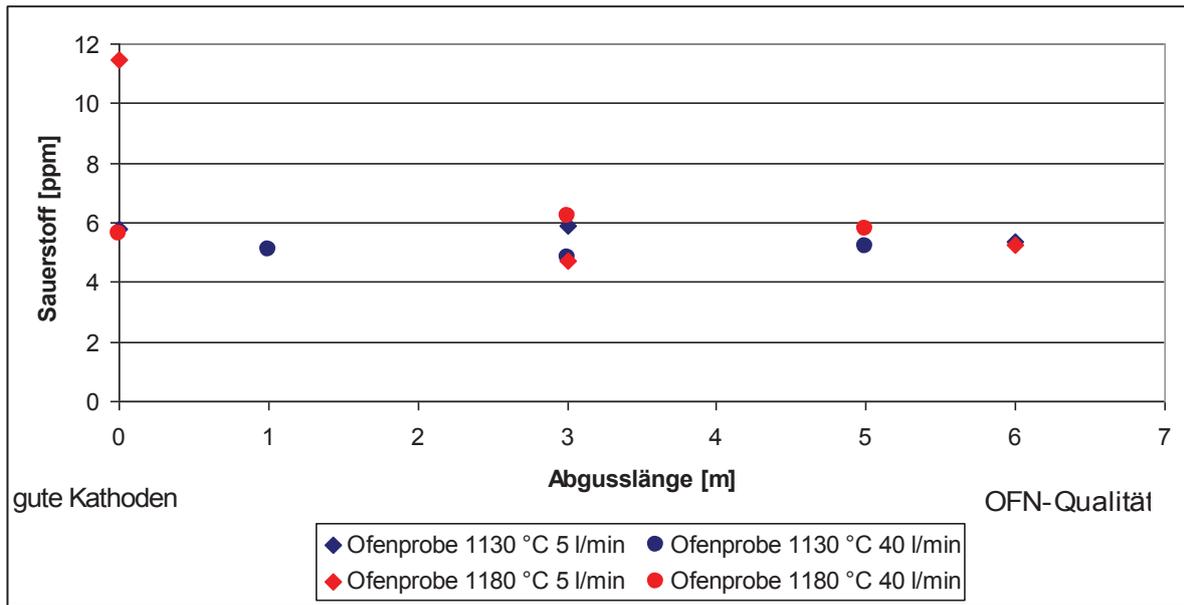


Diagramm 12.117: OFN-Qualität, gute Kathoden

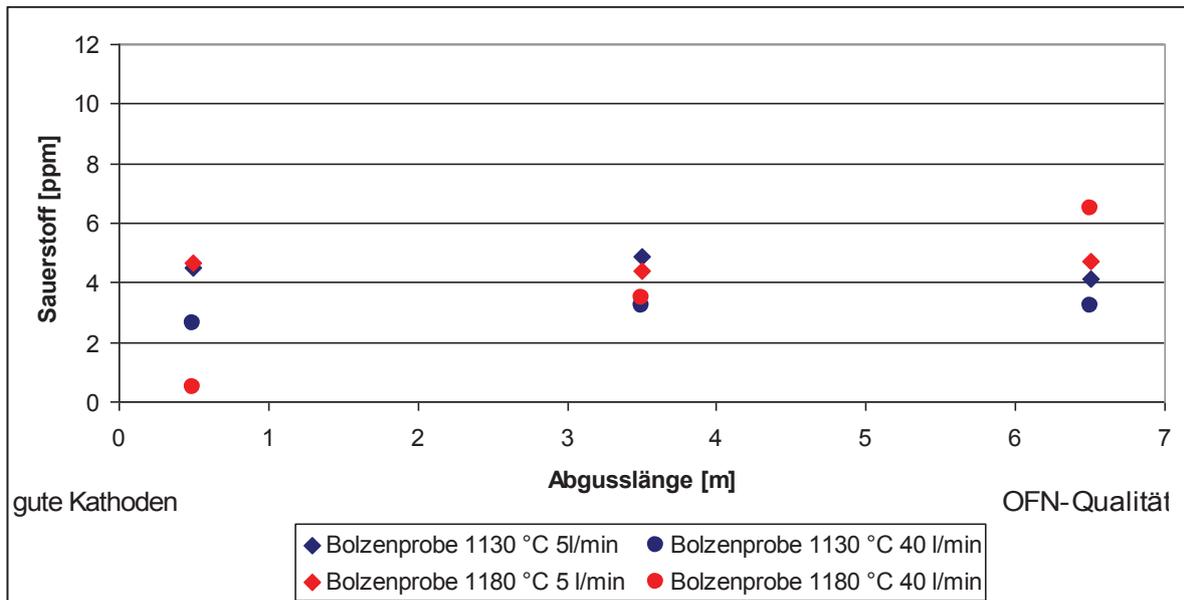


Diagramm 12.118: OFN-Qualität, gute Kathoden

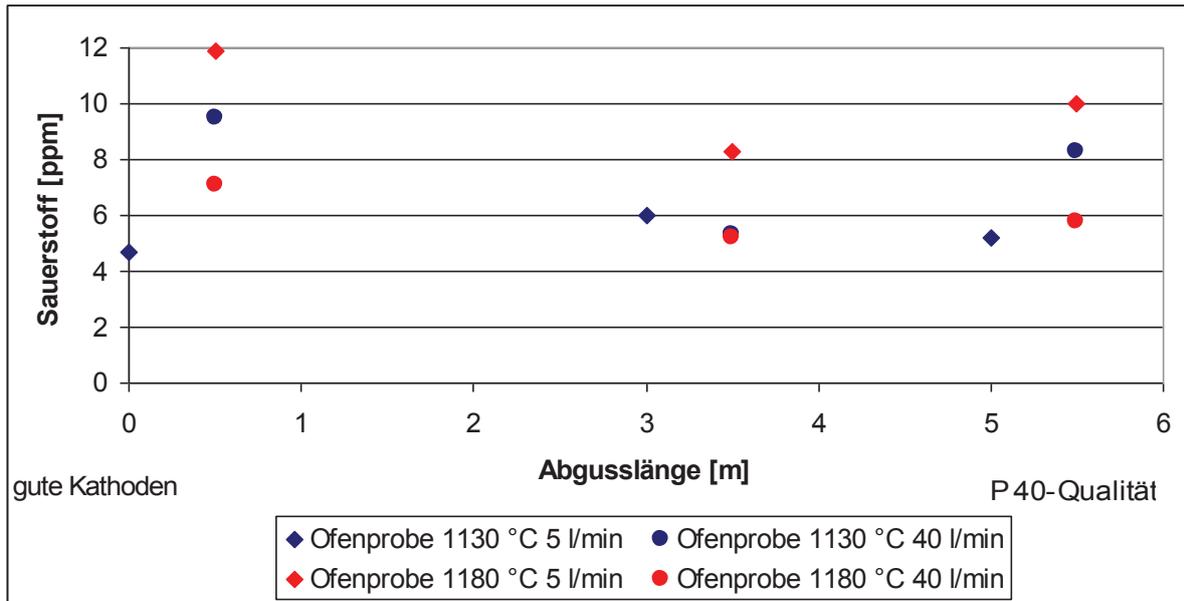


Diagramm 12.119: P 40-Qualität, gute Kathoden

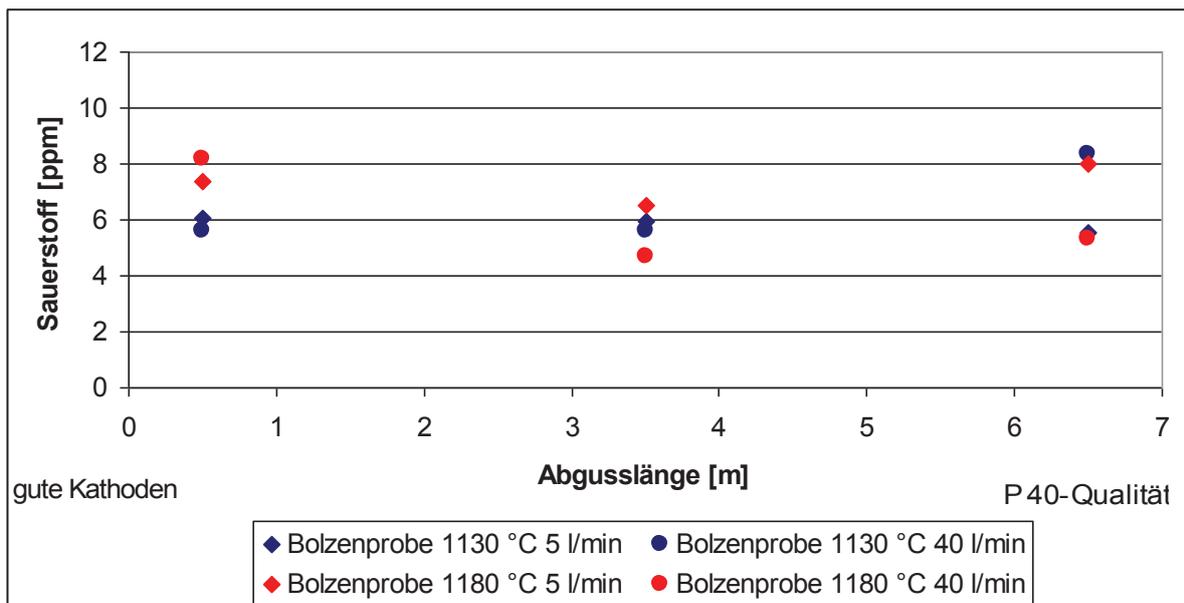


Diagramm 12.120: P 40-Qualität, gute Kathoden

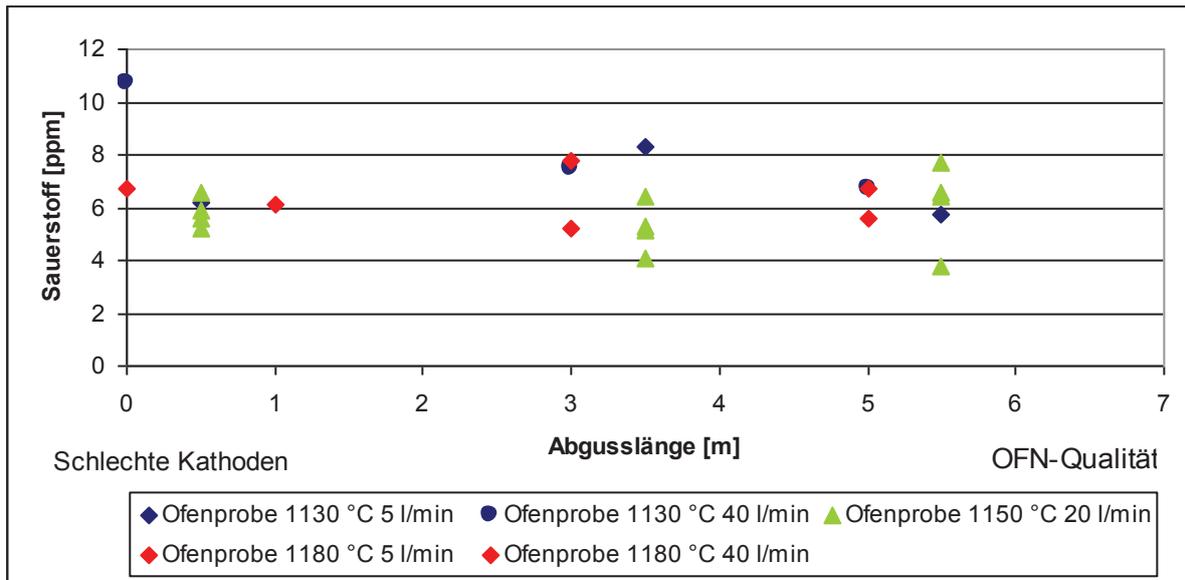


Diagramm 12.121: OFN-Qualität, schlechte Kathoden

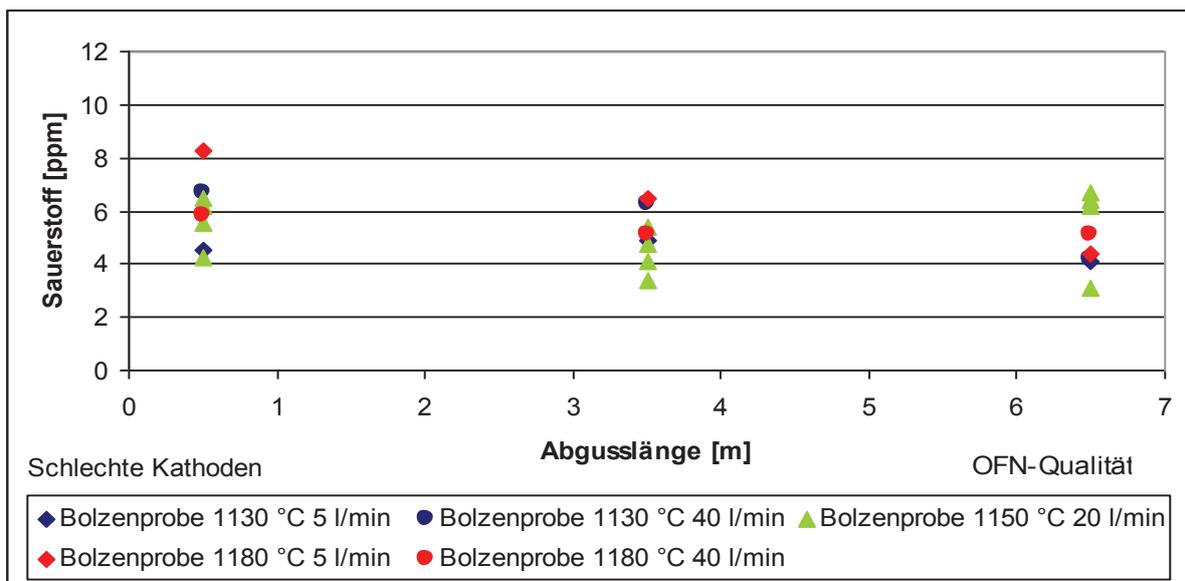


Diagramm 12.122: OFN-Qualität, schlechte Kathoden

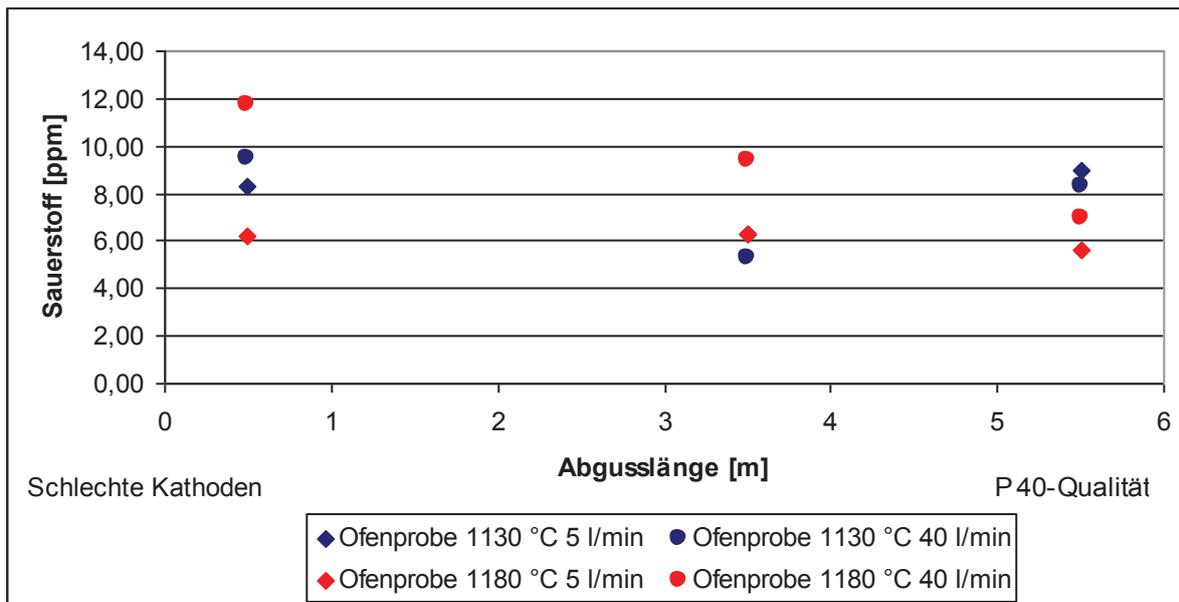


Diagramm 12.123: P 40-Qualität, schlechte Kathoden

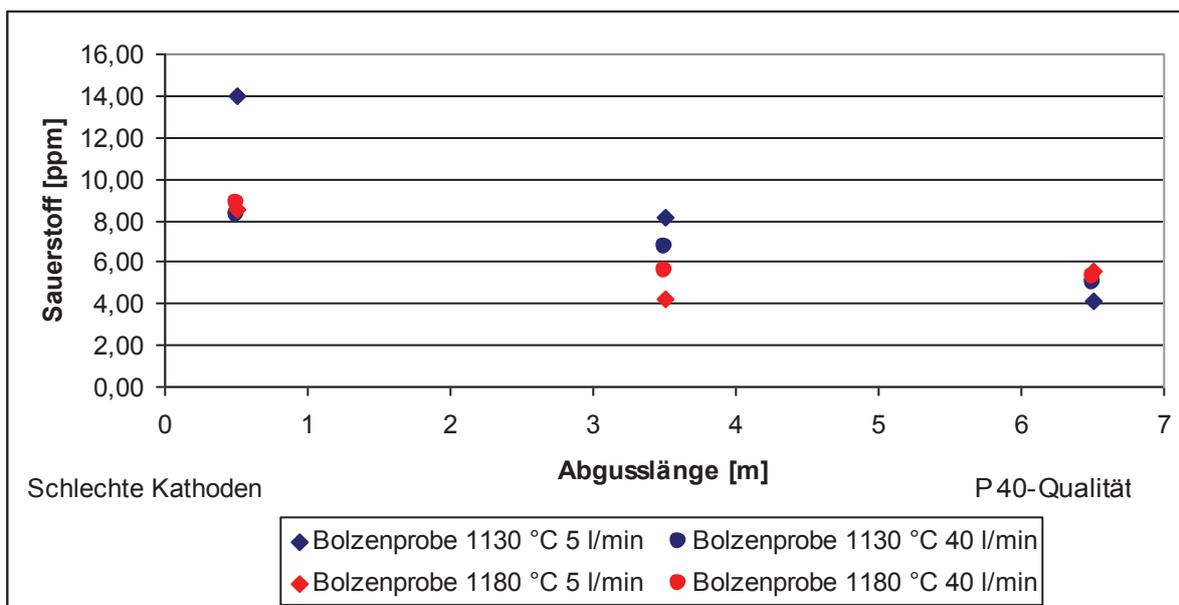


Diagramm 12.124: P 40-Qualität, schlechte Kathoden

12.5 Vergleich der Behandlungsmethoden

12.5.1 Vergleich der Wasser- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

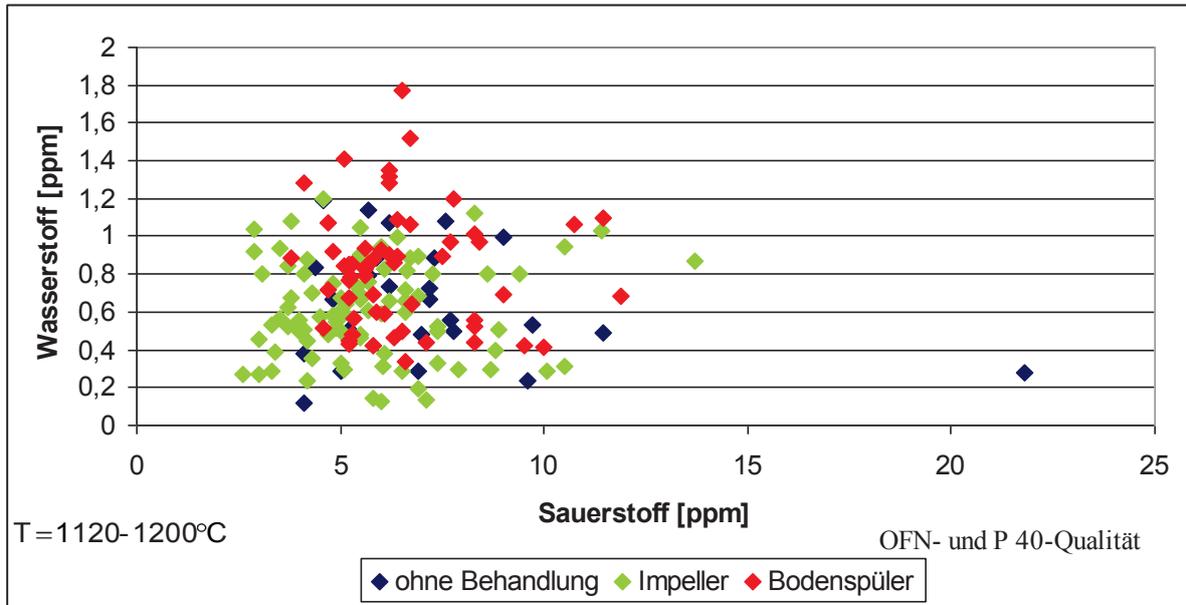


Diagramm 12.125: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

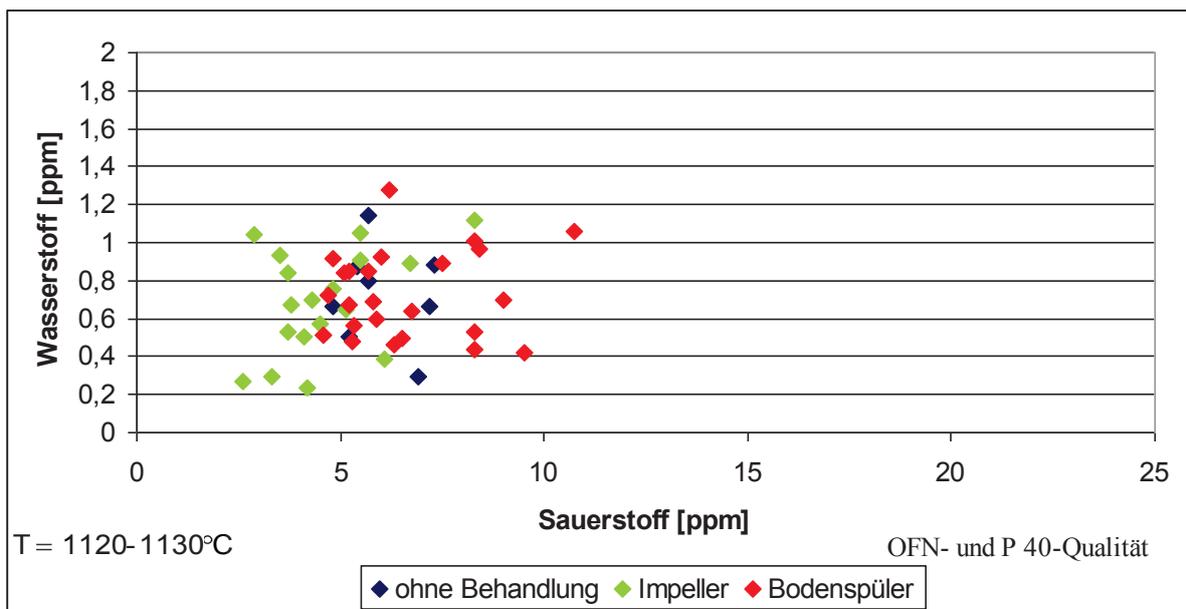


Diagramm 12.126: OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

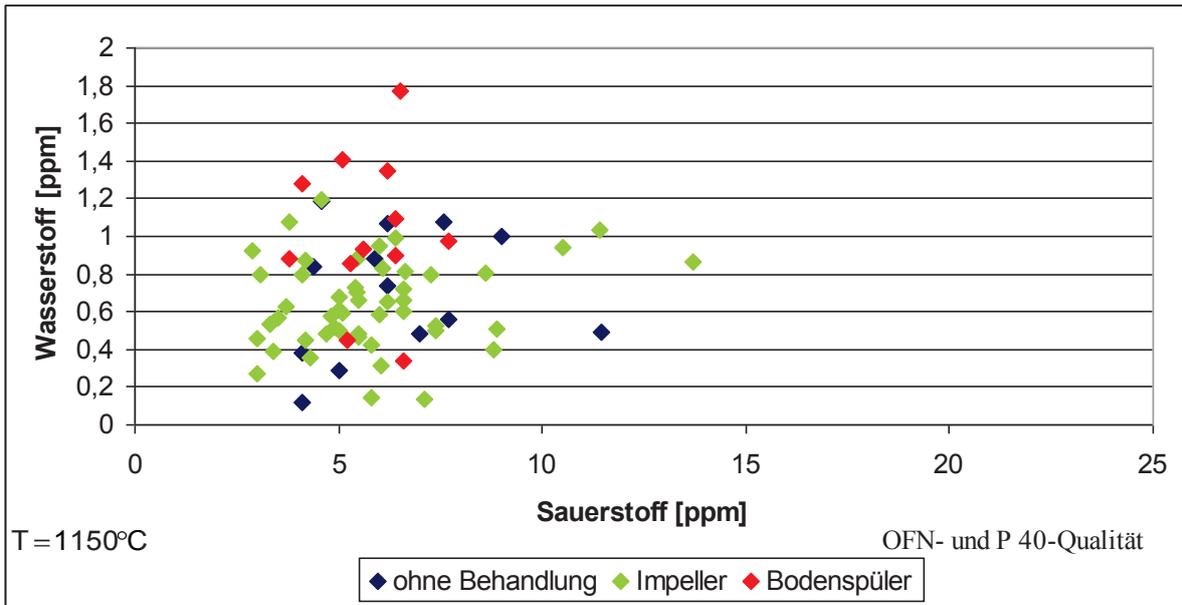


Diagramm 12.127: OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

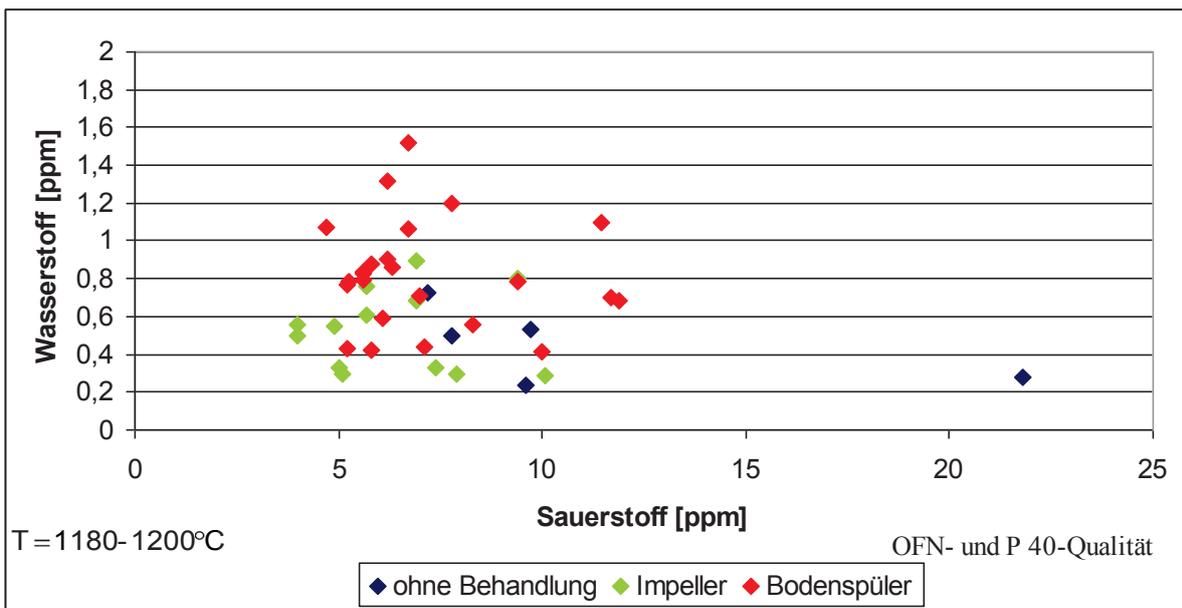


Diagramm 12.128: OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

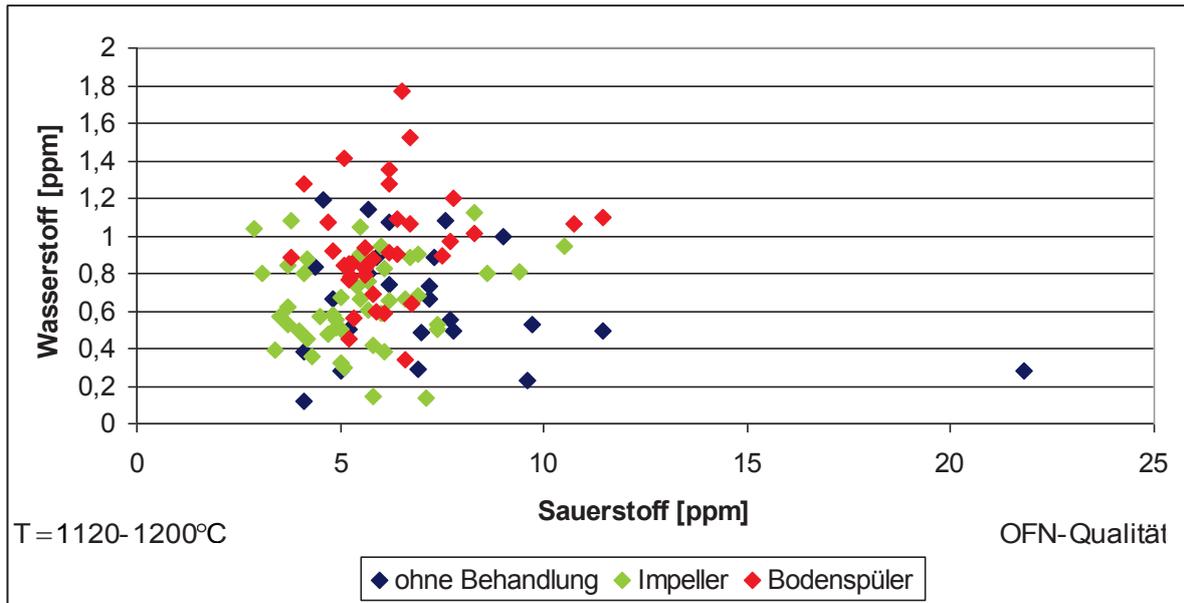


Diagramm 12.129: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen

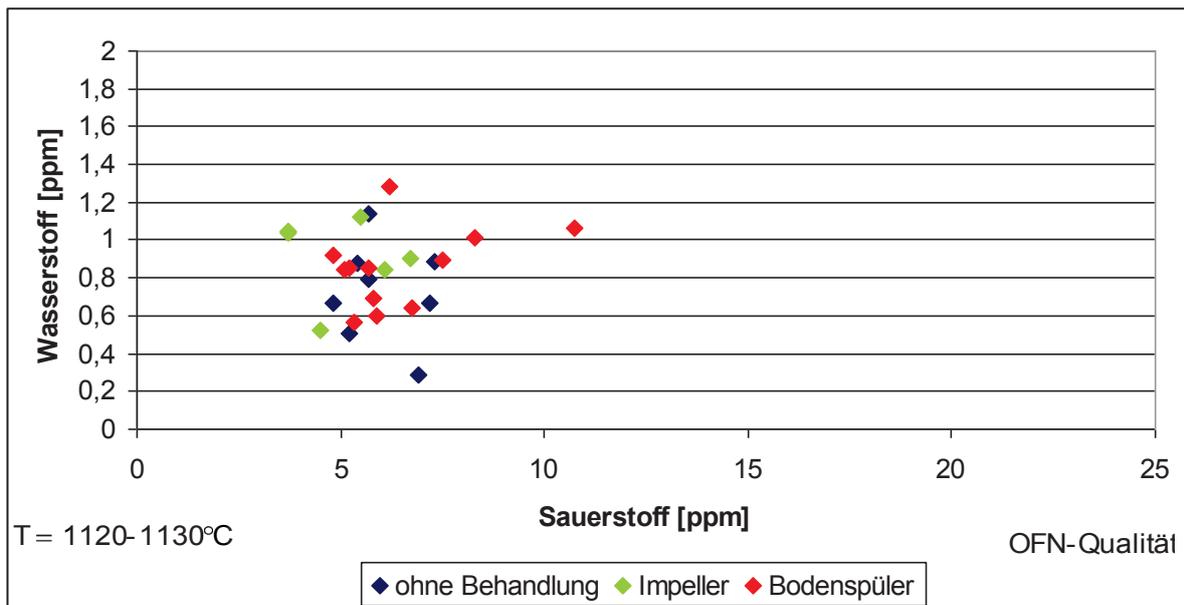


Diagramm 12.130: OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

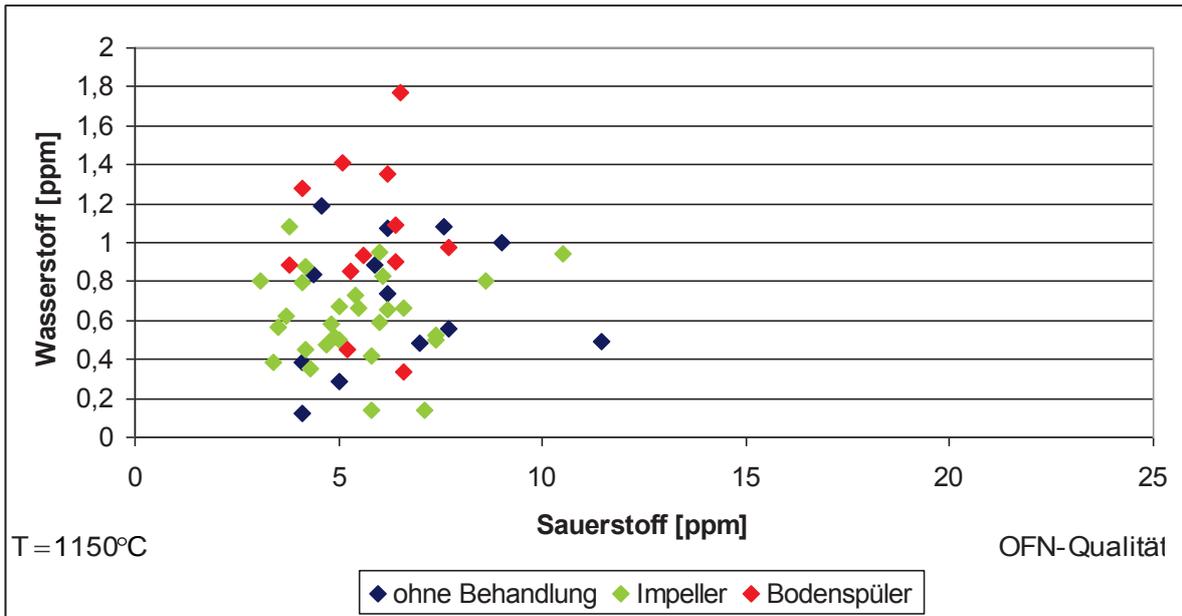


Diagramm 12.131: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

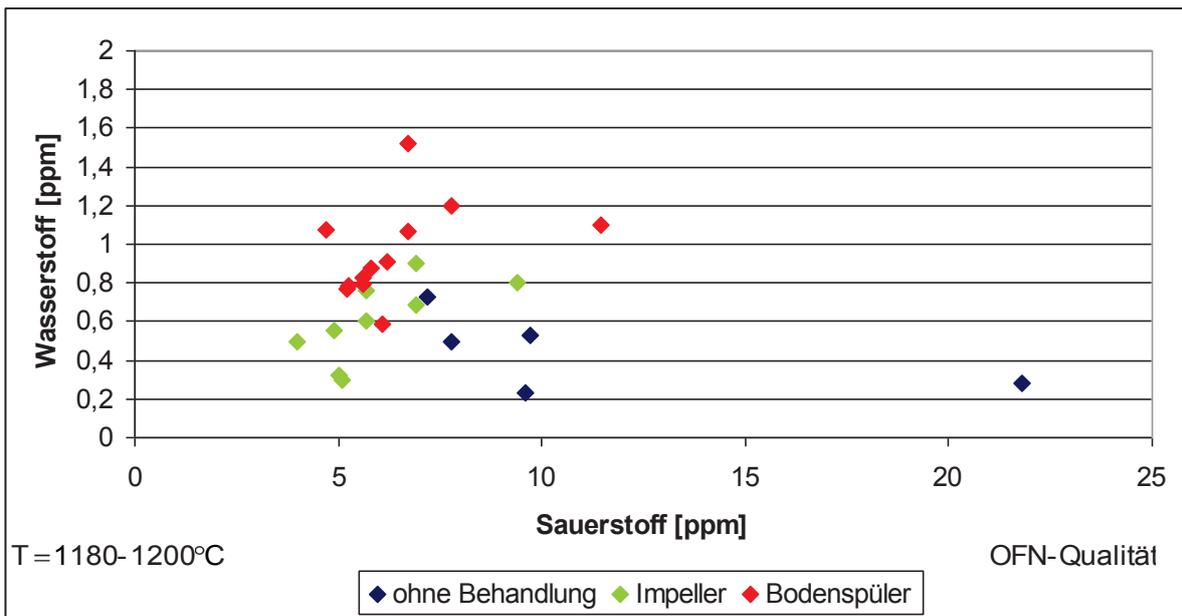


Diagramm 12.132: OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur

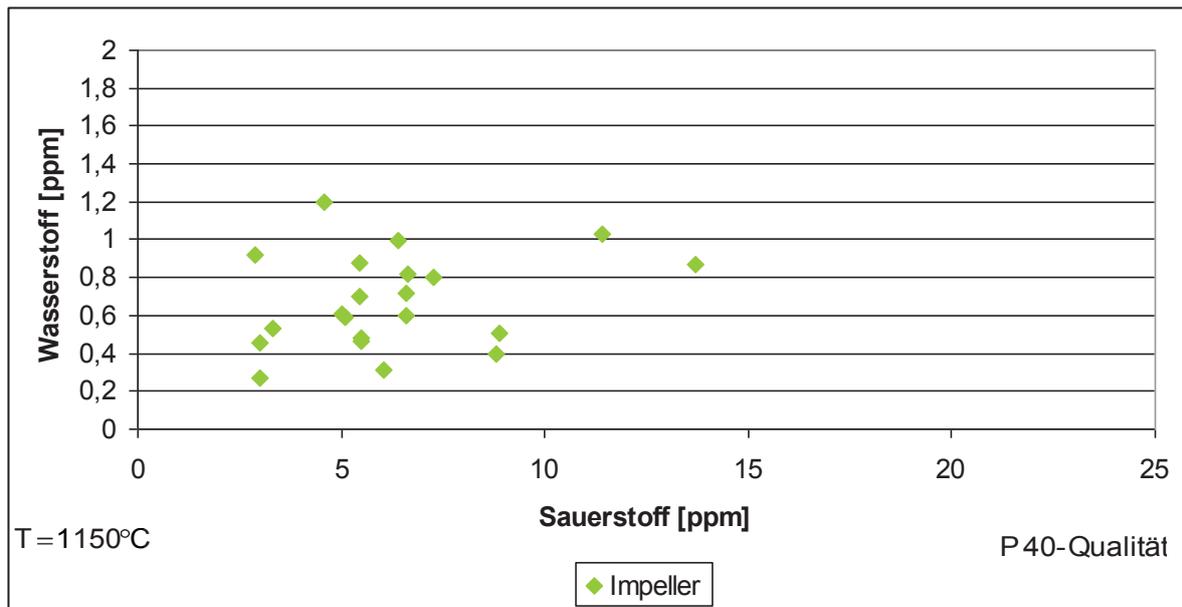


Diagramm 12.135: P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

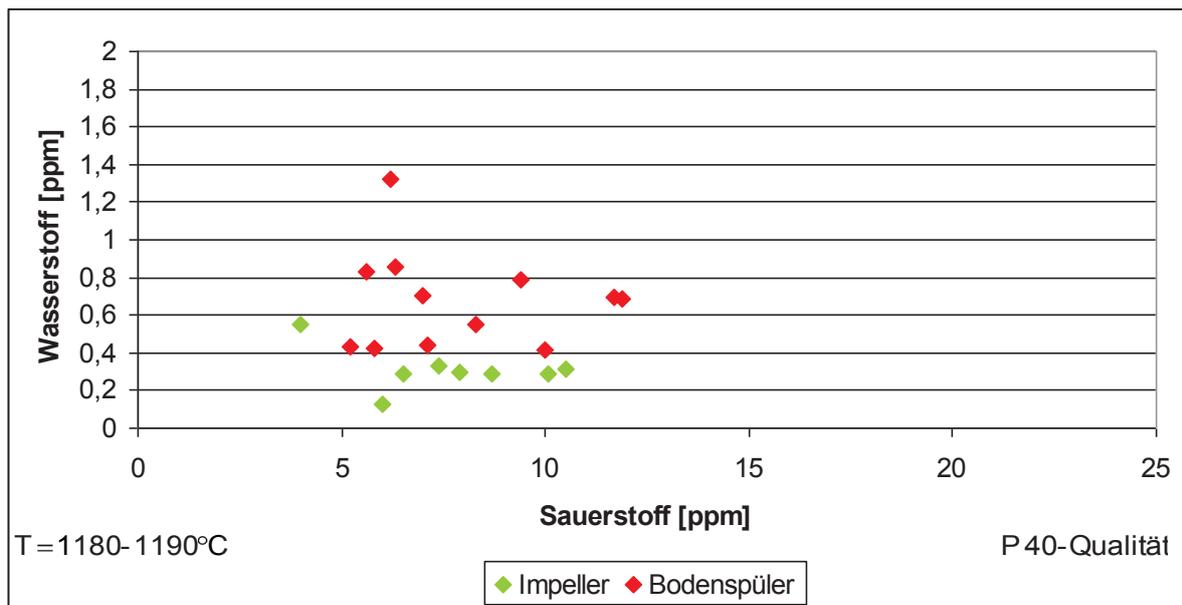


Diagramm 12.136: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

12.5.2 Vergleich der Phosphor- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

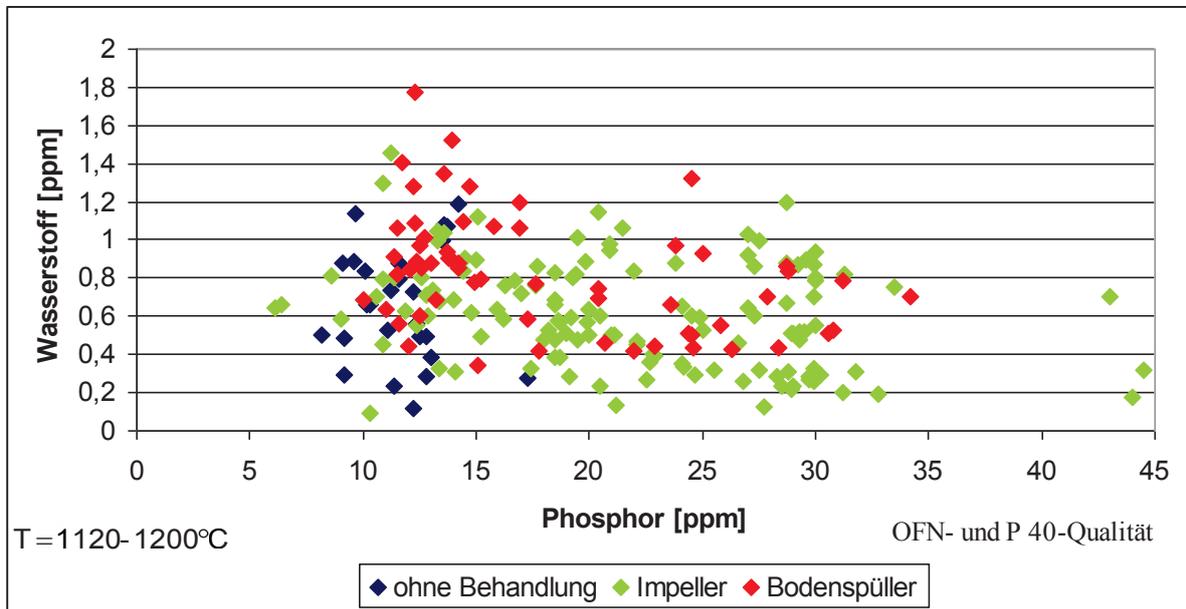


Diagramm 12.137: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

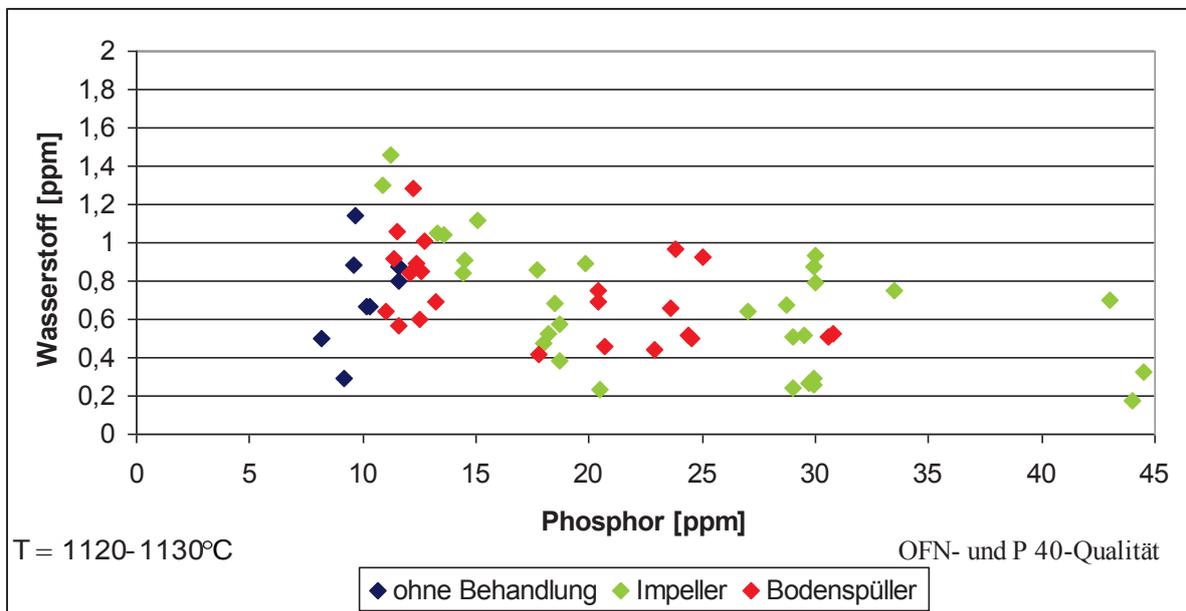


Diagramm 12.138: OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

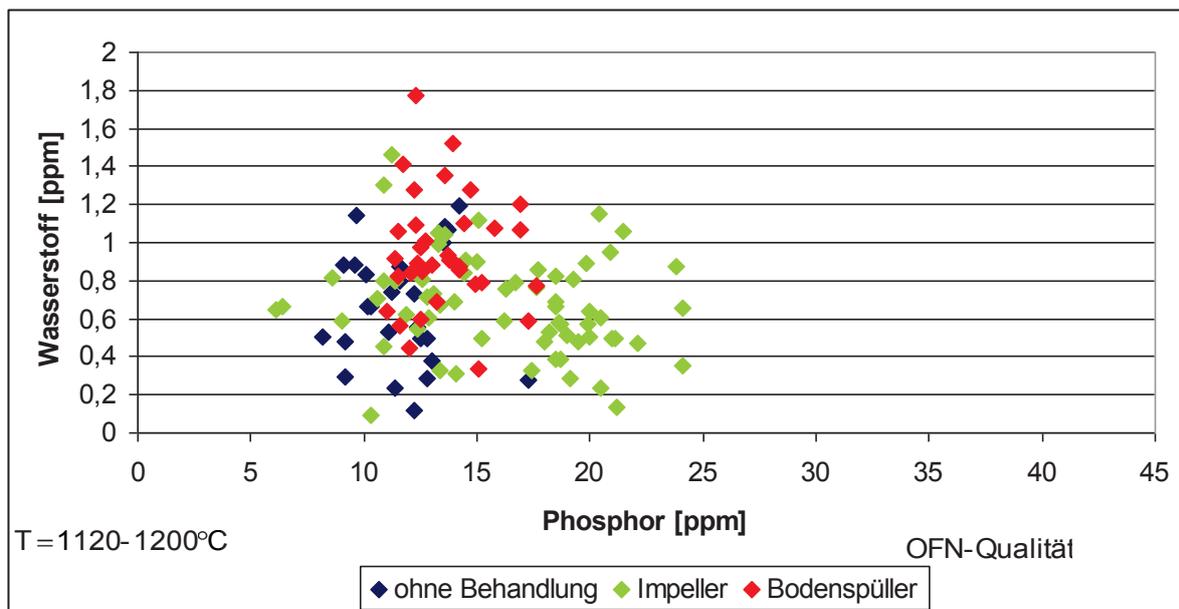


Diagramm 12.141: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen

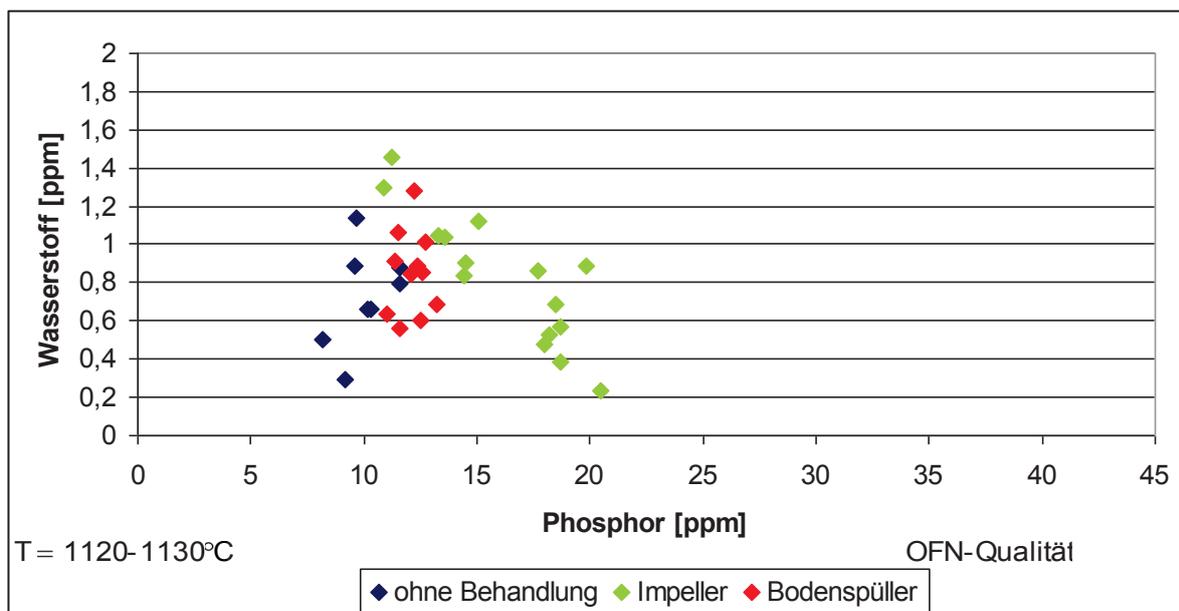


Diagramm 12.142: OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

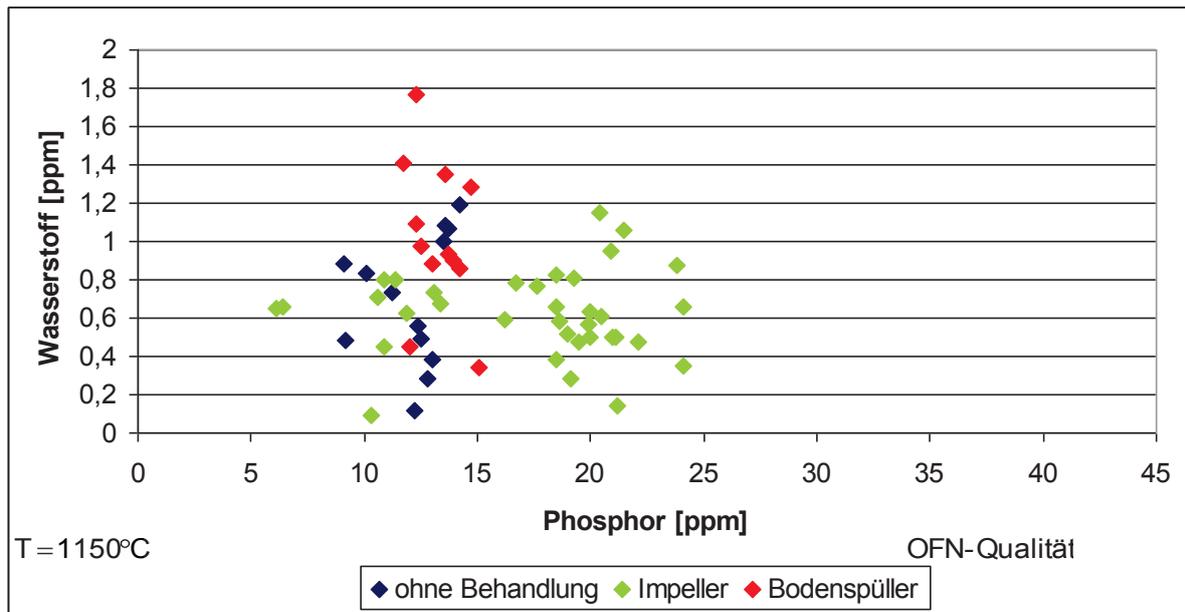


Diagramm 12.143: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

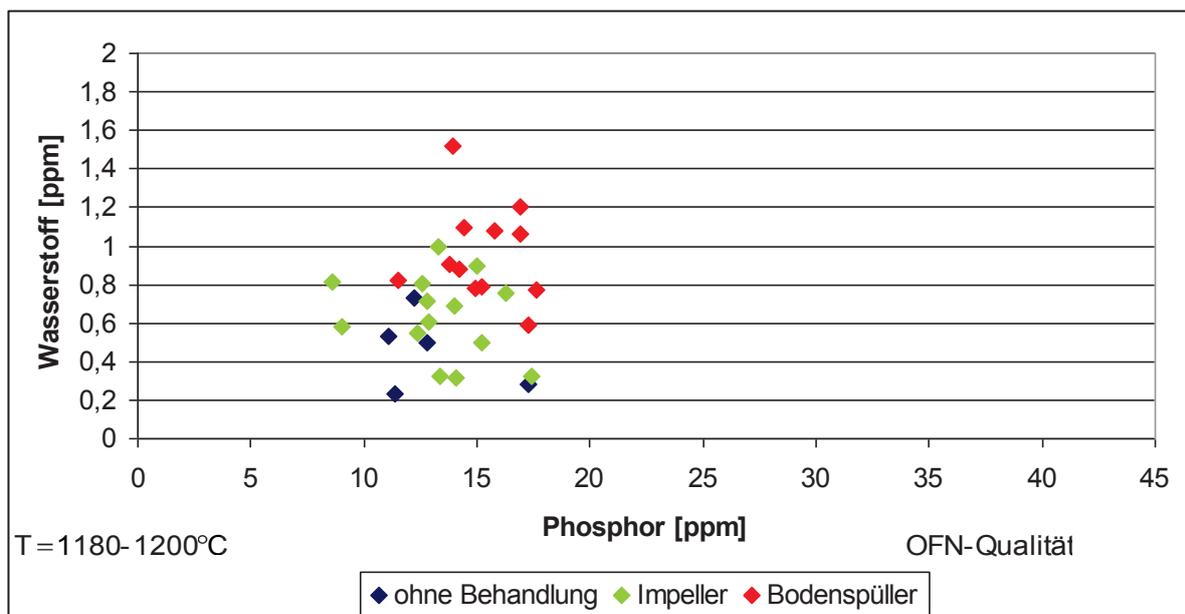


Diagramm 12.144: OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur

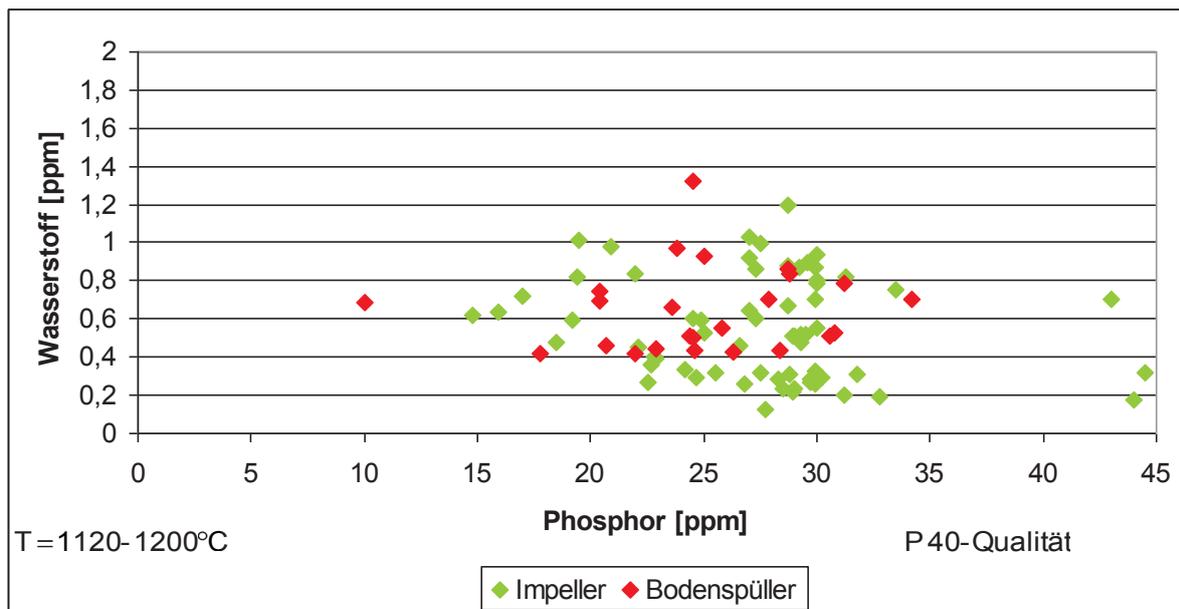


Diagramm 12.145: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

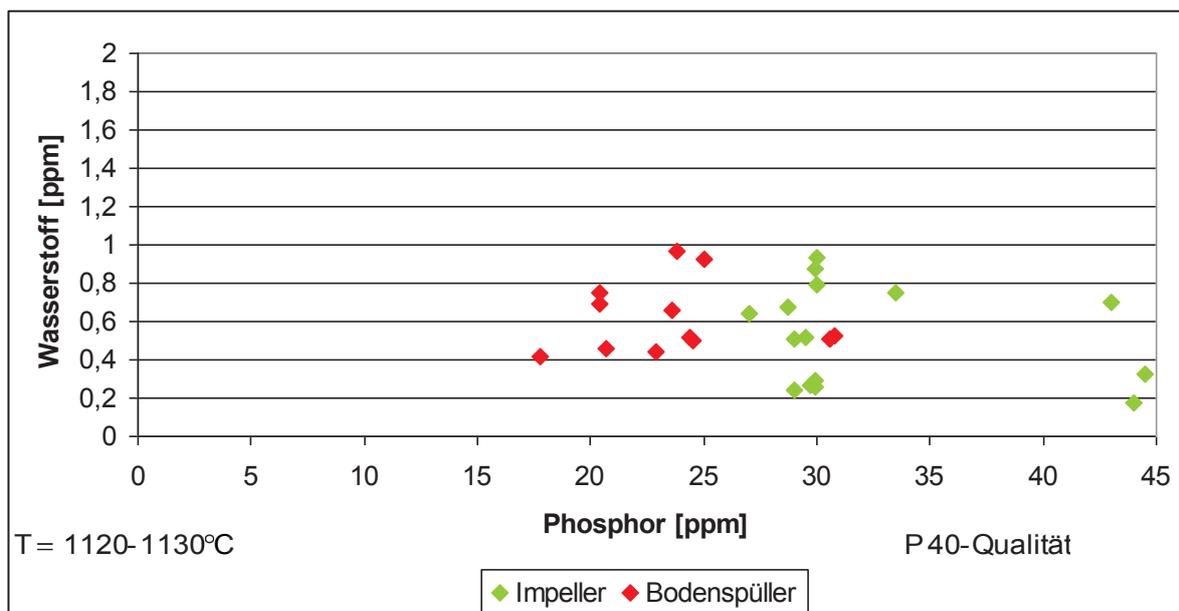


Diagramm 12.146: P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

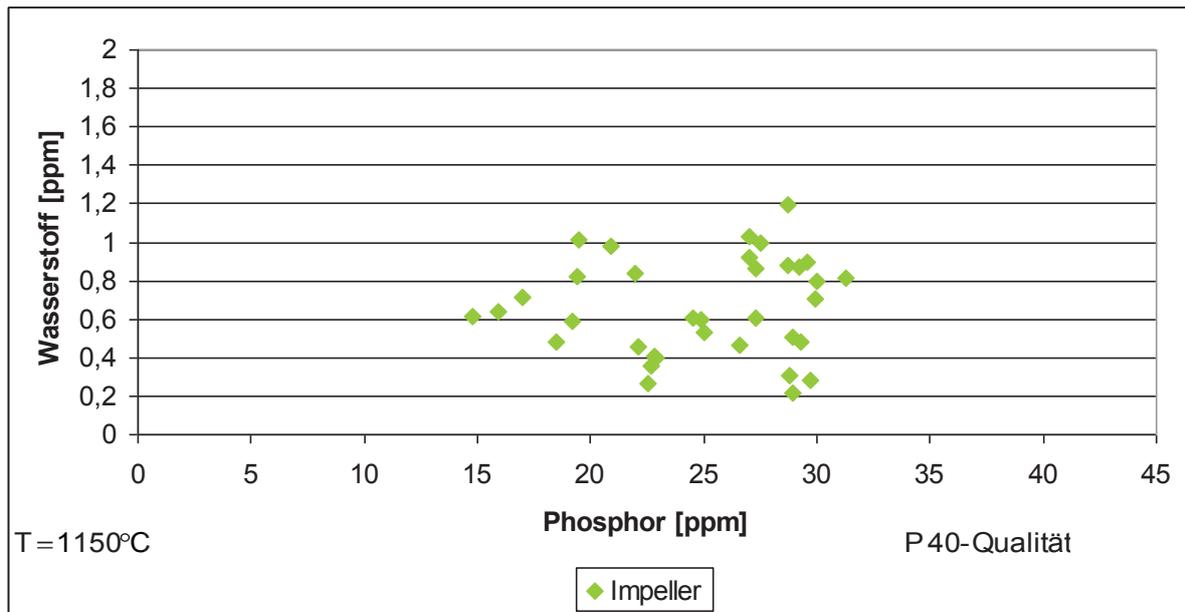


Diagramm 12.147: P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

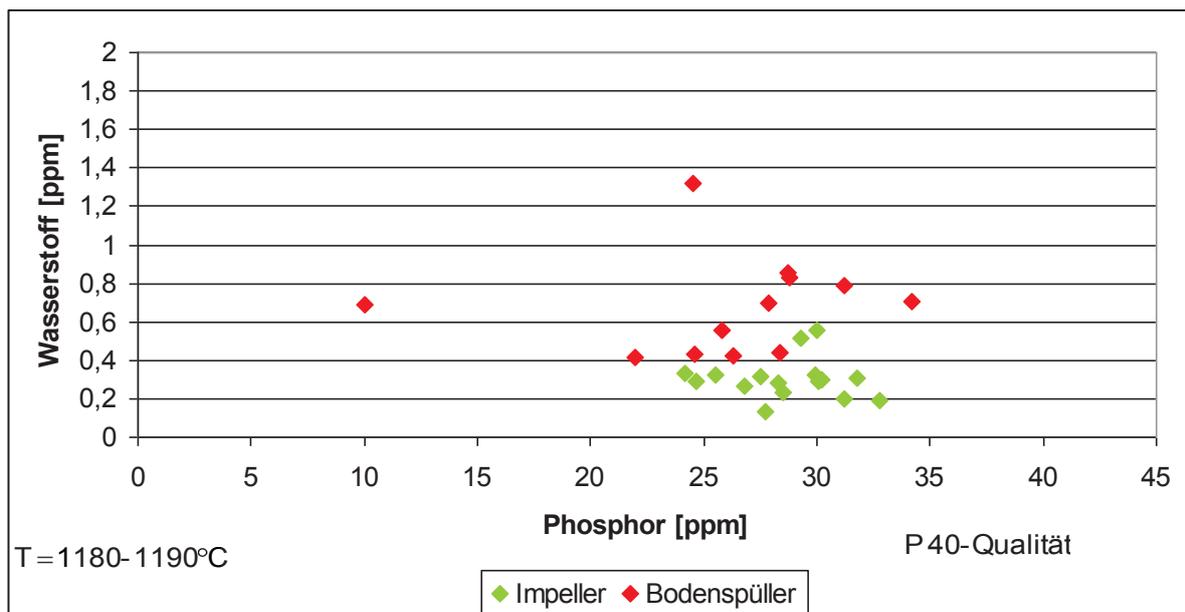


Diagramm 12.148: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

12.5.3 Vergleich der Phosphor- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

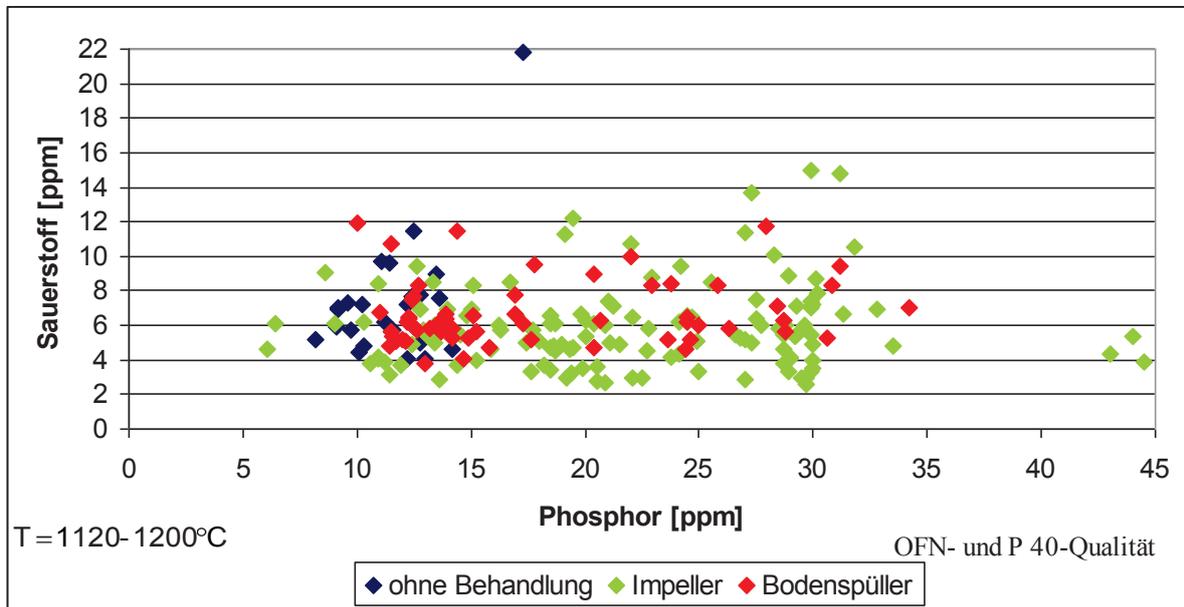


Diagramm 12.149: OFN- und P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

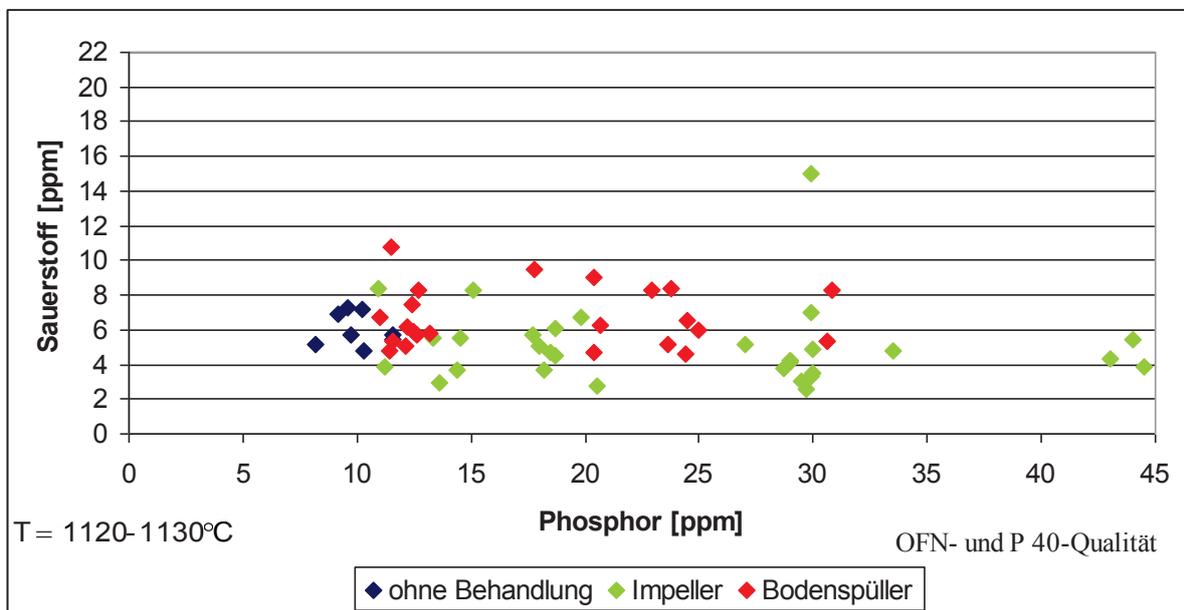


Diagramm 12.150: OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

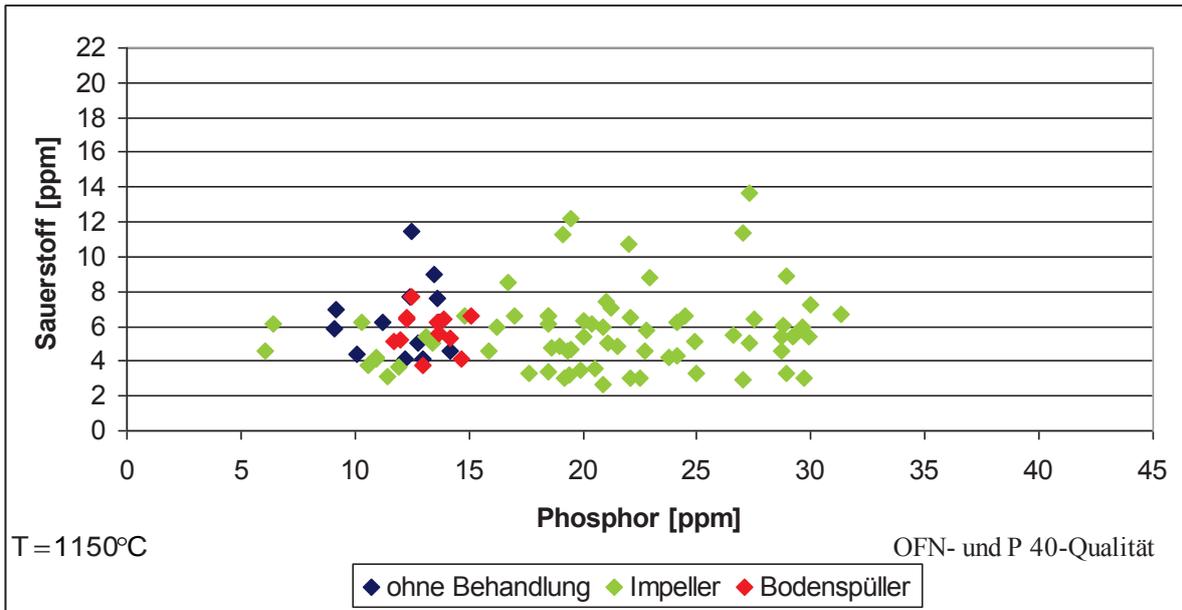


Diagramm 12.151: OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

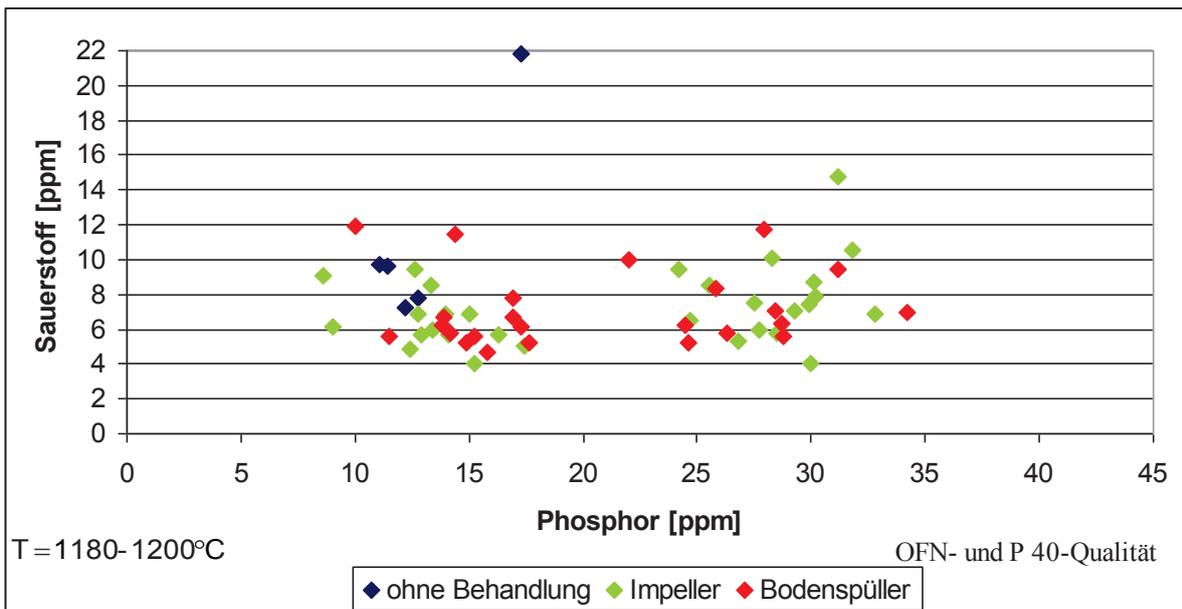


Diagramm 12.152: OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

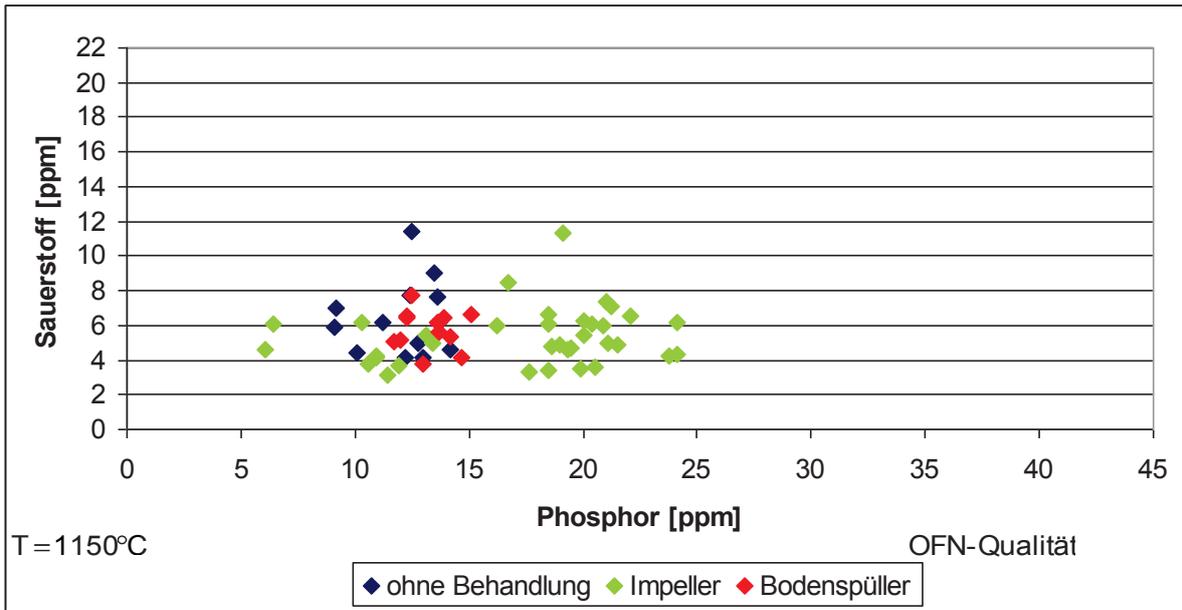


Diagramm 12.155: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

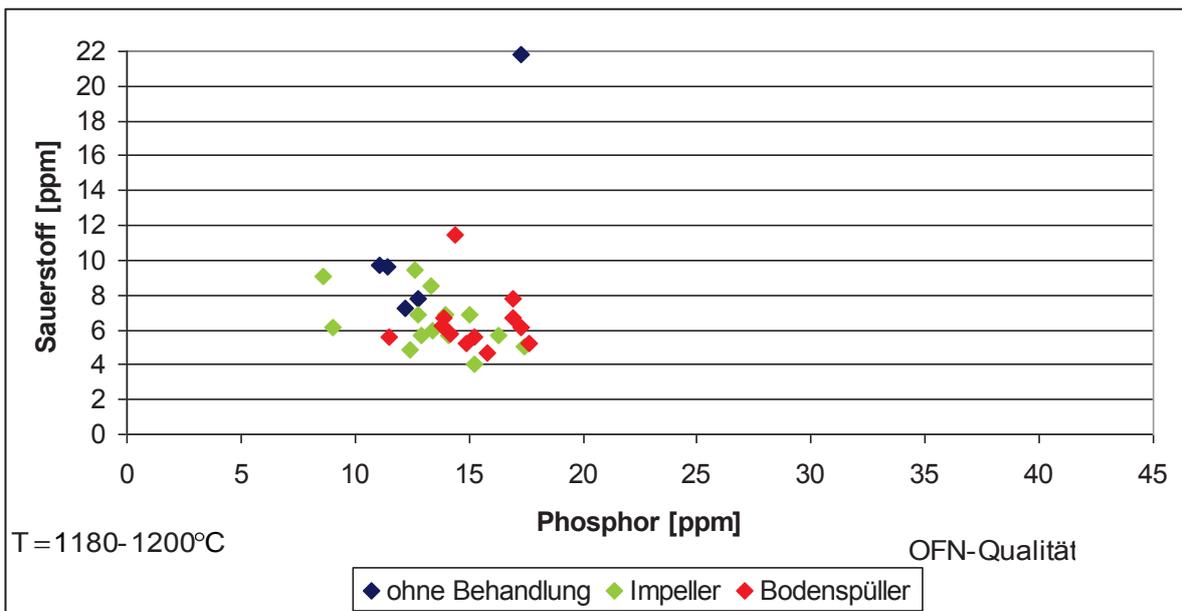


Diagramm 12.156: OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur

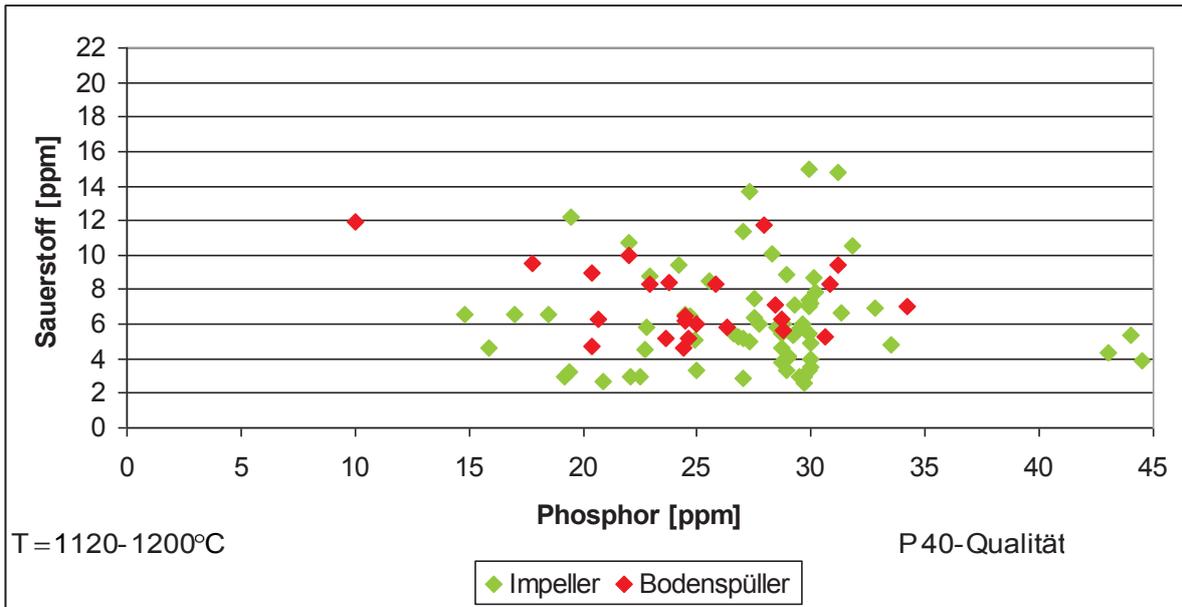


Diagramm 12.157: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

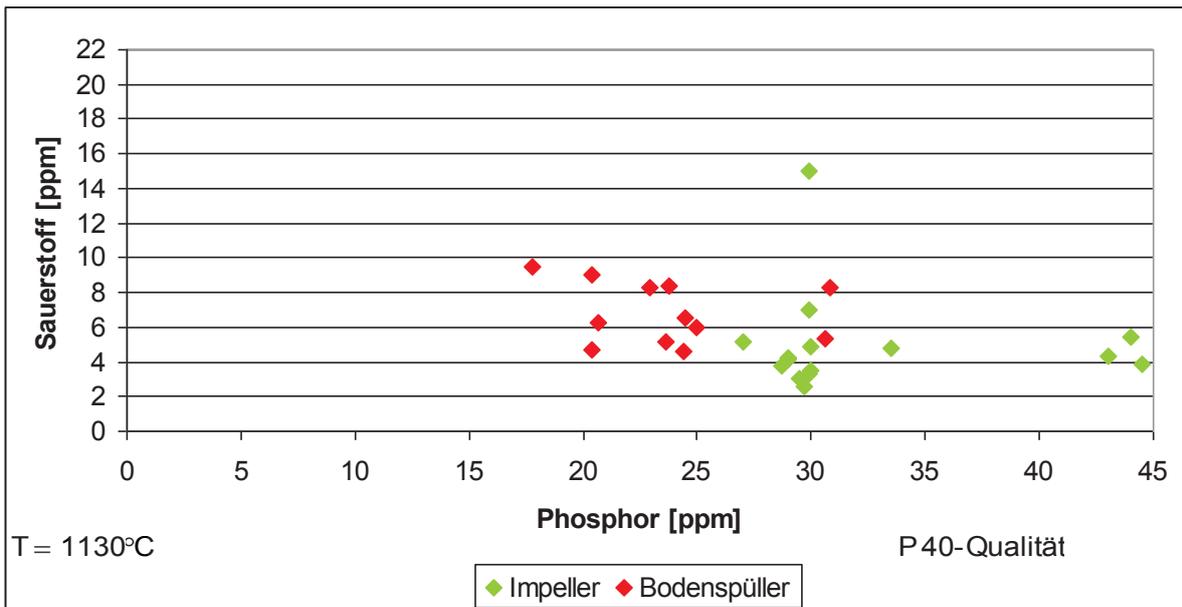


Diagramm 12.158: P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

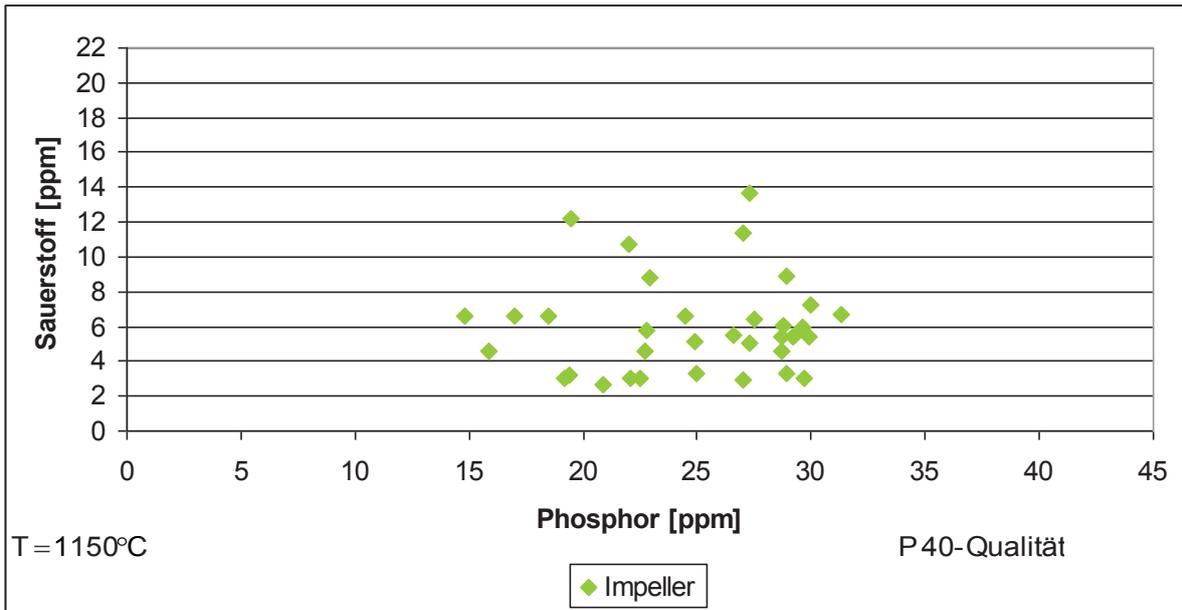


Diagramm 12.159: P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

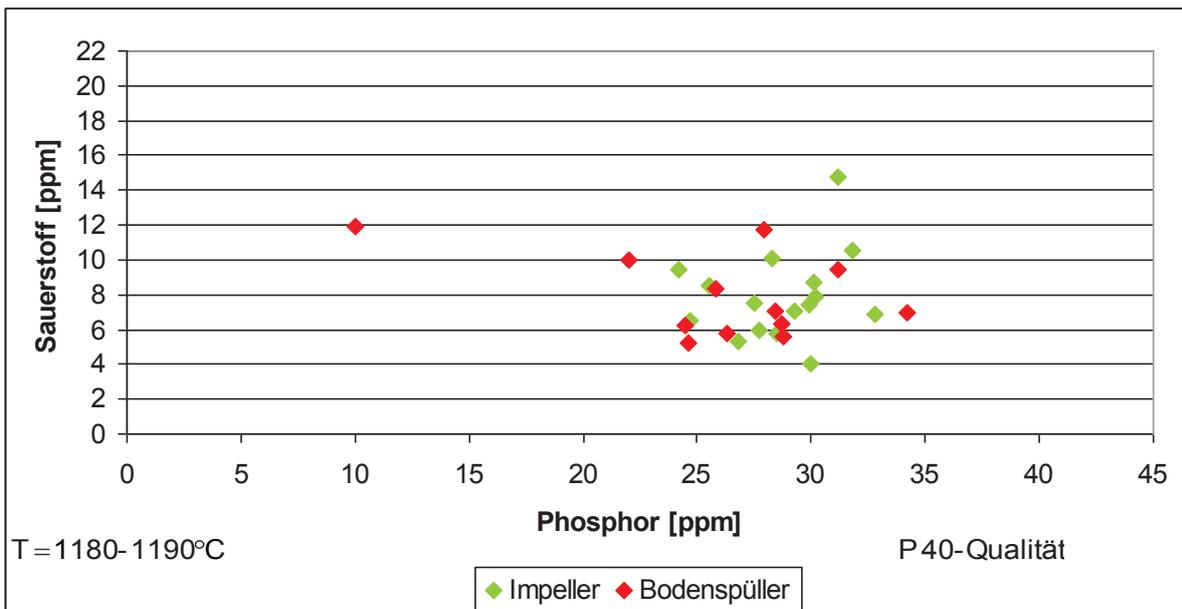


Diagramm 12.160: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

12.5.4 Darstellung des Dichteverlaufs bei OFN- und P 40-Qualitäten und ohne Spülbehandlung

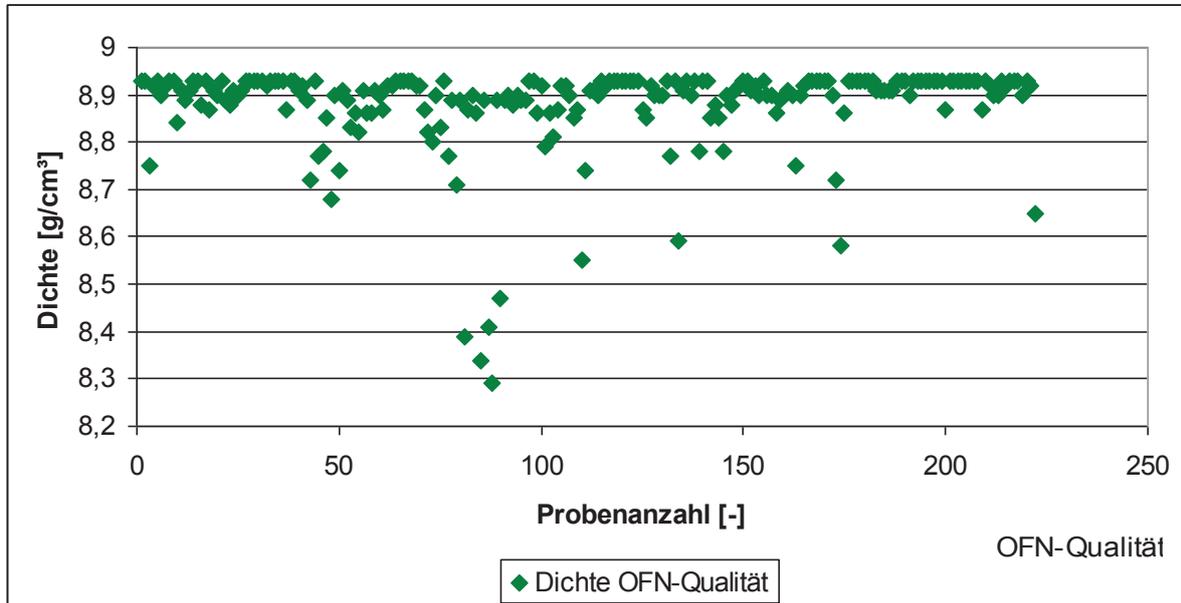


Diagramm 12.161: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen

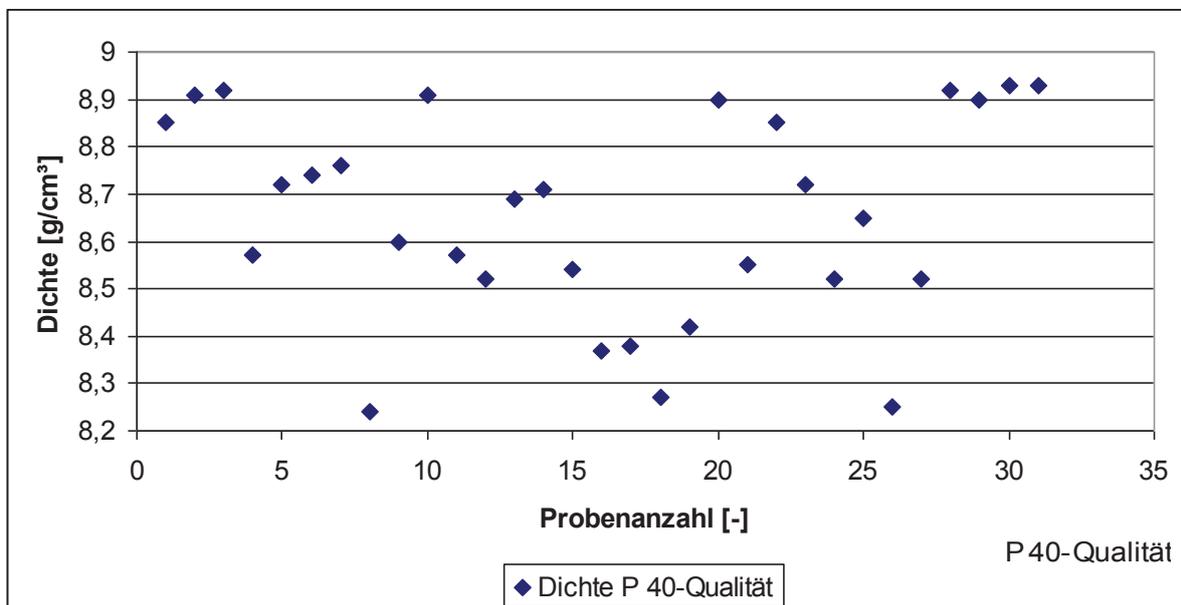


Diagramm 12.162: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

12.5.5 Vergleich der Dichte- und Wasserstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

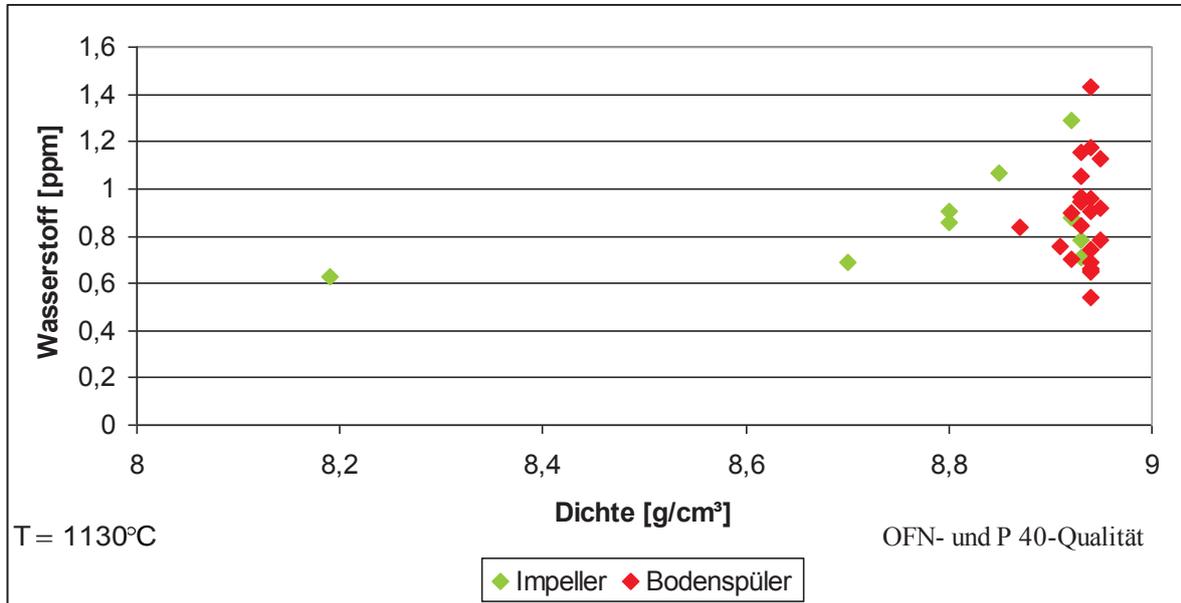


Diagramm 12.163: OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

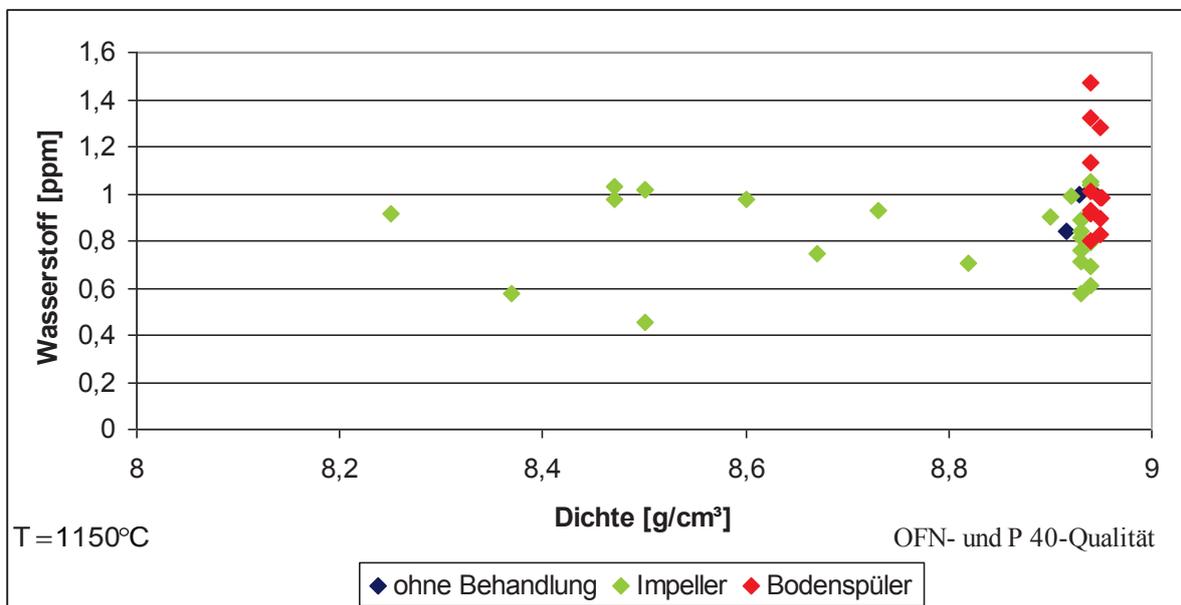


Diagramm 12.164: OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

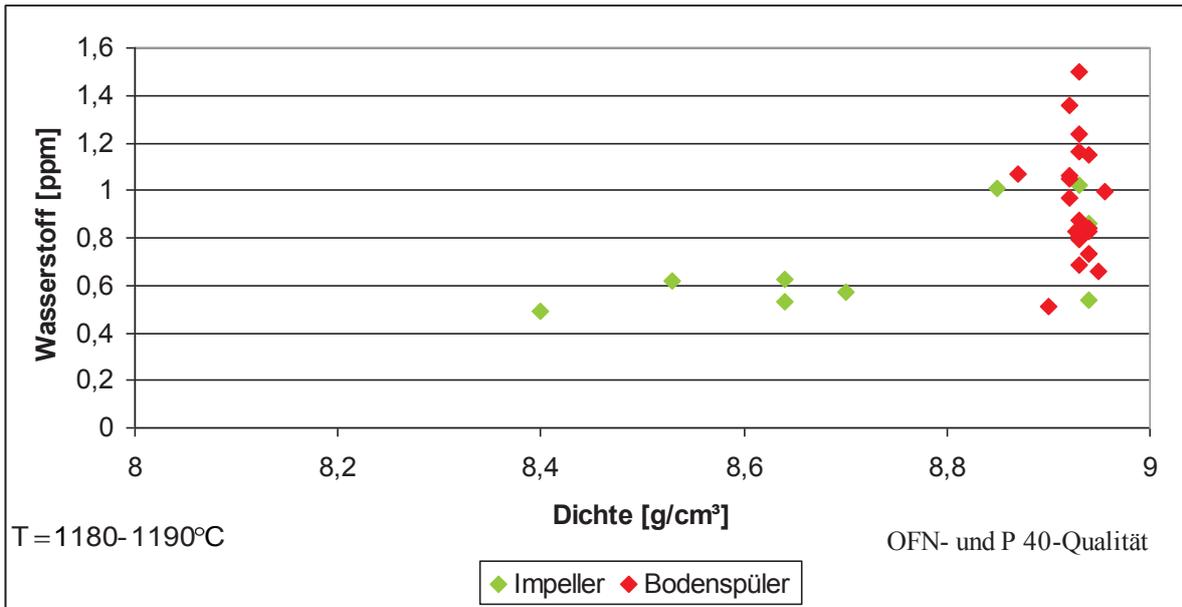


Diagramm 12.165: OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

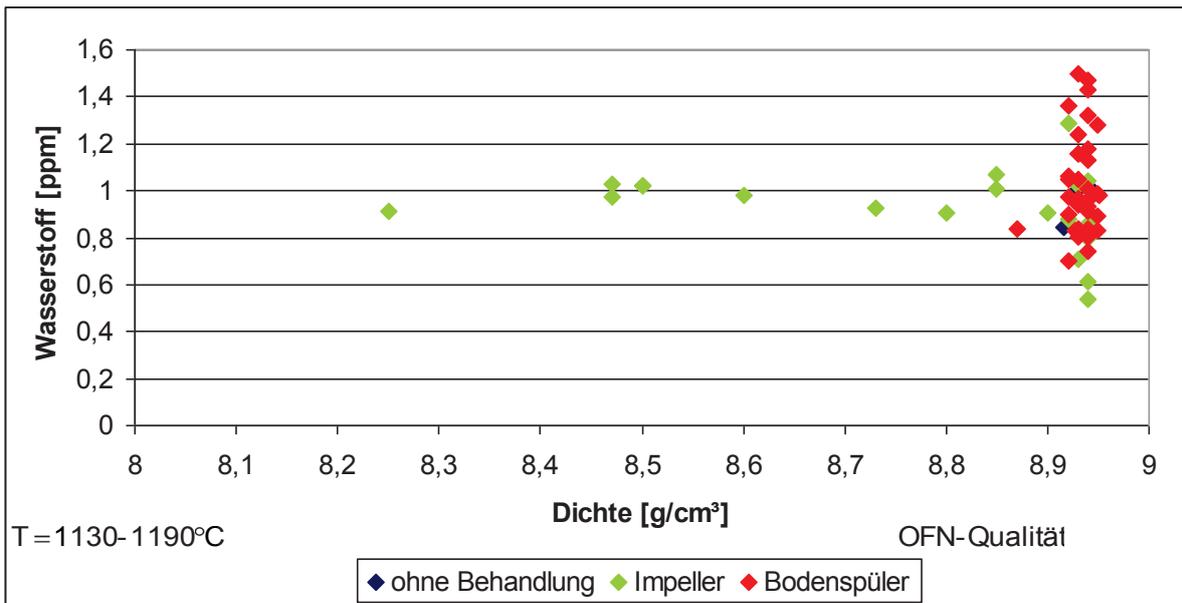


Diagramm 12.166: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen

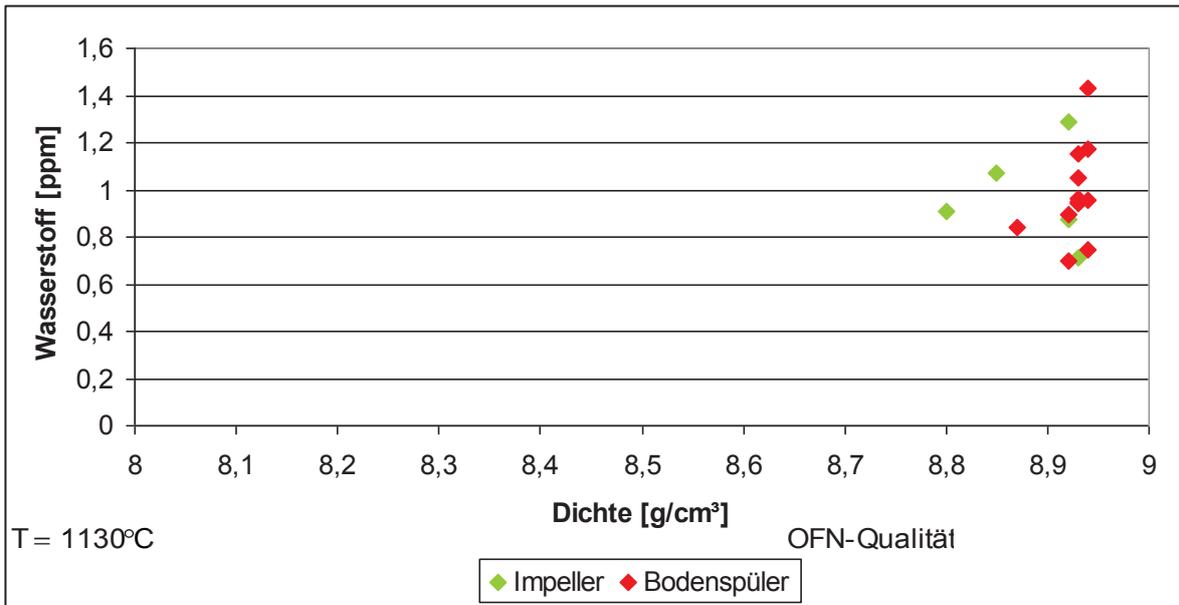


Diagramm 12.167: OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

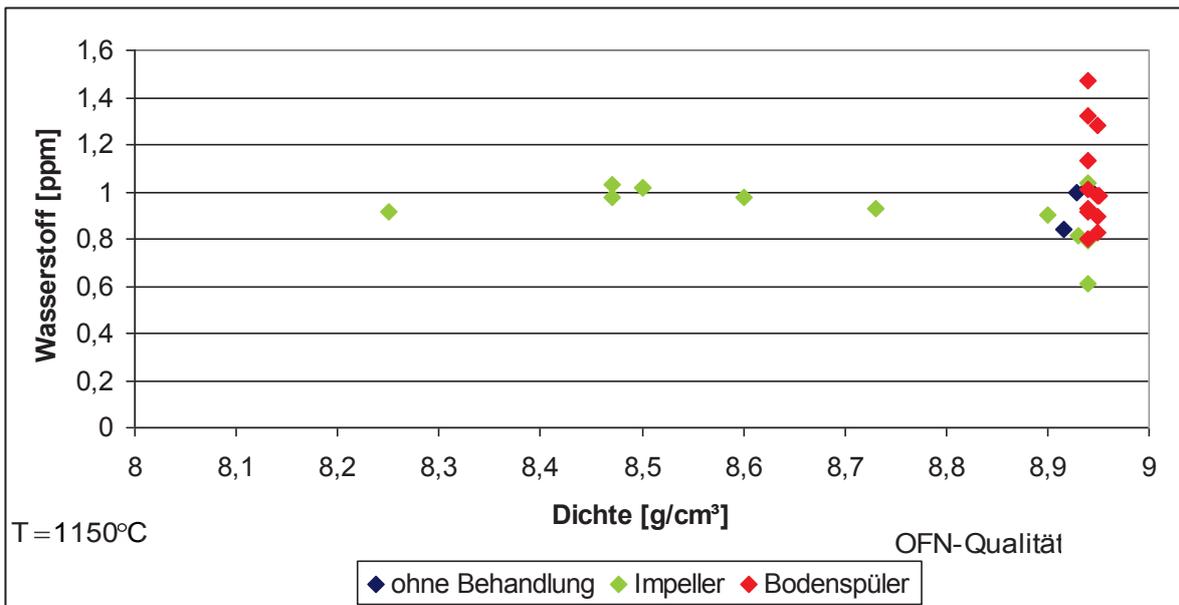


Diagramm 12.168: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

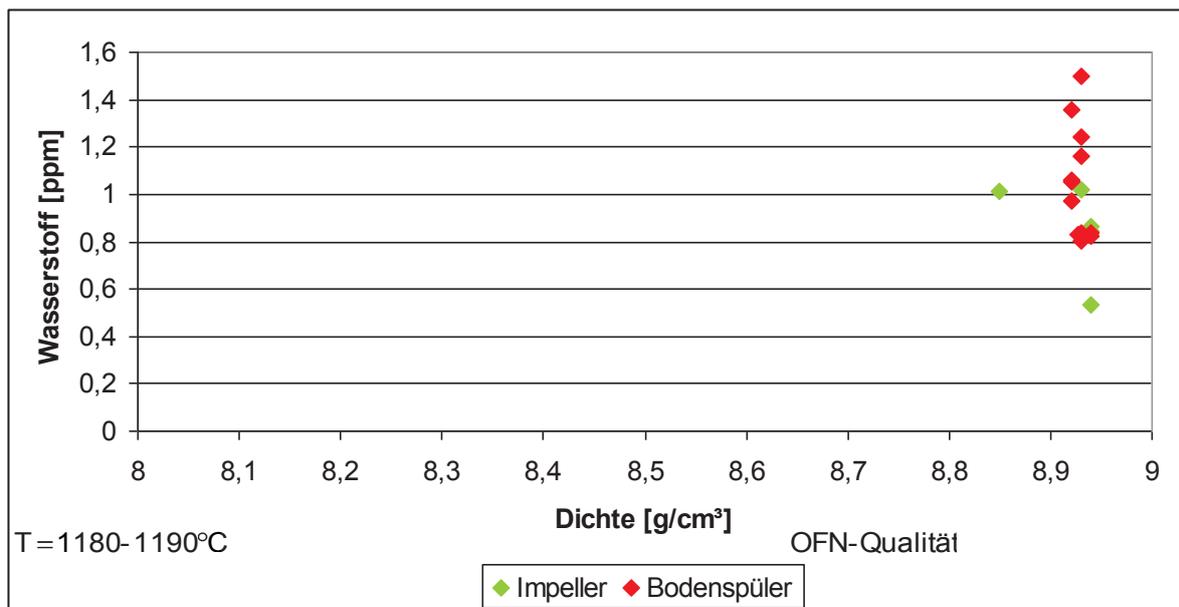


Diagramm 12.169: OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur

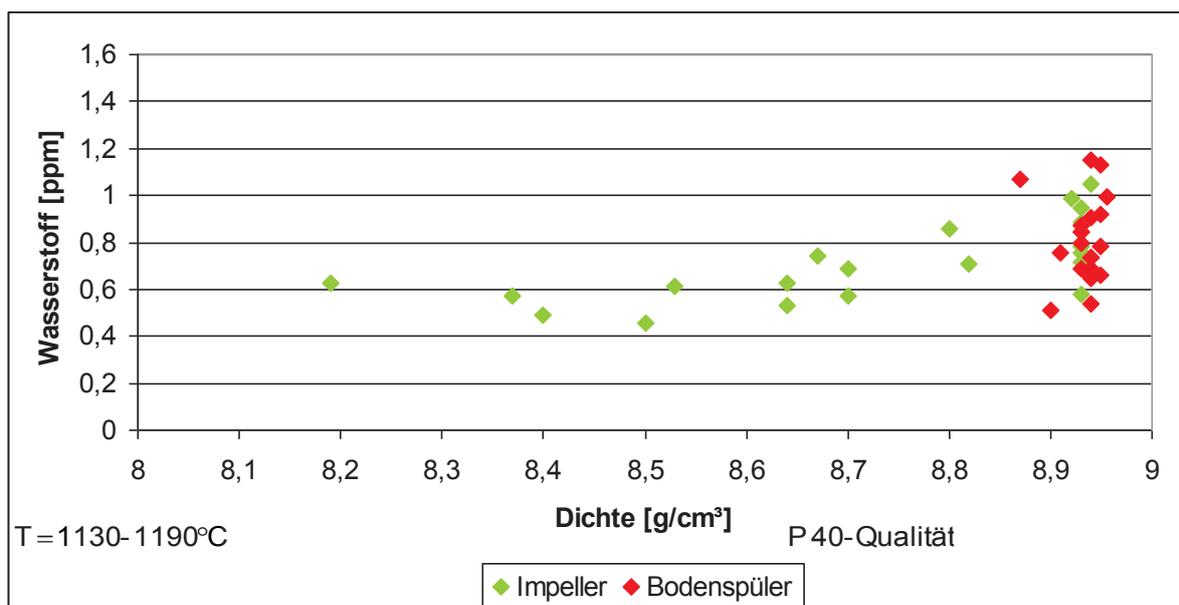


Diagramm 12.170: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

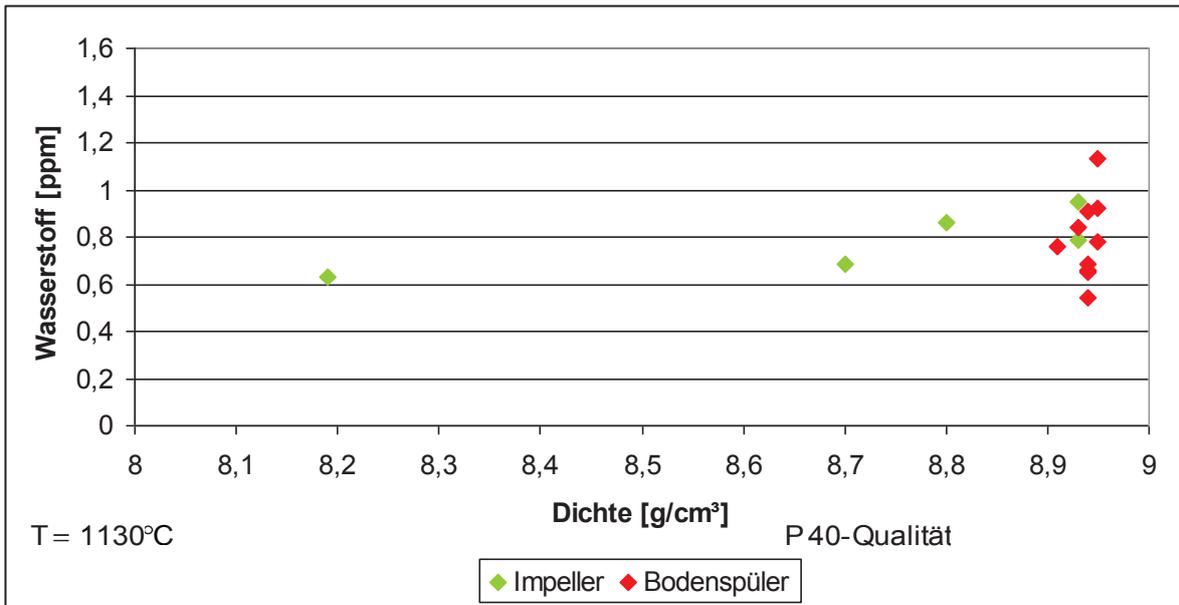


Diagramm 12.171: P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

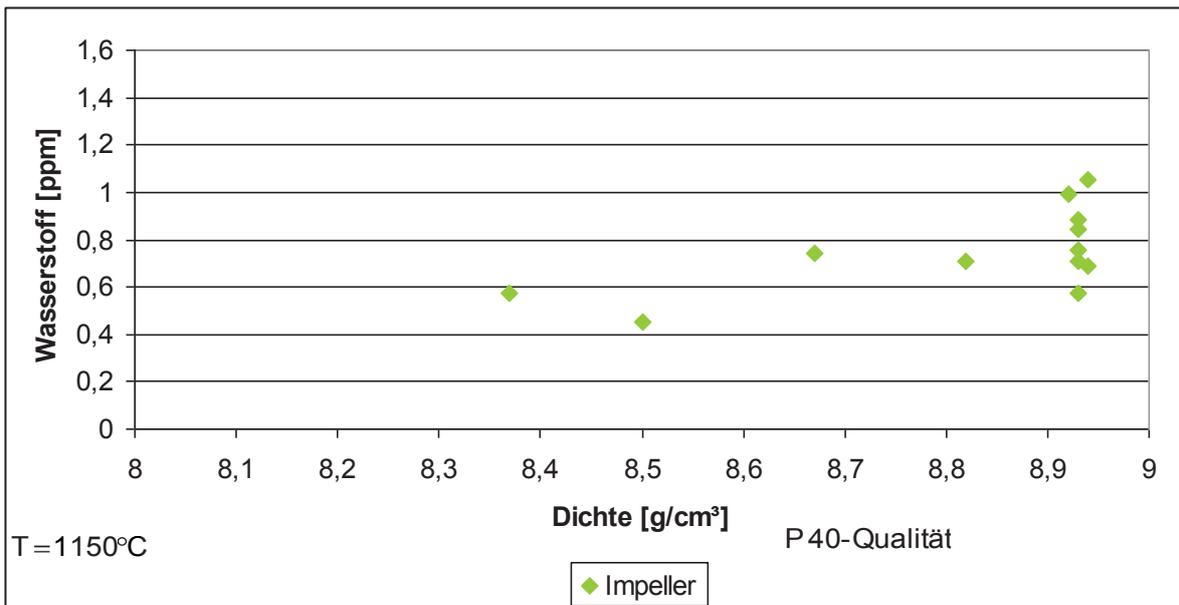


Diagramm 12.172: P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

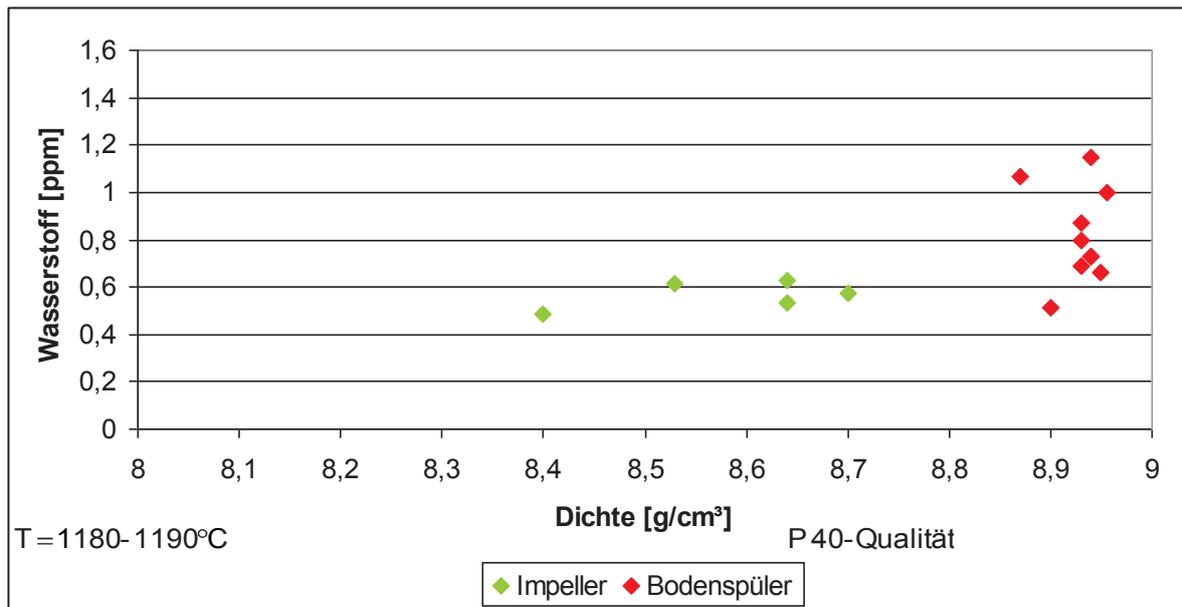


Diagramm 12.173: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

12.5.6 Vergleich der Dichte- und Sauerstoffgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

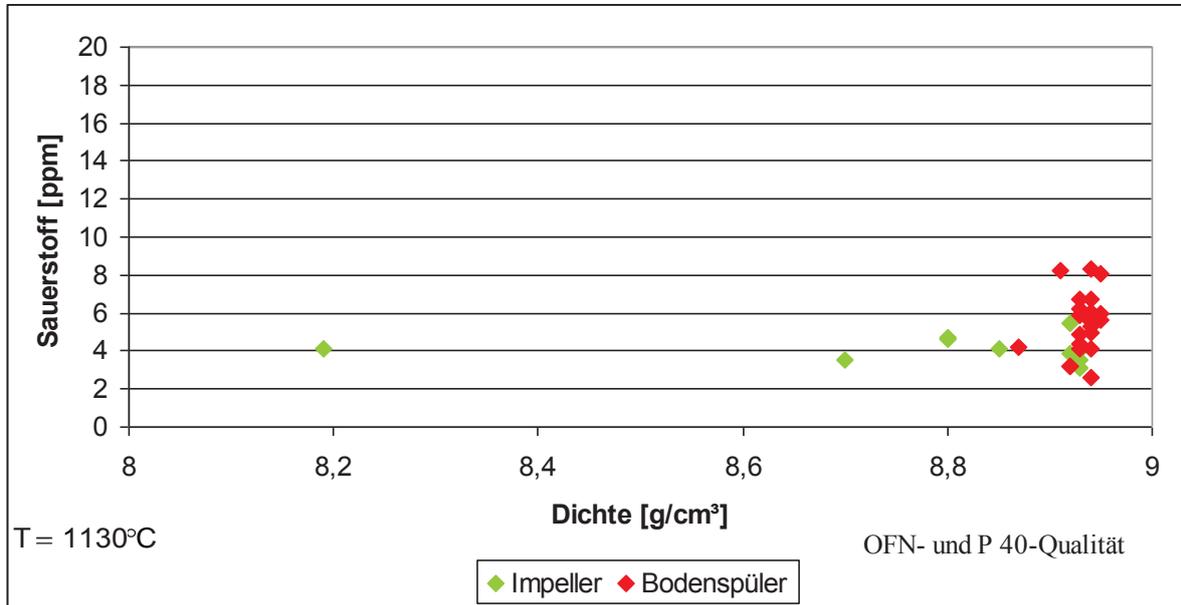


Diagramm 12.174: OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

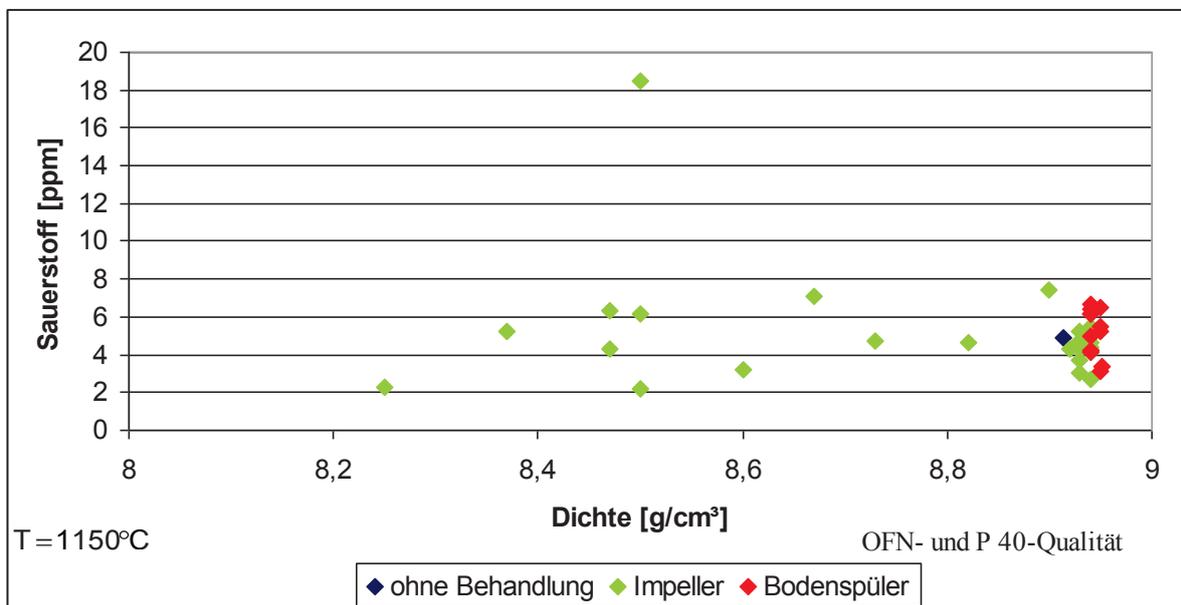


Diagramm 12.175: OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

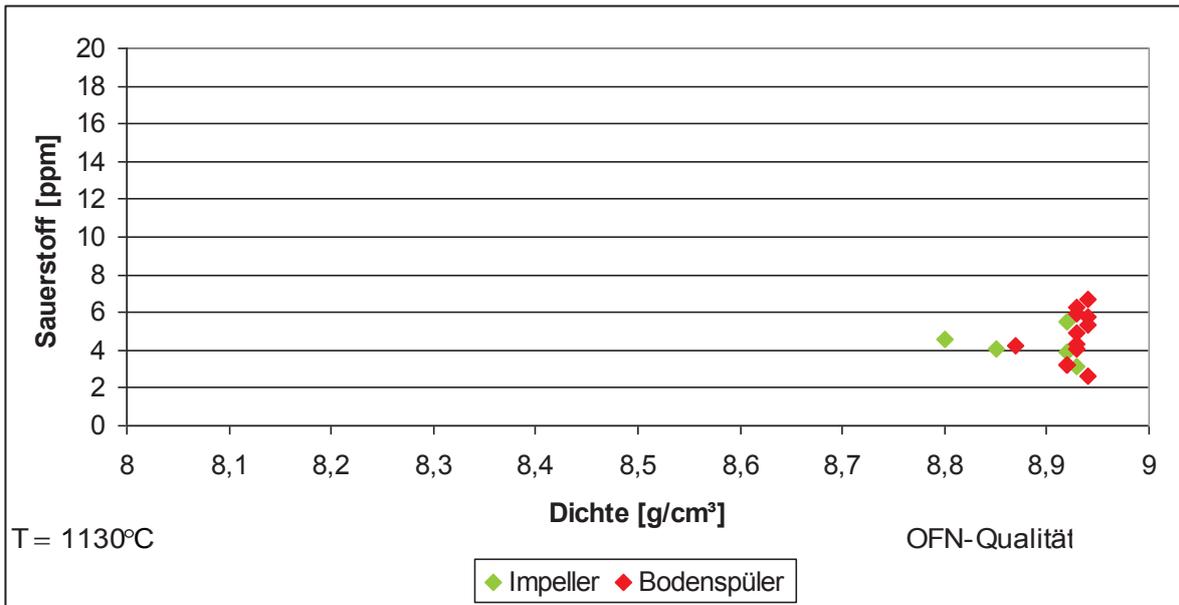


Diagramm 12.178: OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

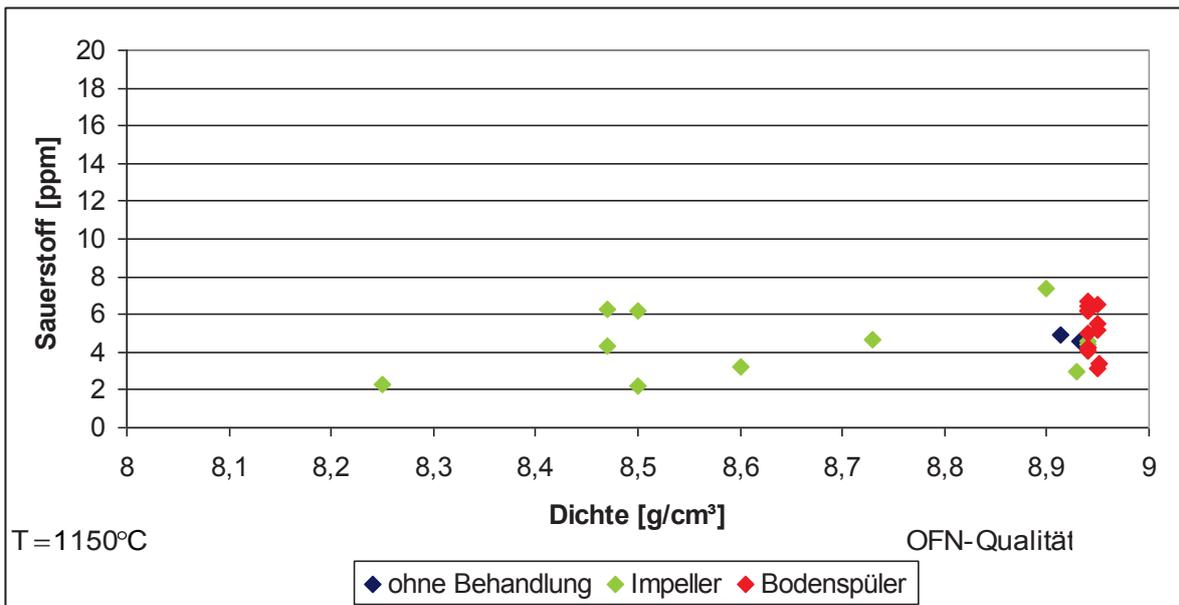


Diagramm 12.179: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

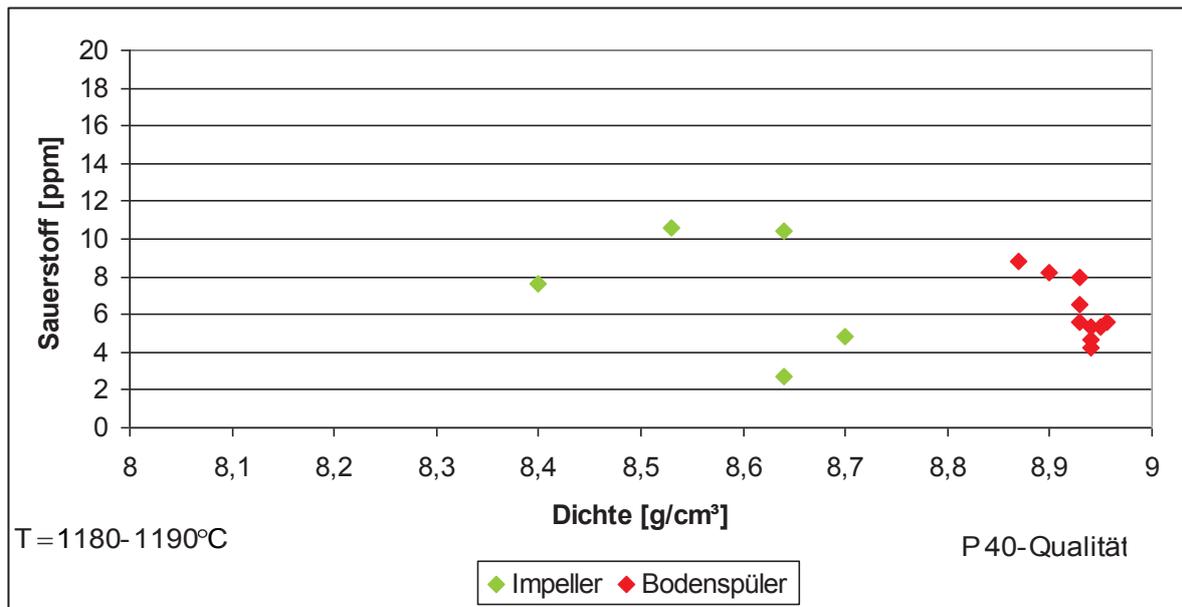


Diagramm 12.184: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

12.5.7 Vergleich der Dichte- und Phosphorgehalte in Abhängigkeit von der Behandlungsmethode

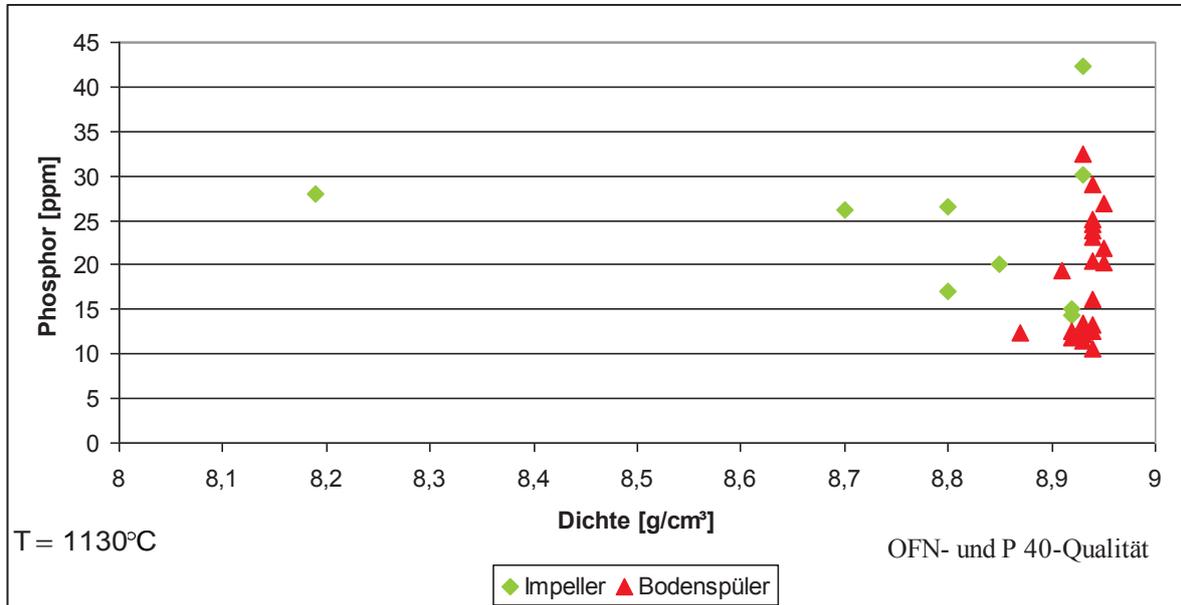


Diagramm 12.185: OFN- und P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

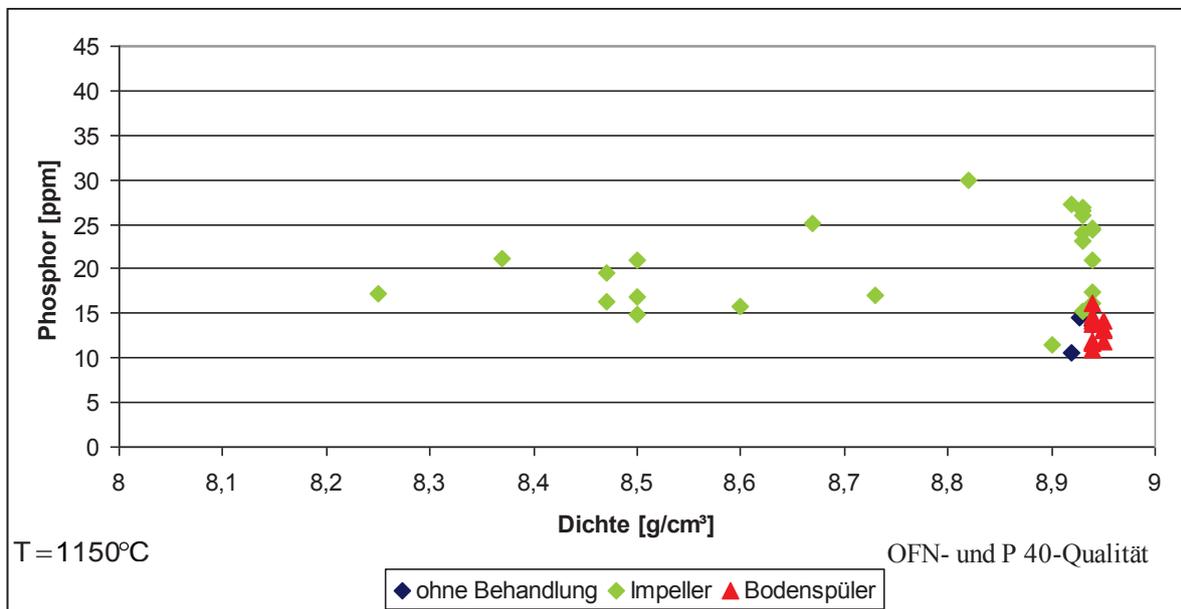


Diagramm 12.186: OFN- und P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

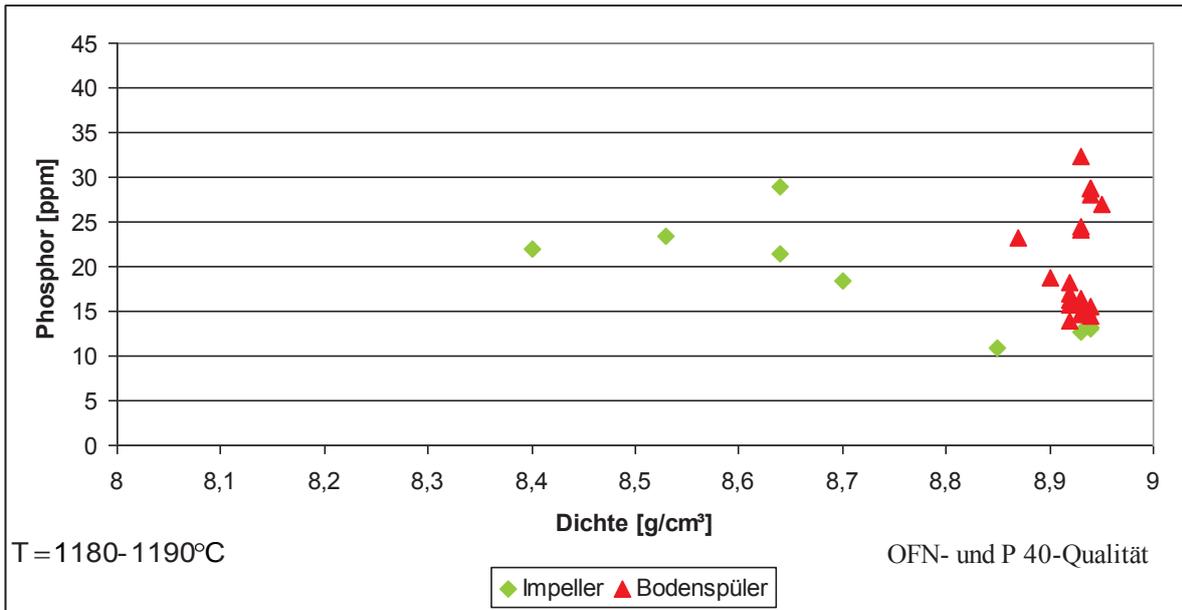


Diagramm 12.187: OFN- und P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

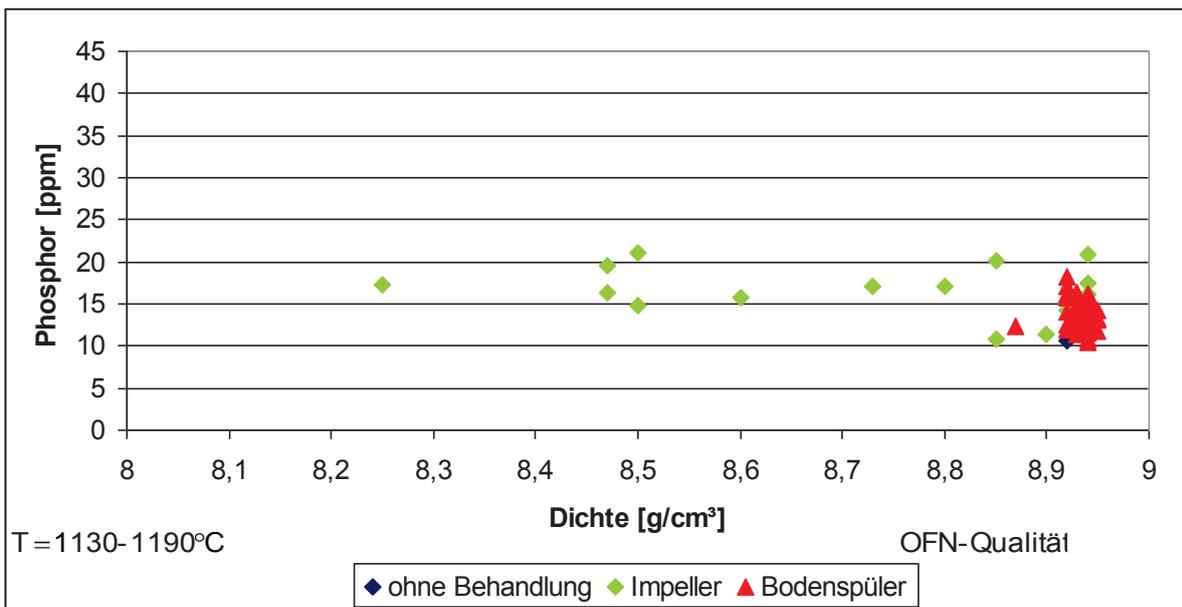


Diagramm 12.188: OFN-Qualität bei allen Gießtemperaturen

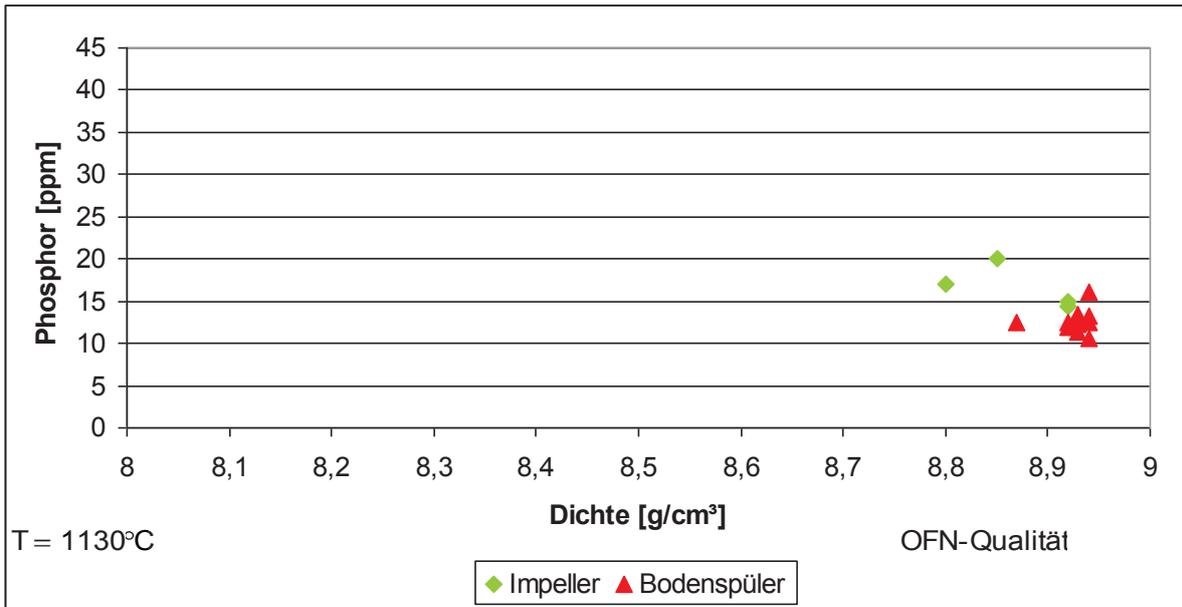


Diagramm 12.189: OFN-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

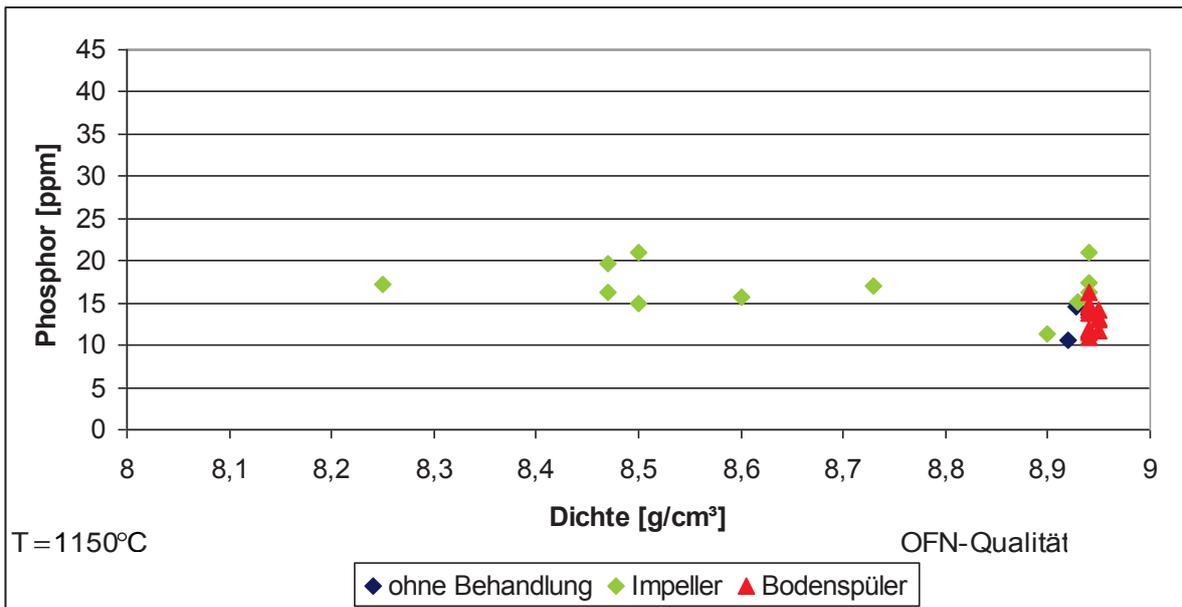


Diagramm 12.190: OFN-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

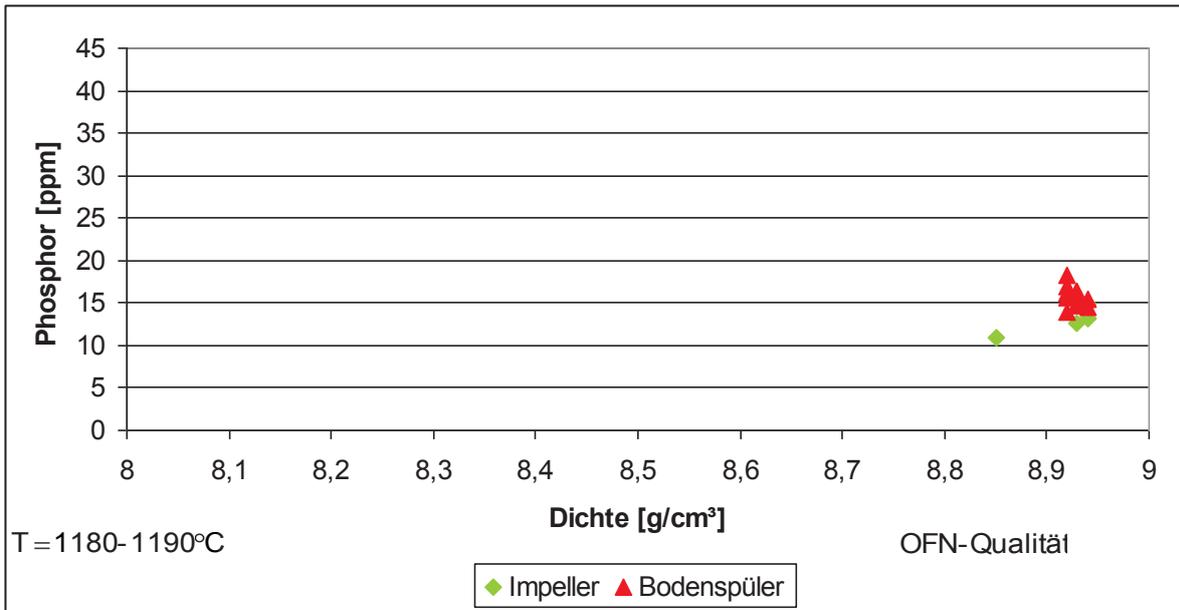


Diagramm 12.191: OFN-Qualität bei hoher Gießtemperatur

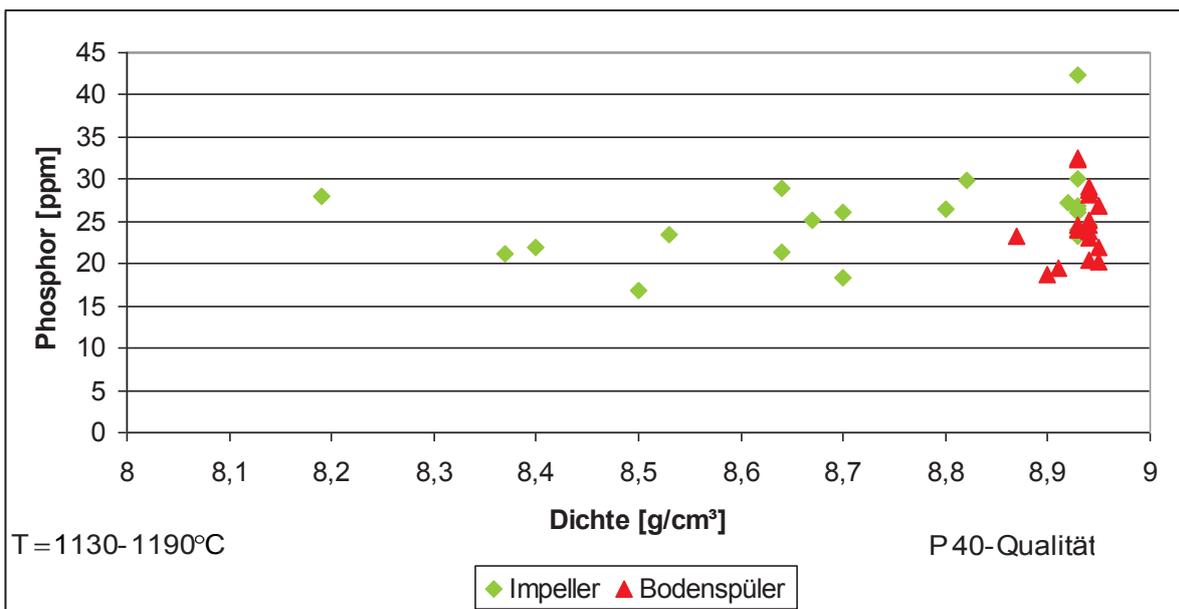


Diagramm 12.192: P 40-Qualität bei allen Gießtemperaturen

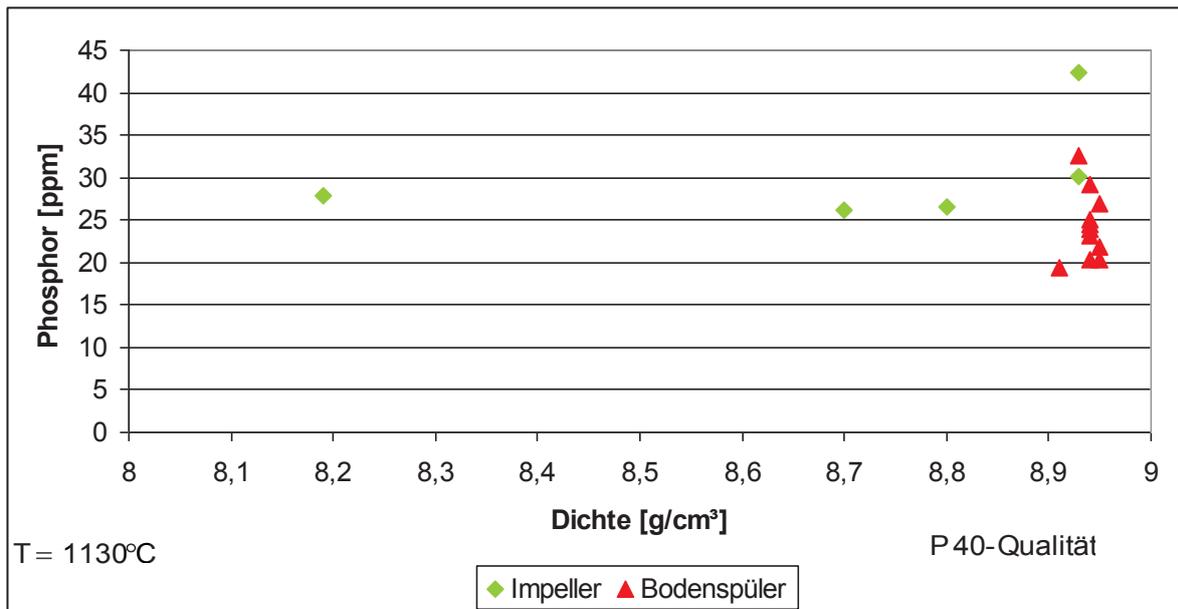


Diagramm 12.193: P 40-Qualität bei niedriger Gießtemperatur

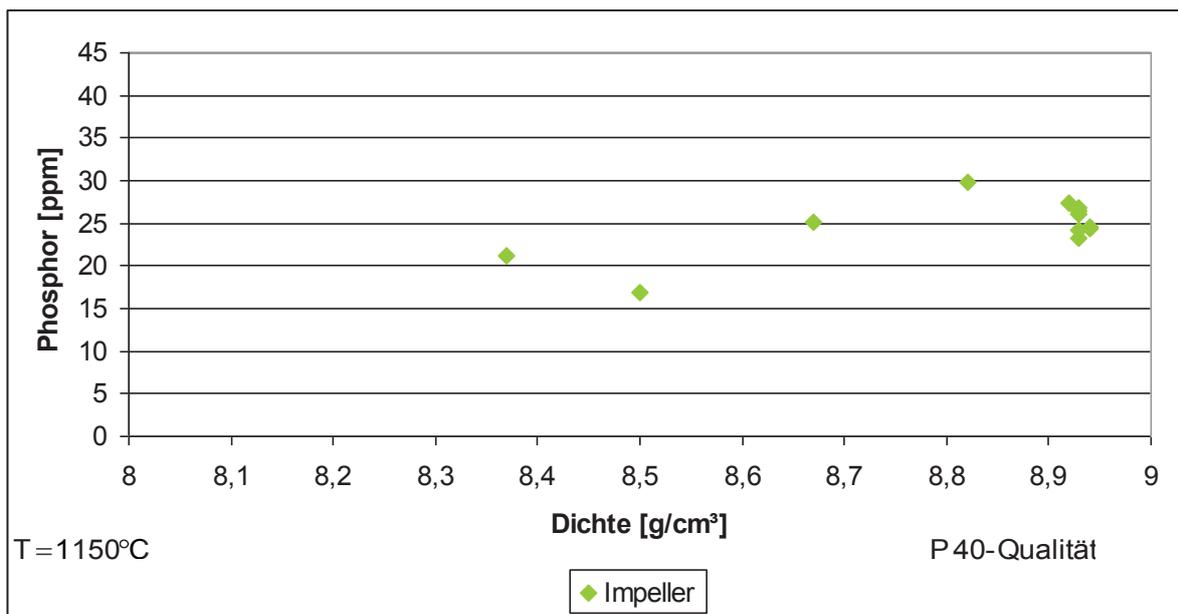


Diagramm 12.194: P 40-Qualität bei mittlerer Gießtemperatur

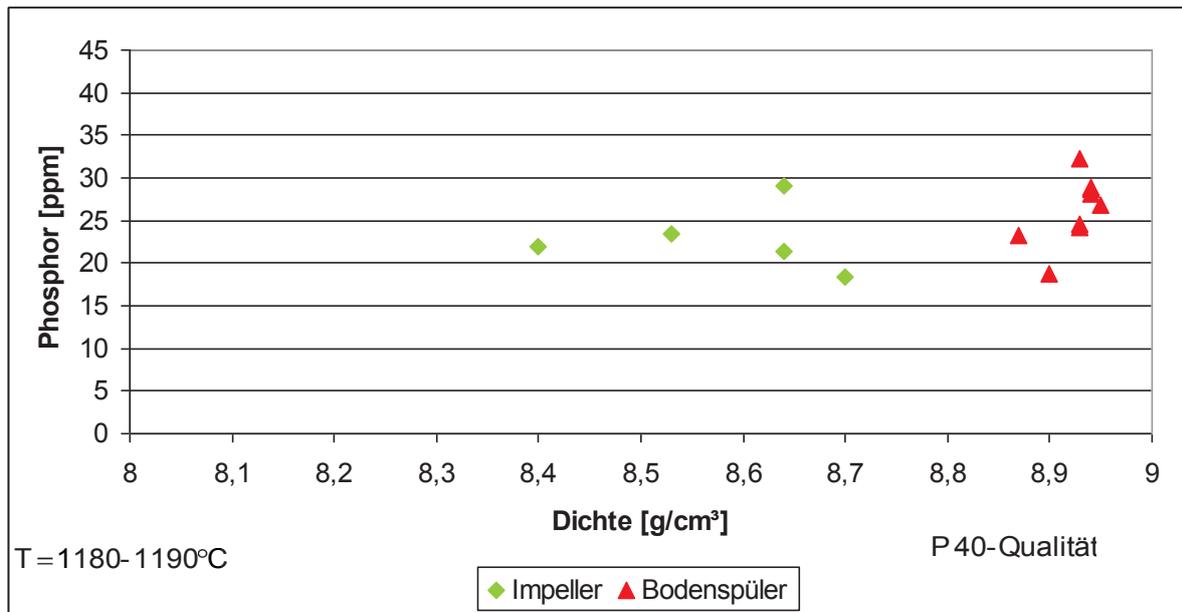


Diagramm 12.195: P 40-Qualität bei hoher Gießtemperatur

12.5.8 Vergleichende Zusammenfassung in Abhängigkeit der Behandlungsmethode

Tabelle 12-9: Darstellung der Bereichseinteilung bei OFN-Qualität

	Wasserstoff [ppm]	Sauerstoff [ppm]	Phosphor [ppm]	Dichte [g/cm³]
Bereich hoch	1,77 - 1,21	11,45 - 8,60	24,10 - 18,30	8,95 - 8,90
Bereich mittel	1,20 - 0,64	8,50 - 5,40	18,20 - 12,20	8,89 - 8,80
Bereich niedrig	0,63 - 0,09	5,30 - 2,20	12,10 - 6,10	8,79 - 8,25

Tabelle 12-10: Darstellung der prozentuellen Aufteilung bei OFN-Qualität

	Bereich hoch [%]	Bereich mittel [%]	Bereich niedrig [%]
ohne Behandlung H ₂	-	59	41
Impeller H ₂	3	60	37
Spülkegel (gute Kathoden) H ₂	4	88	8
Spülkegel (schlechte Kathoden) H ₂	25	69	9
ohne Behandlung O ₂	17	48	35
Impeller O ₂	4	41	55
Spülkegel (gute Kathoden) O ₂	4	29	67
Spülkegel (schlechte Kathoden) O ₂	2	63	35
ohne Behandlung P	-	48	52
Impeller P	36	48	16
Spülkegel (gute Kathoden) P	-	74	26
Spülkegel (schlechte Kathoden) P	-	79	21
ohne Behandlung ρ	68	21	11
Impeller ρ	54	14	32
Spülkegel (gute Kathoden) ρ	100	-	-
Spülkegel (schlechte Kathoden) ρ	96	4	-

Tabelle 12-11: Darstellung der Bereichseinteilung bei P 40-Qualität

	Wasserstoff [ppm]	Sauerstoff [ppm]	Phosphor [ppm]	Dichte [g/cm³]
Bereich hoch	1,32 - 0,95	18,45 - 13,40	44,50 - 32,90	8,95 - 8,90
Bereich mittel	0,94 - 0,54	13,30 - 8,00	32,80 - 20,90	8,89 - 8,80
Bereich niedrig	0,53 - 0,13	7,90 - 2,60	20,80 - 8,90	8,79 - 8,19

Tabelle 12-12: Darstellung der prozentuellen Aufteilung bei P 40-Qualität

	Bereich hoch [%]	Bereich mittel [%]	Bereich niedrig [%]
ohne Behandlung H ₂	-	-	-
Impeller H ₂	9	47	44
Spülkegel (gute Kathoden) H ₂	4	67	29
Spülkegel (schlechte Kathoden) H ₂	25	54	21
ohne Behandlung O ₂	-	-	-
Impeller O ₂	4	14	82
Spülkegel (gute Kathoden) O ₂	-	29	71
Spülkegel (schlechte Kathoden) O ₂	4	42	54
ohne Behandlung P	-	-	-
Impeller P	6	84	10
Spülkegel (gute Kathoden) P	-	79	21
Spülkegel (schlechte Kathoden) P	4	71	25
ohne Behandlung ρ	26	6	68
Impeller ρ	45	10	45
Spülkegel (gute Kathoden) ρ	100	-	-
Spülkegel (schlechte Kathoden) ρ	90	10	-