



# **Qualitative und wirtschaftliche Bewertung eines neuartigen Regenerationsverfahrens für anorganische Bindersysteme**

-

Einsatz anorganischer Regenerate in der Kleinserienfertigung  
eines mittelständischen Unternehmens

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Aktenzeichen 26819-21/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Harald Schwickal

Michael Becker

Dipl.-Ing. Stefan Magerl

April 2011



(26819-21/2)

## 1 Projektkennblatt

06/02		<b>Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>26819</b>	Referat	Fördersumme		<b>207.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Qualitative und wirtschaftliche Bewertung eines neuartigen Regenerationsverfahrens für anorganische Bindersysteme - Einsatz anorganischer Regenerate in der Kleinserienfertigung eines mittelständischen Unternehmens</b>			
<b>Stichworte</b>		Gießerei, Altsande, Regeneration, Anorganisch Bindersysteme			
Laufzeit		Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>18 Monate</b>		<b>26.03.2009</b>	<b>31.12.2010</b>	<b>Abschluss</b>	
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		Becker GmbH CAD-CAM-CAST Michael Becker Brückenstraße 19 35239 Steffenberg-Quotshausen		Tel +49-6465-9143-10 Fax +49-6465-4607 Projektleitung Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>		Technische Universität München Fakultät für Maschinenwesen Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b> Heutige Bindersysteme für Gießereisande bestehen aus organischen Bestandteilen, die bereits ab 300 °C zerfallen. Durch das Verbrennen der organischen Bestandteile werden starke Emissionen freigesetzt, die eine Belastung für die Umwelt und die Mitarbeiter von Gießereien darstellen und eine zusätzliche, kostenintensive Absaugung und Abluftreinigung erforderlich machen. Das Ziel dieses Projektes ist die Einführung und Bewertung eines Regenerationsverfahrens für anorganische Altsande im Leichtmetallguss, um den Materialkreislauf der anorganischen Kernfertigung zu schließen und damit die Voraussetzung für einen breiten Einsatz dieser umweltfreundlichen Bindersysteme zu schaffen.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die Entwicklung und Bewertung eines Regenerationsverfahrens für den Einsatz in der Serienproduktion erfolgt in einzelnen Arbeitspaketen. Schwerpunkte bilden dabei die technologische Entwicklung des Prozesses und eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Für eine gezielte Untersuchung der regenerierten Altsande wird ein Versuchswerkzeug eingesetzt. Damit kann der Einfluss der Qualität des Regenerats auf die Prozesse Kernfertigung und Gießen untersucht werden. Die Regeneration erfolgt in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München und der Leichtmetallgießerei der BMW Group in Landshut. Der Altsand wird in mehreren Versuchsreihen mit unterschiedlichen Parametern im Pilotbetrieb regeneriert. Nach der Fertigung der Versuchskerne und -bauteile erfolgen weitere Prüfungen der Regenerate bei der Ashland Südchemie Kernfest GmbH in Hilden. Mit dem erarbeiteten Anlagenkonzept zur Regeneration und den vorliegenden Versuchsergebnissen wird abschließend eine wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens durchgeführt.

**Ergebnisse und Diskussion**

Das für die Untersuchung eingesetzte und modular aufgebaute Pilotverfahren besteht aus einer mechanischen und einer thermischen Regeneration. Dabei wurden die Prozesse einzeln oder kombiniert in unterschiedlicher Reihenfolge chargenweise betrieben. Für die qualitative Bewertung des Kernfertigungs- und Gießprozesses wurde eine spezielle Versuchsgeometrie entworfen und umgesetzt. Um den Erfolg der einzelnen Regenerationsversuche bewerten zu können, wurde ein neues chemisches Prüfverfahren entwickelt. Ziel war die Bestimmung der Binderreste des Wasserglases im regenerierten Formgrundstoff, die bei der Wiederverwendung in Lösung gehen und die ursprünglichen Eigenschaften des Bindersystems negativ beeinflussen. Bei der Auswertung der chemischen und fertigungstechnischen Prüfungen hat sich die mechanisch-thermische Regeneration mit einer Neusandzugabe zwischen den beiden Prozessschritten durch besonders gute Verarbeitungseigenschaften ausgezeichnet. Dieses Verfahren eignet sich nach den Versuchsergebnissen für einen Einsatz in der Serienfertigung.

Die neue chemische Prüfung des löslichen Restbinderanteils im Formstoff konnte erfolgreich eingeführt werden. In weiteren Fertigungsversuchen muss die Gültigkeit der sehr eng gesetzten und auf Neusand basierenden Grenzwerte weiter verifiziert und unter Umständen angepasst werden. Weiterhin wurde deutlich, dass eine Prüfung zusätzlicher fertigungstechnischer Kenngrößen, wie z.B. der Gasdurchlässigkeit, zu empfehlen ist.

**Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Schwickal, H.; Hoffmann, H.; Blümlhuber, W.; Weissenbek, E.: *Regeneration anorganischer Kernsande*. 100 Jahre VDG, Vortrag auf dem Deutschen Gießereitag, 14. Mai 2009, Berlin

Schwickal, H.; Hoffmann, H.; Blümlhuber, W.; Weissenbek, E.: *Regenerierung von anorganisch gebundenen Gießereikernsanden*. *Giesserei* 96, 11/2009,

**Fazit**

Auf Basis der Projektergebnisse kann eine Umstellung der Kernfertigung von Gießereien auf anorganische Bindersysteme mit geschlossenem Materialkreislauf technologisch umgesetzt werden. Die Projektergebnisse tragen zu einer Erweiterung des Wissenstandes über das Verhalten anorganischer Regeneratsande bei und unterstützen eine schnelle und nachhaltige Einführung dieser Bindersysteme, verbunden mit einer deutlichen Umweltentlastung.

Die Ergebnisse zeigen, dass für einen wirtschaftlichen Erfolg ein kontinuierlicher, vollautomatisierter Betrieb mit einem geringen Personal- und Logistikaufwand entscheidend ist. Diese Betriebsart ist in mittelständischen Unternehmen nicht gegeben, wodurch mit den bestehenden Randbedingungen ein wirtschaftlicher Betrieb dieser anorganischen Regeneration nicht möglich ist. Dahingegen kann das Verfahren in großen Unternehmen mit einem jährlichen Sandbedarf von 7-50 Tsd. Tonnen wirtschaftlich eingesetzt werden. Die BMW Group wird das erarbeitete Regenerationsverfahren in den Serienbetrieb integrieren

## 2 Inhaltsverzeichnis

1	Projektkennblatt .....	2
2	Inhaltsverzeichnis .....	4
3	Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen .....	5
4	Zusammenfassung .....	7
5	Einleitung .....	8
6	Angaben zum Projekt .....	11
6.1	Lösungskonzept .....	11
6.2	Darstellung der Projektdurchführung .....	12
7	Versuchsaufbau und Prüfmethode n .....	15
7.1	Kernfertigung mit anorganischen Bindersystemen .....	15
7.2	Versuchsanlage zur Regeneration anorganischer Kernsande .....	15
7.3	Prüfmethode n und Parameter .....	16
8	Projektergebnisse .....	22
8.1	Versuchsgeometrie .....	22
8.2	Laborversuche - Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens .....	24
8.3	Laborversuche - Definition der Prozessparameter .....	27
8.4	Betriebsversuche - Einmalige Regeneration .....	32
8.5	Betriebsversuche - Mehrfache Regeneration .....	37
8.6	Auswertung der Maßhaltigkeit der Gussteile .....	43
8.7	Anlagenkonzept .....	50
8.8	Wirtschaftlichkeit .....	51
9	Fazit .....	55
10	Literaturverzeichnis .....	58

### 3 Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

#### Abbildungen

Abbildung 5-1:	Verbrennungsgase und Kondensatbildung beim Gießprozess mit organisch gebundenen Sandkernen .....	8
Abbildung 6-1:	Projektstruktur und Vorgehensweise .....	12
Abbildung 7-1:	Prinzip der anorganischen Sandkernfertigung mit Warm-Box-Aushärtung	15
Abbildung 7-2:	Schematische Darstellung der Versuchsanlage zur mechanischen bzw. thermischen Regeneration anorganischer Altsande.....	16
Abbildung 7-3:	Schema zur Bestimmung der Restalkalität .....	17
Abbildung 7-4:	Siebturm und Siebgrößen bei der Siebanalyse .....	18
Abbildung 7-5:	Histogramm (Verteilungsdichtekurve) der Korngrößenverteilung .....	19
Abbildung 7-6:	Verteilungssummenkurve der Korngrößenverteilung .....	19
Abbildung 7-7:	Schematischer Versuchsaufbau zur Prüfung der Heißdeformation [MS98] .....	20
Abbildung 7-8:	Beispielhafter Weg-Zeit-Verlauf der Heißdeformation (Quelle: ASK Chemicals GmbH) .....	21
Abbildung 8-1:	Versuchsgießform mit Probekörpern .....	22
Abbildung 8-2:	Einzelteile der Gießform im Werkzeugunterteil (links); Zusammenbau von Unterteil und Kern ohne Oberteil (rechts) .....	23
Abbildung 8-3:	Gegossenes Versuchsteil .....	23
Abbildung 8-4:	Ausgangspunkt der Methodenentwicklung.....	25
Abbildung 8-5:	Alkali- und Siliziumanteil der Versuchsreihe L1 .....	28
Abbildung 8-6:	Alkali- und Siliziumanteil der Versuchsreihe L2 .....	28
Abbildung 8-7:	Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalt) in Abhängigkeit der Prozessparameter bei Versuch L1 (links) und Versuch L2 (rechts) .....	29
Abbildung 8-8:	Siliziumgehalt ( $\text{SiO}_2$ -Gehalt) in Abhängigkeit der Prozessparameter bei Versuch L1 (links) und Versuch L2 (rechts) .....	29
Abbildung 8-9:	Formstoffmodul in Abhängigkeit der Prozessparameter bei Versuch L1 (links) und Versuch L2 (rechts) .....	30
Abbildung 8-10:	Thermisches Prozessfenster der mechanisch-thermischen Regeneration; bei mechanischer Vorbehandlung .....	31
Abbildung 8-11:	Formstoffmodul - Chemische Prüfung der Versuchsreihe E .....	33
Abbildung 8-12:	Gewicht der Kernpakete und Gasdurchlässigkeit der Prüfkörper der Versuchsreihe E .....	34
Abbildung 8-13:	Biegefestigkeiten bei einmaliger Regeneration der Versuchsreihe E .....	35
Abbildung 8-14:	Hot Distortion bei einmaliger Regeneration der Versuchsreihe E.....	36

Abbildung 8-15: Formstoffmodul - Chemische Prüfung bei mehrfacher Regeneration, Versuche M, S, U .....	38
Abbildung 8-16: Gewicht der Kernpakete und Gasdurchlässigkeit der Prüfkörper bei mehrfacher Regeneration; Versuche M, S, U .....	40
Abbildung 8-17: Biegefestigkeit bei mehrfacher Regeneration; Versuche M, S, U .....	41
Abbildung 8-18: Hot Distortion bei mehrmaliger Regeneration, Versuche M, S, U .....	42
Abbildung 8-19: Ausgewählte Messstrecken des Versuchsbauteils .....	43
Abbildung 8-20: Längenmaß L1 - Mittlere Abweichung .....	44
Abbildung 8-21: Längenmaß L2 - Mittlere Abweichung .....	45
Abbildung 8-22: Längenmaß L4 - Mittlere Abweichung .....	45
Abbildung 8-23: Längenmaß L3 - Mittlere Abweichung .....	46
Abbildung 8-24: Längenmaß L6 - Mittlere Abweichung der Gussteilhöhe .....	46
Abbildung 8-25: Längenmaß L7 - Mittlere Abweichung der Gussteilbreite .....	47
Abbildung 8-26: Längenmaß L8 - Mittlere Abweichung der Gussteiltiefe .....	47
Abbildung 8-27: Position des Prüfkörpers zur Heißdeformation im Gussteil .....	48
Abbildung 8-28: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteil von Neusand .....	48
Abbildung 8-29: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von U1 .....	49
Abbildung 8-30: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von U3 .....	49
Abbildung 8-31: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von U5 .....	49
Abbildung 8-32: Ablauf der anorganischen Regeneration .....	50
Abbildung 8-33: Break-Even-Analyse für Anlagenkonfiguration 2 .....	54

## Tabellen

Tabelle 7-1: Übersicht der Prüfmethode und -parameter .....	17
Tabelle 8-1: Referenzwerte von Neusand für den Anteil an Alkali und Silizium .....	26
Tabelle 8-2: Versuchsparameter zur Ermittlung des Prozessfensters .....	27
Tabelle 8-3: Versuchsparameter der Betriebsversuche zur einmaligen Regeneration .....	32
Tabelle 8-4: Rezeptparameter und Kernschießparameter der Betriebsversuche .....	32
Tabelle 8-5: Versuchsparameter der Betriebsversuche zur mehrfachen Regeneration .....	37
Tabelle 8-6: Leistungsdaten und Investitionskosten unterschiedlicher Anlagenkonzepte .....	51
Tabelle 8-7: Vergleich der Kennzahlen - Anlagenkonfiguration 1 und 2 .....	53

## 4 Zusammenfassung

Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden in Gießereien anorganische Bindersysteme für Sandkerne nur im offenen Materialkreislauf eingesetzt, da kein Regenerationsverfahren bekannt ist, das eine ausreichende Regeneratqualität erzeugt. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Einsatz eines kombinierten Regenerationsverfahrens für anorganisch gebundene Kernsande untersucht, um die bislang notwendige Entsorgung auf Deponien oder die alternative Weiterverwendung in Zementwerken zu umgehen. Ziel des Projektes war eine qualitative und wirtschaftliche Bewertung des Pilotverfahrens für den Einsatz in der Kleinserienfertigung eines mittelständischen Unternehmens.

Das für die Untersuchung eingesetzte und modular aufgebaute Pilotverfahren besteht aus einer mechanischen und einer thermischen Regeneration. Dabei wurden die Prozesse einzeln oder kombiniert in unterschiedlicher Reihenfolge chargenweise betrieben. Für die qualitative Bewertung des Kernfertigungs- und Gießprozesses wurde eine spezielle Versuchsgeometrie entworfen und umgesetzt. Um den Erfolg der einzelnen Regenerationsversuche bewerten zu können, wurde ein neues chemisches Prüfverfahren entwickelt. Ziel war die Bestimmung der Binderreste des Wasserglases im regenerierten Formgrundstoff, die bei der Wiederverwendung in Lösung gehen und die ursprünglichen Eigenschaften des Bindersystems negativ beeinflussen. Bei der Auswertung der chemischen und fertigungstechnischen Prüfungen hat sich die mechanisch-thermische Regeneration mit einer Neusandzugabe zwischen den beiden Prozessschritten durch besonders gute Verarbeitungseigenschaften ausgezeichnet. Dieses Verfahren eignet sich nach den Versuchsergebnissen für einen Einsatz in der Serienfertigung.

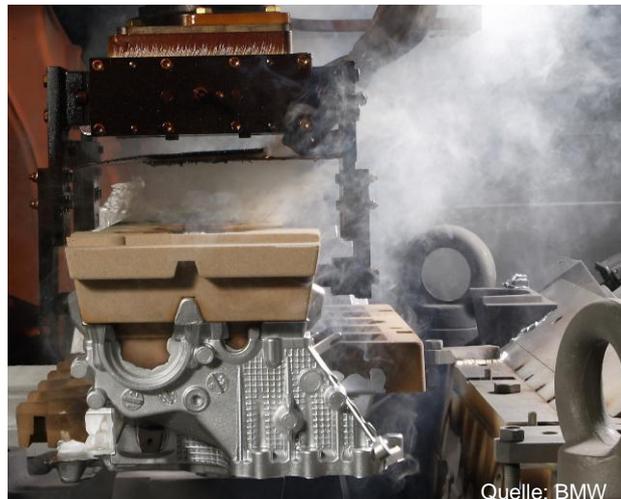
Die neue chemische Prüfung des löslichen Restbinderanteils im Formstoff konnte erfolgreich eingeführt werden. In weiteren Fertigungsversuchen muss die Gültigkeit der sehr eng gesetzten und auf Neusand basierenden Grenzwerte weiter verifiziert und unter Umständen angepasst werden. Weiterhin wurde deutlich, dass eine Prüfung zusätzlicher fertigungstechnischer Kenngrößen, wie z.B. der Gasdurchlässigkeit, zu empfehlen ist.

Für die wirtschaftliche Betrachtung wurde das ausgewählte mechanisch-thermische Regenerationsverfahren in mehreren Varianten detailliert ausgeplant und die Investitions- und Betriebskosten ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass für den wirtschaftlichen Erfolg ein kontinuierlicher, vollautomatisierter Betrieb mit einem geringen Personal- und Logistikaufwand entscheidend ist. Diese Betriebsart ist in mittelständischen Unternehmen nicht gegeben, wodurch mit den bestehenden Randbedingungen ein wirtschaftlicher Betrieb dieser anorganischen Regeneration nicht möglich ist. Dahingegen kann das Verfahren in großen Unternehmen mit einem jährlichen Sandbedarf von 7-50 Tsd. Tonnen wirtschaftlich eingesetzt werden. Die BMW Group wird das erarbeitete Regenerationsverfahren in den Serienbetrieb integrieren.

Das Projekt wurde unter dem Az. 26819-21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Projektbeteiligte Unternehmen: Becker GmbH CAD-CAM-CAST; TU München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen; BMW Group, Leichtmetallgießerei; ASK Chemicals GmbH; R. Scheuchl GmbH.

## 5 Einleitung

Seit dem Bestehen der Gießereiindustrie stellt das Auftreten von Emissionen während der Produktion für den Mitarbeiter und die Umwelt eine große Herausforderung dar. Im Rahmen der gesellschaftlichen Entwicklung der letzten Jahrzehnte rücken ökonomische aber vor allem auch ökologische und gesundheitsgefährdende Themen mehr in den Vordergrund. Die Emissionen in Gießereien entstehen überwiegend durch das Verbrennen der Binderkomponenten in den Sandformen oder -kernen beim Gießprozess. Derzeit werden in der Gießereiindustrie unterschiedliche Systeme zur Verfestigung der Sandformen und -kerne angewendet, die in der Regel aus organischen Binderkomponenten bestehen [Spu81] [TP03]. Die erstellten Formen werden im Gießprozess hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Bei Temperaturen von 700 °C (Aluminiumguss) bis weit über 1000 °C (Stahl-, Eisenguss) zersetzen sich die organischen Bestandteile und es entstehen umweltgefährdende und gesundheitsschädliche Verbrennungsgase, wie in Abbildung 5-1 dargestellt.



**Abbildung 5-1: Verbrennungsgase und Kondensatbildung beim Gießprozess mit organisch gebundenen Sandkernen**

Im Idealfall werden diese Gase abgesaugt und anschließend einer aufwendigen Abgasreinigung zugeführt. Dennoch beeinflusst dieser Vorgang die Arbeitsbedingungen negativ. Darüber hinaus kondensieren die Abgase als Verbrennungsprodukte (Kondensate) an den Gießwerkzeugen, wodurch die Qualität der Gussteile beeinträchtigt wird und zusätzliche Reinigungszyklen notwendig sind.

Zur Reduzierung der Emissionen können sowohl primäre als auch sekundäre Maßnahmen eingesetzt werden. Sekundäre Maßnahmen optimieren den Gießprozess und dabei vor allem die Ableitung der Abluft und die Nachbehandlung der enthaltenen Verbrennungsprodukte. Nach dem jetzigen Stand der Technik sind hierbei nur noch geringfügige Verbesserungen möglich. Ein weitaus größeres Potential besteht in den primären Maßnahmen, d.h. in der Optimierung der verwendeten Bindersysteme, um Emissionen grundsätzlich zu vermeiden. Hierfür bietet sich als eine Möglichkeit der Einsatz anorganischer Bindersysteme (modifizierte Wassergläser) an, da bei den oben genannten

Temperaturen keine Verbrennungsprodukte entstehen. Die Belastung der Umwelt und der Mitarbeiter können auf ein Minimum verringert werden. Weiterhin reduziert sich der Einsatz von Absaugungsanlagen und Abluftreinigungssysteme erheblich [Eßb10] [Koo07] [Pol06] [PTK06].

Die anorganische Kernfertigung ist bereits seit den 1950er Jahren bekannt [Spu81]. Die eingesetzten Systeme waren bereits damals den organischen Bindersystemen aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten überlegen. Technologische Nachteile, wie beispielsweise eine schlechte Entkernbarkeit, eine geringe Lagerfähigkeit und das Fehlen einer industriell einsetzbaren Regeneration für die anfallenden Altsande führten zu einem abnehmenden Marktanteil.

Mit der Einführung eines weiterentwickelten, emissionsarmen Bindersystems auf Silikatbasis (Wasserglas) durch den Projektpartner ASK Chemicals GmbH in Hilden wurden die angesprochenen technologischen Nachteile behoben [Mül08]. Mittels mehrerer Modifikationen des Bindersystems konnten die thermische Stabilität, die Maßhaltigkeit, die Lagerfähigkeit der Sandkerne und die Entkernbarkeit der Gussteile auf einen industriell einsetzbaren Stand gebracht werden. Die Kosten für organische und anorganische Bindersysteme unterscheiden sich dabei nicht. Der Einsatz des neuen Bindersystems bewirkt eine deutliche Verminderung der Belastung von Mitarbeitern, von Anwohnern und der Umwelt und steigert die Werkzeugverfügbarkeit. Beim Gießen können die Emissionen im Vergleich zu organischen Bindersystemen um 98 % reduziert werden [WWW08].

Derzeit werden die modernen anorganischen Bindersysteme, die überwiegend auf einer thermischen Aushärtung beruhen, nur vereinzelt eingesetzt. Die notwendigen technologischen Umstellungen in den Prozessschritten Kernfertigung, Gießen und Entkernen und das Fehlen eines effektiven Regenerationsverfahrens für anorganisch gebundene Altsande im Bereich des Leichtmetallgusses erschweren eine Einführung dieser Systeme. Bisherige Untersuchungen zeigen erste positive Ansätze für den Einsatz von Regenerationsanlagen für anorganische Altsande. Dabei beschränken sich die vorliegenden Erkenntnisse meist auf traditionelle CO<sub>2</sub>- bzw. Ester-Wasserglassysteme [DD07] [EC05] [PT04]. Ein geschlossener Materialkreislauf ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht (Schonung von Ressourcen, Einsatz teurer Spezialsande, etc.) eine Grundvoraussetzung für einen breiten Einsatz der umweltfreundlichen, anorganischen Bindersysteme. Derzeit kann der Altsand nur auf Deponien entsorgt oder eingeschränkt Zementwerken zur Weiterverwendung zugeführt werden.

Die BECKER GmbH CAD-CAM-CAST fertigt Prototypen- und Kleinserienbauteile. Das Produktspektrum reicht von einfachen Anbauteilen bis hin zu komplexen Powertrain-Gussteilen. Einen erheblichen Anteil bilden dabei die Gussteile von Rennmotoren. Auch in Deutschland steht die Automobilindustrie als wichtigster Kunde im Fokus der Geschäftsaktivitäten. Voraussetzung für den Einstieg in die Kleinserienfertigung im Hause BECKER war der Einsatz anorganischer Bindersysteme, um die Belastungen für die Mitarbeiter und die Investitionen für Absaugungsanlagen und Abluftreinigungssysteme beim Aufbau der neuen Fertigungsanlagen gering zu halten. Mit einer steigenden Anzahl an

Gussteilen pro Jahr steht die Frage nach einer Regeneration anorganisch gebundener Altsande immer mehr im Vordergrund.

Die BMW Leichtmetallgießerei in Landshut setzt bereits erfolgreich anorganische Bindersysteme in der Großserienfertigung von Sandkernen ein. Die Gießerei unterstützt das Projekt, um Erfahrungen im Bereich der anorganischen Kernfertigung auszutauschen und die Entwicklung einer serienfähigen Regeneration für anorganische Altsande aus Sicht einer Großserienfertigung zu begleiten.

Das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt soll einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, den derzeit offenen anorganischen Sandkreislauf für Leichtmetallgießereien über den Einsatz eines geeigneten Regenerationsverfahrens zu schließen. Wichtigste Gesichtspunkte sind dabei eine konstante Qualität des Formsandes sowie die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Untersucht werden die Auswirkungen des Einsatzes anorganischer Regeneratsande auf die Gussteilqualität und den Herstellungsprozess der Sandformen im Kernpaketverfahren (verlorene Form mit hohem Sandanteil), um abschließend den Regenerationsprozess zu optimieren und in den Serienprozess zu integrieren. Dafür werden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München unterschiedliche Regenerate in den bestehenden Fertigungsprozess der BECKER GmbH eingesetzt. Weiterhin soll die Regeneration anorganisch gebundener Altsande wirtschaftlich betrachtet und ein Einsatz in KMUs geprüft werden.

Damit könnte erstmalig ein geschlossener Materialkreislauf unter Verwendung eines umweltfreundlichen, anorganischen Bindersystems in der Fertigung einer Gießerei aufgebaut werden. Die Einführung eines Regenerationsverfahrens ist der letzte Schritt in der Prozesskette und stellt eine Grundvoraussetzung für den breiten Einsatz dieser Bindersysteme in der Gießereiindustrie dar. Aus der Zielstellung ergeben sich mehrere Aufgabenschwerpunkte die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

## 6 Angaben zum Projekt

### 6.1 Lösungskonzept

Die Entwicklung eines Regenerationsverfahrens für den Einsatz in der Serienproduktion erfolgt in einzelnen Schritten, die zu Arbeitspaketen zusammengefasst sind. Schwerpunkte bilden dabei die technologische Entwicklung des Prozesses und eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Verfahrens für einen Einsatz in der Kleinserienfertigung.

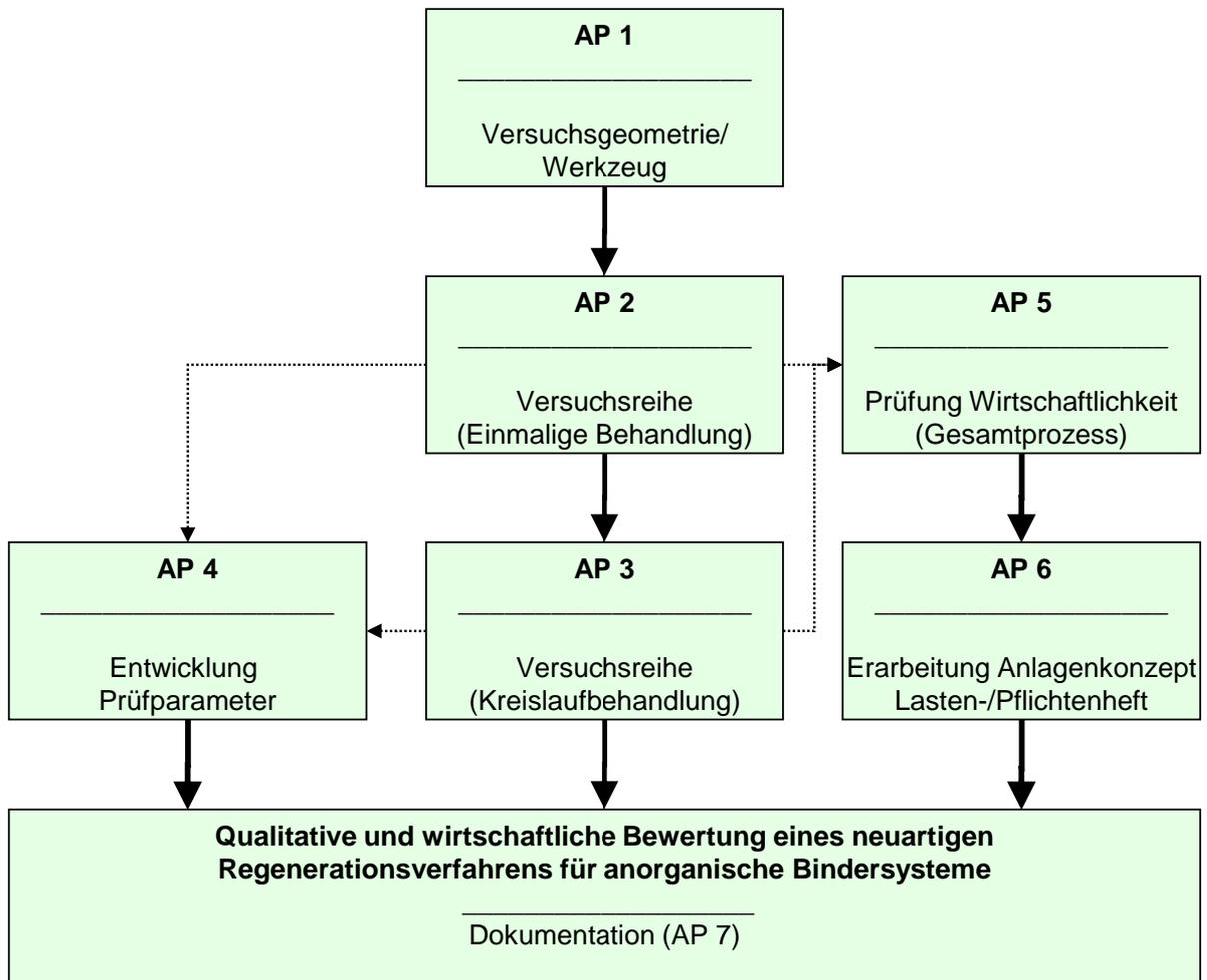
Im Rahmen der Vorarbeiten wurde auf der Grundlage unterschiedlicher Versuchsreihen ein Pilotverfahren zur mechanisch-thermischen bzw. thermisch-mechanischen Regeneration entwickelt und in einer Versuchsanlage umgesetzt. Der Betrieb erfolgt chargenweise, wodurch produktionsnahe Sandmengen mit einer entsprechenden Anzahl an Durchläufen verarbeitet werden können. Damit ist neben der gezielten Variation einzelner Versuchsparameter auch eine Untersuchung des Kreislaufverhaltens möglich. Folgende Gesichtspunkte werden untersucht und sind durch die Arbeitspakete abgedeckt:

- Fähigkeit des Verfahrens für einen Serieneinsatz
- Optimale Reihenfolge und Parameter der Einzelprozesse
- Verhalten des Regeneratsandes im Kreislaufbetrieb
- Einfluss des Regeneratsandes auf die Qualität der Serienfertigung (Kerne, Gussteile)
- Qualitätskontrolle für den Regeneratsand im Serienbetrieb (Prüfgrößen, Grenzwerte)
- Notwendigkeit zusätzlicher Prozessschritte

Diese Fragestellungen bilden die Grundlage für die Vorgehensweise und die Inhalte der einzelnen Arbeitspakete. Parallel zum Regenerationsverfahren werden neue Prüfgrößen und Grenzwerte erarbeitet, die für eine Kontrolle der Sandqualität eingesetzt werden können. Bisherige Verfahren waren entweder sehr aufwändig oder ließen keine sichere Bewertung der Regeneratqualität zu.

## 6.2 Darstellung der Projektdurchführung

Im Folgenden wird die Projektdurchführung anhand einzelner Arbeitspakete näher beschrieben (siehe Abbildung 6-1).



**Abbildung 6-1: Projektstruktur und Vorgehensweise**

Für eine gezielte Untersuchung der Regenerate in der Serienfertigung der BECKER GmbH war der Einsatz einer Versuchsgeometrie notwendig. Dafür wurde in Arbeitspaket AP1 ein beheiztes Versuchswerkzeuges aufgebaut, das in der Kernfertigung zur Herstellung einer Gießform eingesetzt wurde.

Das Versuchswerkzeug wurde so ausgelegt, dass pro Kernschießprozess eine vollständige Gießform und zusätzlich drei Prüfkörper angefertigt (geschossen) werden konnten. Die Sandform besteht aus einem Oberteil, einem Unterteil und den innen liegenden Kern. Die Formteile wurden den in Arbeitspaket AP2 genannten Prüfungen unterzogen. Mit Hilfe der Prüfkörper wurden die Bruchfestigkeit, die Gasdurchlässigkeit und die Heißdeformation geprüft. Für den Abguss erfolgte ein Zusammenbau der Einzelteile. Nach dem Gießen wurde die Sandform zerstört, der Sand zur erneuten Regeneration eingesammelt und das Gussteil für die Prüfungen bereitgestellt (siehe AP 2). Mit Hilfe dieser Geometrie konnten die im Folgenden aufgeführten Parameter der Einzelprozesse untersucht werden.

Die Qualität des Kernfertigungsprozesses wird maßgeblich durch die Eigenschaften des eingesetzten Sandes (Neusand bzw. Regenerat) bestimmt. Die Sandqualität wurde im Sand- und Chemielabor vor dem Einsatz in der Kernmacherei geprüft. Entscheidend für eine endgültige Bewertung des Sandes waren die Eigenschaften im Kernfertigungsprozess. Mit Hilfe des Versuchswerkzeuges konnten folgende Prüfgrößen zur Bewertung ermittelt werden:

- Verdichtung des gebundenen Sandes in der Kavität (Kerngewicht, Porosität)
- Biegefestigkeit
- Gasdurchlässigkeit
- Thermische Stabilität

Einen direkten Einfluss auf die Gussteilqualität (Maßhaltigkeit, Entkernbarkeit) hat die verwendete Gießform. In Abhängigkeit des Gießverfahrens besteht diese aus Metall, Sand oder einer Kombination aus beidem. Innen liegende Konturen werden in der Regel mit Sandkernen abgebildet. Aus diesem Grund ist die Qualität der Formteile/Kerne aus Sand (Regenerat) auch für den Gießprozess entscheidend. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Versuchsgeometrie derart ausgelegt, dass gezielt Fehler (Lunker, Poren) im Gussteil auftreten, deren Veränderung beim Einsatz unterschiedlicher Regenerate dokumentiert und dadurch der Einfluss des Regenerats auf den Gieß- und Erstarrungsprozess bewertet werden konnten. Zu den wichtigsten Prüfgrößen zählten hier:

- Beschaffenheit der auftretenden Gussfehler (Größe, Lage, Art, etc.)
- Restsand (Entkernbarkeit)
- Maßhaltigkeit des Gussteils

Die Entwicklung der Versuchsgeometrie erfolgte durch alle Projektpartner. Durch diese Vorgehensweise wurde sichergestellt, dass die Geometrie die geforderten Prüfungen ermöglicht und die Erfahrungen und Kenntnisse aller Projektbeteiligten umgesetzt werden.

In Arbeitspaket AP2 wurden die möglichen Prozessabfolgen (Einzelprozesse, Kombinationen) und Prozessparameter der Regeneration als vorbereitender Schritt zur endgültigen Definition des gesamten Regenerationsverfahrens weiter eingegrenzt.

In Laborversuchen wurden dazu anorganische Altsande mit unterschiedlichen Temperaturen und Zeiten im Laborofen behandelt und die Qualität bewertet. Dieser Ablauf stellt eine rein thermische Regeneration dar. Weiterhin wurde der Ablauf mit mechanisch vorbehandeltem Material wiederholt, um eine mechanisch-thermische Behandlung abzubilden.

Eine rein mechanische Behandlung konnte bereits in Voruntersuchung aufgrund einer schlechten Formstoffqualität ausgeschlossen werden. Die Umsetzung einer thermisch-mechanischen Behandlung als letzte Kombinationsmöglichkeit ist im Labormaßstab nicht möglich gewesen, da die mechanische Behandlung für kleine Sandmengen nicht abgebildet werden kann. Die Versuchspläne der einzelnen Versuche sind in der Ergebnisdarstellung aufgeführt.

Entsprechend der Versuchsergebnisse wurde eine Auswahl an mechanisch-thermischen Regenerationsparametern im Produktionsmaßstab umgesetzt, um die einmal behandelten Regenerate im Kernfertigungs- und Gießprozess zu bewerten. Die Regeneratsande wurden im Chemielabor geprüft und zur Fertigung der Versuchsgeometrie eingesetzt. Dabei erfolgte auch eine Bewertung der Formstoffeigenschaften über die im Werkzeug integrierten Prüfkörper (Gasdurchlässigkeit, Biegefestigkeit und Heißdeformation). Weiterhin wurden die Gussteile auf ihre Maßhaltigkeit geprüft.

Zur abschließenden Definition des Regenerationsverfahrens folgten Umlaufversuche mit einem geschlossenen Materialkreislauf und eine Prüfung der Qualität in der Serienfertigung in Arbeitspaket AP3. Basis für die Auswahl waren die Ergebnisse aus AP2. Es wurden eine mechanisch-thermische und eine thermisch-mechanische Behandlungsreihenfolge abgebildet. Die Parameter der Versuche sind in der Ergebnisdokumentation enthalten. Die Regeneratsande wurden in Labor und in der Fertigung analog AP2 eingesetzt und geprüft.

Schwerpunkt von Arbeitspaket AP4 war die Definition relevanter Prüfparameter mit Grenzwerten für eine fertigungsorientierte Bewertung der Formstoffqualität. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Prüfverfahren organischer Systeme keine ausreichende Charakterisierung der anorganischen Regeneratsande ermöglichen. Es wurde nach einer Lösung gesucht, mit der die im Regeneratsand vorhandenen anorganischen Restbinderanteile ausreichend charakterisiert werden können, um genaue Aussagen über die fertigungstechnischen Eigenschaften zu ermöglichen. Diese Eigenschaften beschreiben das Verhalten der gemischten Formstoffe in der Kernfertigung und sind für eine fehlerfreie Produktion entscheidend. Weiterhin wurde die Möglichkeit geprüft, eine Online-Messgröße zur Ermittlung der vorhandenen Regeneratqualität im laufenden Serienbetrieb zu definieren und einzusetzen. Die Prüfdauer der anorganischen Systeme liegt derzeit bei mind. 3 Stunden.

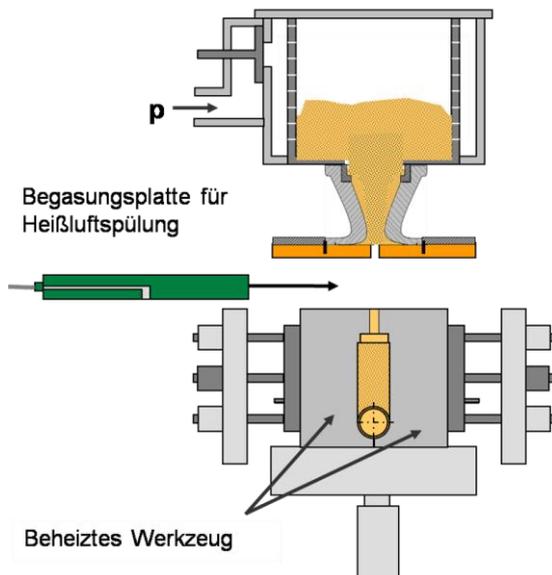
In Anlehnung an die Ergebnisse erfolgte in Arbeitspaket AP5 und AP6 die abschließende Definition der Anlagentechnik für die Regeneration anorganischer Altsande im Serienbetrieb (aufbauend auf AP2, AP3). Entgegen der ursprünglichen Planung wurden die Kennzahlen für die wirtschaftliche Betrachtung nicht aus dem Versuchsbetrieb ermittelt, sondern nach Rücksprache mit einem Anlagenhersteller auf Basis der Anlagentechnik berechnet. Aus diesem Grund wurden die Inhalte der Arbeitspakete AP5 und AP6 zusammengelegt.

Aus der Anlagentechnik erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Anlagenhersteller die Ableitung eines Konzepts, das als Grundlage für eine wirtschaftliche Betrachtung herangezogen wurde. Hierbei wurde die gesamte Prozesskette betrachtet. Mit Hilfe der Betriebs- und Investitionskosten konnte abschließend die Umsetzbarkeit des Regenerationsverfahrens in den Serienprozess kleiner und mittelständischer Unternehmen bewertet werden.

## 7 Versuchsaufbau und Prüfmethode

### 7.1 Kernfertigung mit anorganischen Bindersystemen

Das Verfahren zur anorganischen Sandkernfertigung ist aus Sicht der Verfahrenstechnik an die Kernfertigung mit organischen Bindersystemen, wie z.B. dem Warm-Box-Verfahren, angelehnt. Der Formstoff, also die Mischung aus Formgrundstoff und Bindersystem, wird in den Schießkopf gefüllt (siehe Abbildung 7-1).

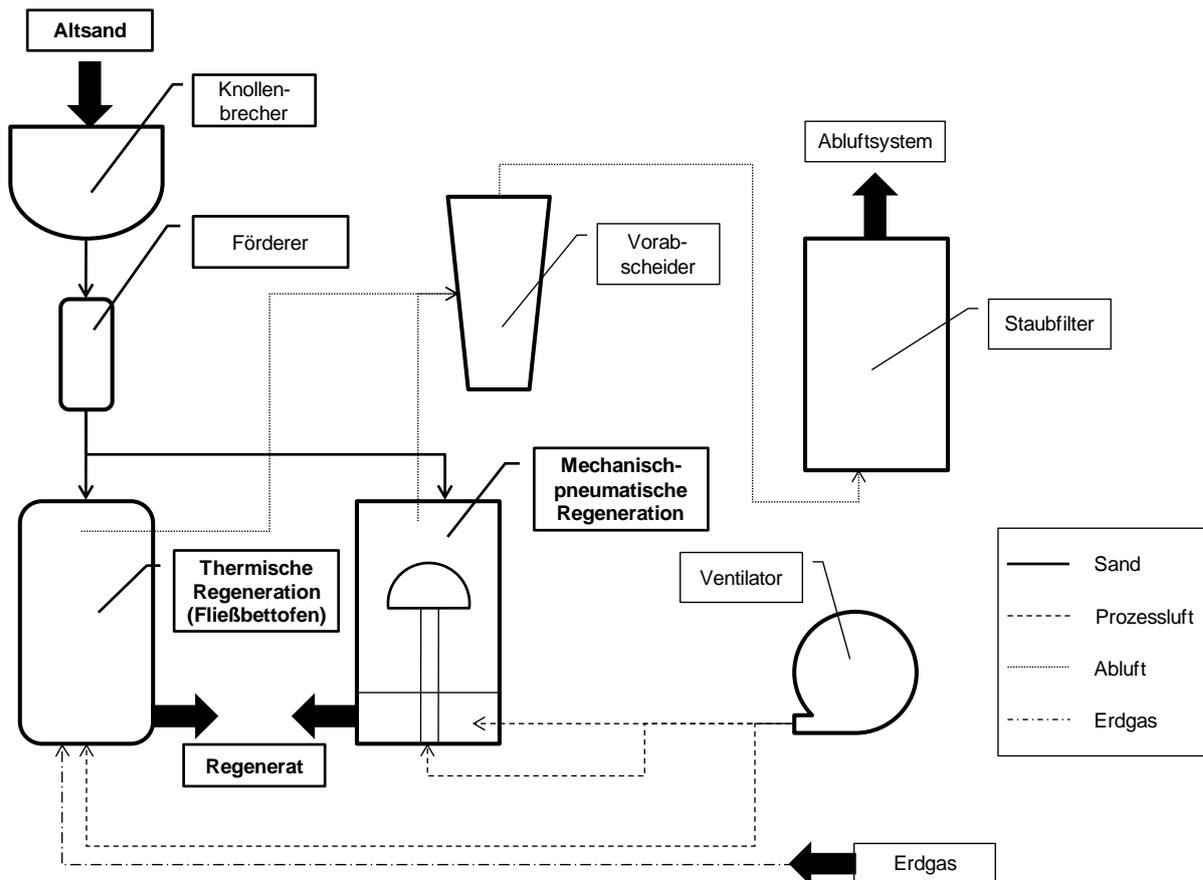


**Abbildung 7-1: Prinzip der anorganischen Sandkernfertigung mit Warm-Box-Aushärtung**

Zu Beginn des Prozesses liegt das Werkzeug an der oben liegenden Schießkopfplatte an. Über eine schlagartige Expansion der Luft vom Druckluftbehälter in den Schießkopf wird der Formstoff in das beheizte Werkzeug (Kernkasten) geschossen. Die Sandpartikel lagern sich im Kernkasten ab, wohingegen die Luft durch eingearbeitete Schlitzdüsen entweichen kann. Ist dieser Füllvorgang abgeschlossen, läuft die Aushärtung des Formstoffs über den Temperatureintrag des Werkzeuges. Das Werkzeug wird abgesenkt, damit die Begasungsplatte einfahren kann. Zur Beschleunigung der Bindereaktion wird der Kernkasten zusätzlich mit heißer Luft gespült. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, wird der Kernkasten geöffnet und der noch heiße Sandkern kann entnommen werden. Die Werkzeugtemperatur liegt je nach Kerngeometrie bei 130-150°. Für die Versuche wurde das Bindersystem Inotec der ASK Chemicals GmbH und als Formgrundstoff Quarzsand H32 eingesetzt.

### 7.2 Versuchsanlage zur Regeneration anorganischer Kernsande

Für die Regeneration der anorganischen Altsande wurde im Rahmen der Vorarbeiten ein Pilotverfahren entwickelt und in einer Versuchsanlage abgebildet. Diese Versuchsanlage ist modular aufgebaut und besteht aus den in Abbildung 7-2 schematisch dargestellten Komponenten.



**Abbildung 7-2: Schematische Darstellung der Versuchsanlage zur mechanischen bzw. thermischen Regeneration anorganischer Altsande**

Über einen Knollenbrecher wird der anorganische Altsand kornvereinzelnd und mit Hilfe eines pneumatischen Förderers entweder dem mechanischen oder thermischen Regenerationsmodul zugeführt. Durch diesen flexiblen Aufbau können sowohl eine thermische, eine mechanische, als auch eine thermisch-mechanische bzw. mechanisch-thermische Regeneration durchgeführt werden.

Die thermische Regeneration besteht aus einem Fließbettöfen, in dem der Sand durch ein brennendes Gas-Luftgemisch fluidisiert wird. Die mechanische Regeneration ist als pneumatisches System aufgebaut, in dem das Sand-Luftgemisch über einen Luftstrom in eine halbkugelförmige Behandlungsglocke gefördert wird. Dort findet die Reinigung der Kornoberfläche über eine Korn-an-Korn-Reibung statt.

### 7.3 Prüfmethoden und Parameter

Zur Beurteilung der Regeneratqualität wurden mehrere Prüfverfahren eingesetzt, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen. Zum einen wurden die Eigenschaften des kornvereinzelten Formgrundstoffs (Regenerat) ermittelt. Zum anderen erfolgten Prüfungen am Formstoff mit Hilfe von Prüfkörpern (siehe Tabelle 7-1).

Formgrundstoff (Regenerat)	Prüfkörper (geschossene Kerne)
Anorganischer Restbinderanteil	Biegefestigkeit
Korngrößenverteilung	Hot Distortion
	Gasdurchlässigkeit
	Kerngewicht

Tabelle 7-1: Übersicht der Prüfmethode und -parameter

### A) Anorganischer Restbinderanteil

Bei organischen Formgrundstoffen erfolgt eine einfache Bestimmung des Restbinderanteils über den Glühverlust, der die organischen Reste im Sand beschreibt. Bei anorganischen Formgrundstoffen ist derzeit zur Bestimmung der Restalkalität möglich. In Abbildung 7-3 ist das Schema dargestellt. Die Einheit der Restalkalität ist „Milligramm Schwefelsäure pro 100g Probe“ und lässt einen Rückschluss auf alle anorganischen Restsubstanzen im Regenerat zu.

Die Bestimmung der Messgröße erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt wird die Probe vorbereitet. Hierfür werden 50g des Formgrundstoffes in eine 250ml fassende Glasflasche mit Deckel abgefüllt. Anschließend wird die Probe mit 50ml destilliertem Wasser ( $H_2O$ ) und 50ml Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) der Konzentration 0,05 mol/l versetzt. Die Suspension wird drei Stunden gerüttelt, um eine gute Durchmischung der Flüssigkeit mit dem Sand zu erreichen und den Binder vom Korn vollständig abzulösen. Nach Ablauf der vorgegebenen Zeit wird der Inhalt filtriert und 50ml des Eluats mit Natronlauge der Konzentration 0,1 mol/l bis zu pH-Wert 7 titriert. Die Titration erfolgt in einem automatischen Titrationsgerät, welches vor der Analyse mithilfe zweier Pufferlösungen (pH-Wert 4 und 7) kalibriert wird. Parallel dazu werden noch Proben zur Bestimmung eines Blindwertes angesetzt. Diese werden genau wie oben beschrieben behandelt, allerdings entfällt hier die Zugabe des Formgrundstoffes.

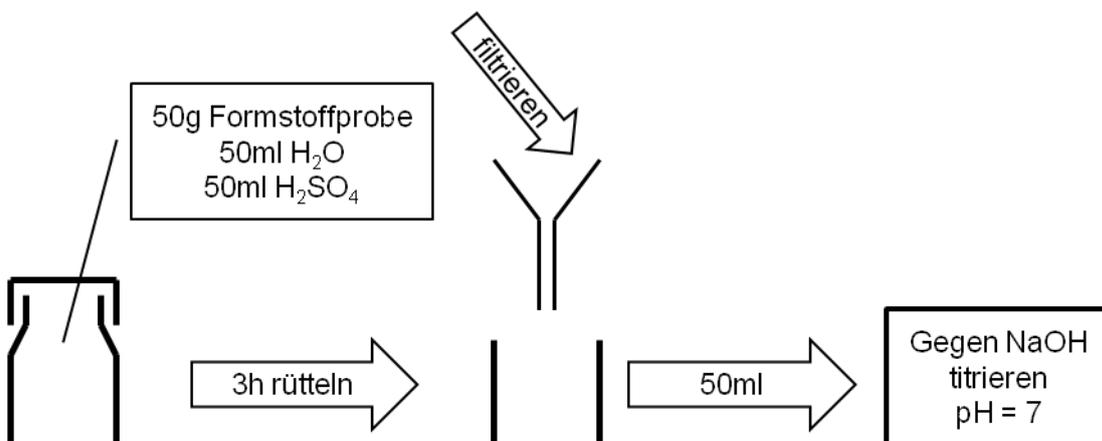


Abbildung 7-3: Schema zur Bestimmung der Restalkalität

Der Wert der Restalkalität der Probe wird schließlich nach folgender Formel aus dem Verbrauch an Natronlauge sowie dem Blindwert bestimmt:

$$RA = \frac{(25\text{-Verbrauch NaOH [ml]})*19,6*100}{2*Einwaage [g]} - ((25\text{-Blindwert [ml]})*19,6)$$

**(Formel 7-1)**

Die Prüfung des Restbinderanteils erweist sich als sehr aufwendig und hat den Nachteil, dass das Prüfergebnis keine Unterscheidung von aktiven und inaktiven Restbinderanteilen zulässt. Aus diesem Grund wird in Arbeitspaket AP4 eine neue Prüfmethode entwickelt, die eine Ermittlung des aktiven Restbinderanteils ermöglichen soll.

## B) Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung über eine Siebanalyse stellt die Grundlage der Bestimmung sämtlicher granulometrischen Größen dar. Dabei wird die Sandprobe von oben durch mehrere Sieben mit sinkender Maschenweite gesiebt (siehe Abbildung 7-4) und die Rückstände gewogen. So erhält man die Verteilung der verschiedenen Korngrößenstufen.



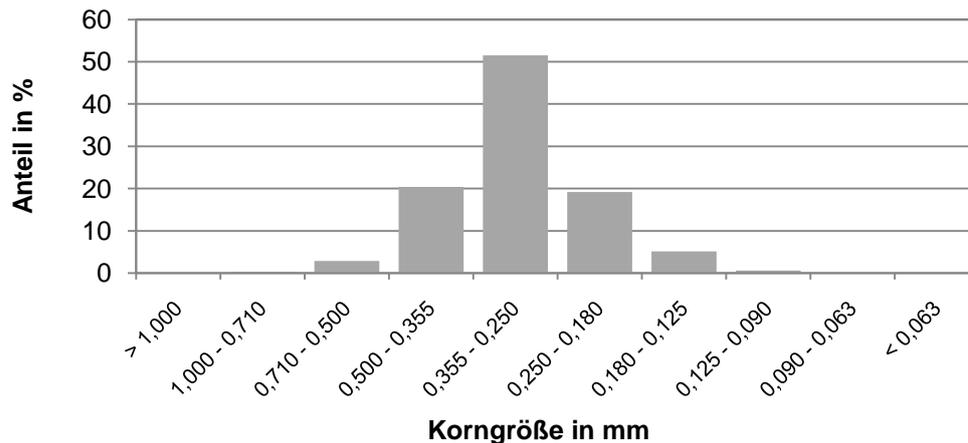
1,0 mm
0,71 mm
0,50 mm
0,355 mm
0,25 mm
0,18 mm
0,125 mm
0,09 mm
0,063 mm
< 0,063 mm

**Abbildung 7-4: Siebturm und Siebgrößen bei der Siebanalyse**

Die Ergebnisdarstellung der Korngrößenverteilung kann entweder als Histogramm (Abbildung 7-5) oder als Verteilungssummenkurve (Abbildung 7-6) erfolgen. Das Histogramm beschreibt den Anteil einer Kornfraktion bezogen auf die Gesamtmenge:

$$q = \frac{m_i}{m_{\text{ges}}}$$

**(Formel 7-2)**

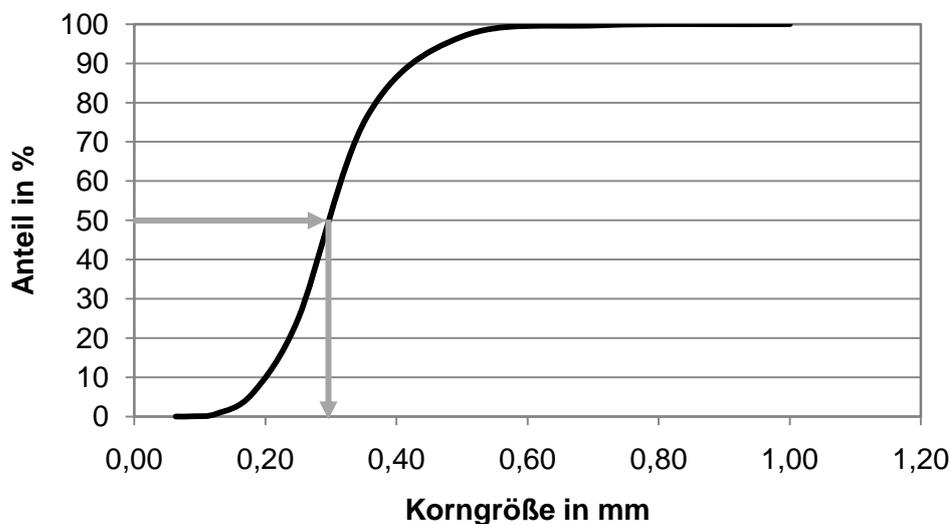


**Abbildung 7-5: Histogramm (Verteilungsdichtekurve) der Korngrößenverteilung**

In der Verteilungssummenkurve lässt sich die Körnung der Sandprobe darstellen. Sie wird dargestellt durch das Verhältnis der Summe der Körner, die kleiner als eine bestimmte Klasse sind, bezogen auf die Gesamtmenge:

$$Q_i = \frac{\sum_i m_{i-1}}{m_{\text{ges}}}$$

(Formel 7-3)



**Abbildung 7-6: Verteilungssummenkurve der Korngrößenverteilung**

Zusätzlich zur Gleichmäßigkeit lässt sich auch die mittlere Korngröße aus der Verteilungssummenkurve ablesen. Exemplarisch ist dies als graue Linie in Abbildung 7-6 aufgeführt. Maßgeblich ist hierbei der Anteil von 50%, der als mittlere Korngröße bezeichnet ist. Das bedeutet, dass 50% des Sandes einen kleineren und 50% einen größeren Korndurchmesser aufweisen. Neben der grafischen Bestimmung lässt sich die mittlere Korngröße auch rechnerisch bestimmen.

### C) Biegefestigkeit

Eine Kenngröße zur Beurteilung der technologischen Eigenschaften eines Sandkernes ist seine Biegefestigkeit. Zu deren Ermittlung wird der in Abbildung 8-1 dargestellte Biegeriegel in einem Dreipunktbiegeversuch geprüft.

Die zum Bruch des Prüfriegels nötige Kraft wird dabei aufgenommen und als Bruchspannung in  $\text{N/cm}^2$  angegeben. Die anorganischen Regenerate wurden dabei zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten geprüft. Sofort nach der Entnahme des Kernes aus dem Werkzeug sowie nach einer Lagerzeit von 30 und 60 Minuten. Die Sofortfestigkeit ist für eine automatisierte Fertigung wichtig, da ein Unterschreiten einer Mindestfestigkeit zu Kernbruch bei der Entnahme des Sandkerns aus dem Werkzeug führt. Dadurch ist zum einen keine fehlerfreie Fertigung möglich und zum anderen wird der automatisierte Ablauf einer Fertigungszelle, die den Kern beispielsweise mit einem Roboter entnimmt, gestört. Die Prüfung nach einer definierten Lagerzeit lassen Rückschlüsse auf die Nachhärtungseigenschaften des jeweiligen Sandes zu.

### D) Heißdeformation

Das verwendete Bindersystem Inotec bietet die Möglichkeit, durch den Einsatz von Promotoren die Heißfestigkeit des fertigen Kernes gezielt einzustellen. So sind zum Beispiel Wassermantelkerne, die vollständig von Schmelze umschlossen werden, thermostabiler ausgelegt als nur gering thermisch belastete Kerne, um die Maßhaltigkeit des Gussteils zu gewährleisten.

Die Möglichkeit die Eigenschaften der Heißdeformation einstellen zu können, muss bei einem Einsatz regenerierter Formgrundstoffe erhalten bleiben. Die Heißdeformation kann auf zwei Arten bestimmt werden. Zum einen lässt sich der in Abbildung 8-2 dargestellte Prüfkörper in das Kernpaket einlegen und abgießen. Über einen Schnitt am Gussteil kann der entstandene Hohlraum vermessen und die Deformation bestimmt werden. Zum anderen kann der Prüfkörper direkt in einem Heißdeformations-Prüfgerät vermessen werden (Abbildung 7-7). Dabei wird der Körper einseitig eingespannt und mittig durch eine Flamme erhitzt. Über eine Wegaufnahme wird das Durchbiegen am freien Ende ermittelt und als Weg-Zeit-Verlauf ausgegeben (Abbildung 7-8).

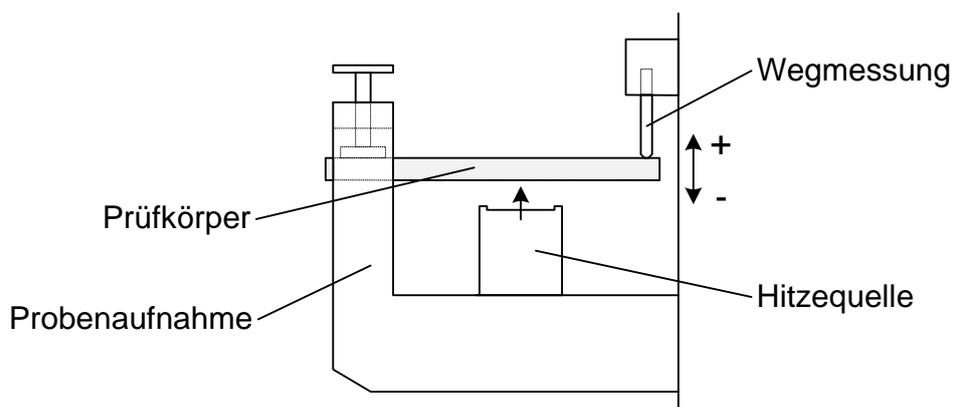
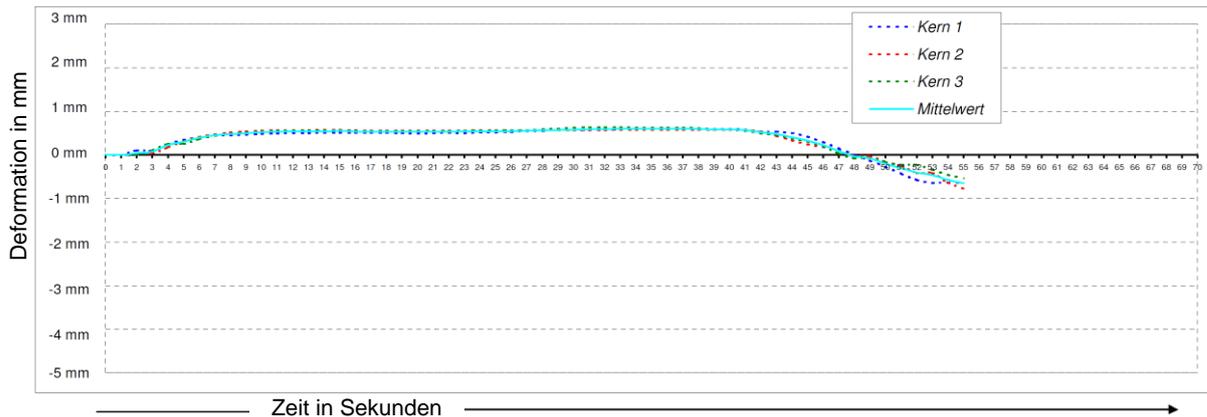


Abbildung 7-7: Schematischer Versuchsaufbau zur Prüfung der Heißdeformation [MS98]



**Abbildung 7-8: Beispielhafter Weg-Zeit-Verlauf der Heißdeformation  
(Quelle: ASK Chemicals GmbH)**

Für die Auswertung können aus dem Verlauf charakteristische Punkte verwendet werden. Die Länge der Kurve beschreibt die maximale Zeit der Heißdeformation bis zum Bruch des Prüfkörpers. Weiterhin sind die maximale Ausdehnung und das thermoplastische Verhalten erkennbar. Für die Bewertung der Regeneratqualität wurde die Zeit bis zum Nulldurchgang der Kurve ausgewertet und mit einer Referenzprobe aus Neusand verglichen.

### E) Gasdurchlässigkeit

Die Gasdurchlässigkeit wird gemäß VDG-Merkblatt P41 bestimmt. Hierfür wird der in Abbildung 8-1 dargestellte Probekörper an der Verbindung zum Formunterteil abgetrennt und in das Prüfgerät eingelegt. Die abgelesene Gasdurchlässigkeitszahl gibt an, welches Luftvolumen in  $\text{cm}^3$  durch einen Sandwürfel von 1 cm Kantenlänge in einer Minute und einem Überdruck von 1 cm Wassersäule hindurchgeht. Die Gasdurchlässigkeit wird dimensionslos angegeben. Die Messung erfolgt an mehreren Prüfkörpern derselben Sandsorte und wird als Mittelwert der Einzelwerte angegeben. Als Referenzwert wird eine identisch hergestellte Probe aus Neusand verwendet.

### F) Maßhaltigkeit der Gussteile

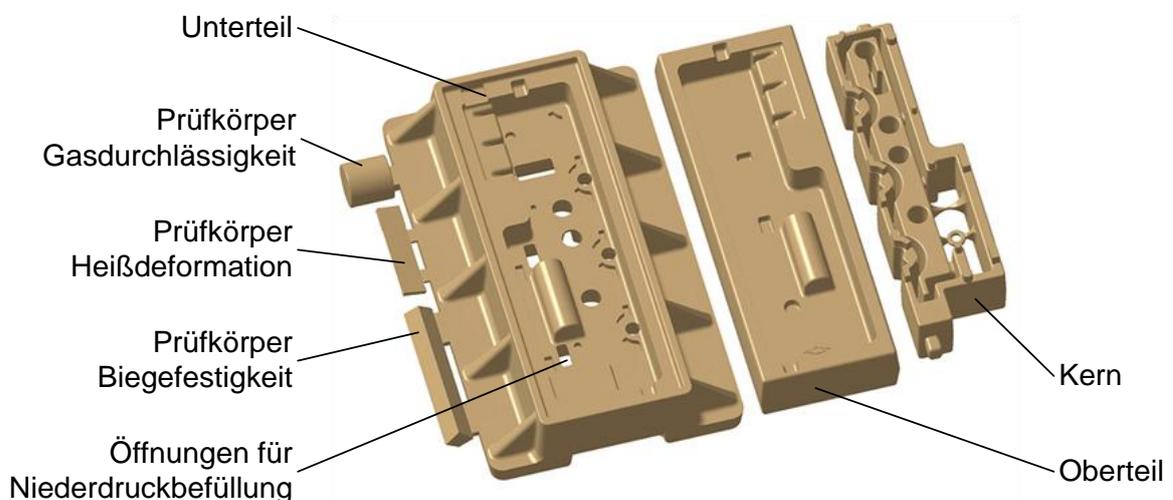
Ein wesentliches Kriterium bei einem Einsatz regenerierter Formgrundstoffe ist die Maßhaltigkeit der Gussteile. Um den Einfluss unterschiedlicher Regeneratsande zu untersuchen, werden die Gussteile, die mit Hilfe des Versuchswerkzeuges aus Arbeitspakt AP1 hergestellt werden, mittels Computertomographie und taktile Koordinatenmessung kontrolliert. Die Details zur Auswertung werden im Ergebnisteil erläutert.

## 8 Projektergebnisse

### 8.1 Versuchsgeometrie

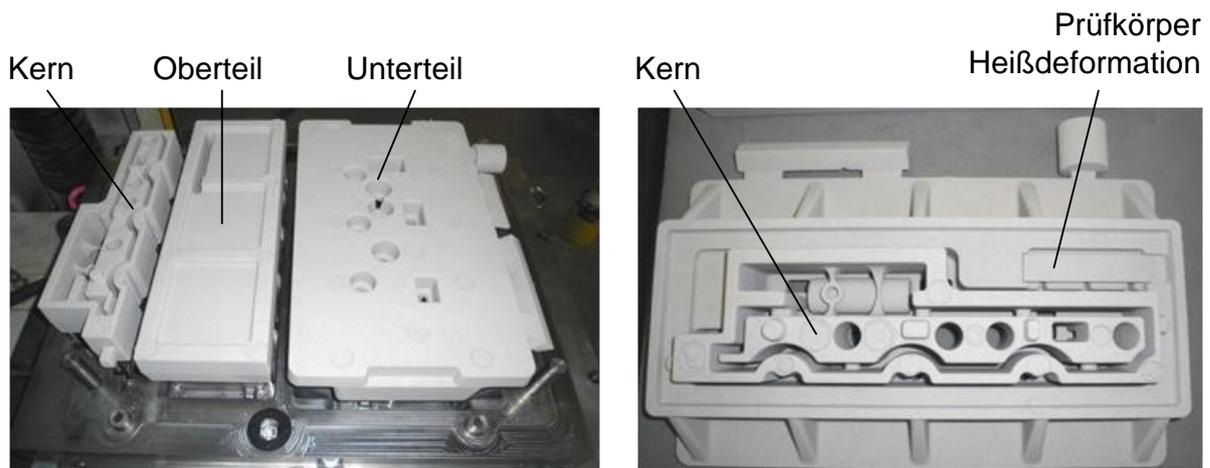
Der Einsatz von regenerierten Formgrundstoffen kann jeden einzelnen Prozessschritt der Gussteilfertigung beeinflussen. Um eine aussagekräftige Bewertung über die Qualität der regenerierten Formgrundstoffe zu erhalten, sollten neben der Prüfung des Formgrundstoffes auch der Kernfertigungs- und Gießprozess in der Untersuchung abgebildet werden. Dazu wurde die in Abbildung 8-1 dargestellte Versuchsgießform konstruiert, die folgende Randbedingungen erfüllen sollte:

- Herstellung einer vollständigen, gießfähigen Form bestehend aus Unterteil, Oberteil und Einlegekern in einem Fertigungsschritt (Kernschießvorgang)
- Abbildung typischer Geometriemuster (z. B. filigrane Übergänge) und extremer Geometrien (z.B. dünne Verbindungsstege)
- Integration von Prüfkörpern zur Ermittlung der fertigungstechnischen Kenngrößen Biegefestigkeit, Heißdeformation und Gasdurchlässigkeit
- Befüllung über das Niederdruckgießverfahren
- Provozierte Fehlstellen im Gussteil (Lunker)



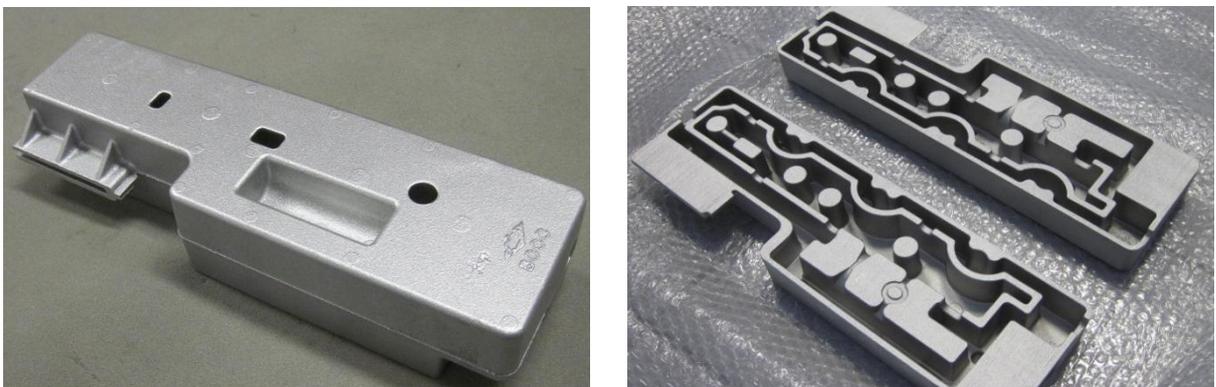
**Abbildung 8-1: Versuchsgießform mit Probekörpern**

Aus der Gießform wurde ein Kernschießwerkzeug abgeleitet, das für eine anorganische Kernfertigung eingesetzt werden kann. Dazu gehören beheizte Formteile aus Metall und eine Schießkopfplatte mit Einschusssdüsen, über die auch die heiße Spülluft eingebracht wird. Das Werkzeugunterteil mit den fertigen Teilen der Sandform sind in Abbildung 8-2 dargestellt.



**Abbildung 8-2:** Einzelteile der Gießform im Werkzeugunterteil (links); Zusammenbau von Unterteil und Kern ohne Oberteil (rechts)

Die drei Formteile sind im zusammengebauten Zustand eine vollständige Gießform. Zusätzlich kann, wie in der Abbildung dargestellt, der Prüfkörper für die Heißdeformation eingelegt werden. Die Form wird über das Niederdruckgießverfahren mit Aluminiumschmelze gefüllt. Nach dem Gießen und Entkernen kann das Gussteil für eine Auswertung der Maßhaltigkeit eingesetzt werden. Abbildung 8-3 zeigt das fertige Gussteil.



**Abbildung 8-3:** Gegossenes Versuchsteil

Anhand dieses Versuchsbauteiles kann der Einfluss der verwendeten regenerierten Formgrundstoffe auf folgende Größen ermittelt werden:

- Schießverhalten bei der Kernfertigung
- Besonderheiten beim Gießen
- Entkernen der Gussteile (Restsand)
- Maßhaltigkeit der Gussteile
- Prüfung der fertigungstechnischen Eigenschaften mittels Prüfkörper

## 8.2 Laborversuche - Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Auslegung des Regenerationsverfahrens ist die Menge und der Zustand des Restbinders auf dem Sandkorn. Im Gegensatz zu Gießereialtsanden, die mit organischen Bindersystemen verfestigt werden, muss die Thematik der Restbestandteile bei anorganisch gebundenen Altsanden eine besondere Beachtung finden. Der Grund liegt in der hohen Temperaturbeständigkeit anorganischer Binderkomponenten, die ein einfaches Verbrennen, wie bei organischen Regenerationsverfahren, ausschließt. Eine Erweiterung bisheriger Prüfmaßnahmen war erforderlich, um den Formgrundstoff aussagekräftig charakterisieren zu können. Wie in Abschnitt 7.3 beschrieben wird, kann durch die Prüfung der Restalkalität im Formgrundstoff nicht der Restbinderanteil bestimmt werden, der noch aktiv vorliegt und beim Wiedereinsatz des regenerierten Sandes erneut an der Bindungsreaktion teilnimmt.

Ansatzpunkt zur Weiterentwicklung der Prüfmethode war die Bestimmung des Silikatmoduls. Die Modulbestimmung ist ursprünglich eine Methode zur Rohstoffprüfung von Wassergläsern (Alkalisilikate). Dabei werden z.B. bei Natrium-Wassergläsern die prozentualen Anteile der beiden Hauptkomponenten Silizium und Natrium nasschemisch bestimmt. Der Silizium- und der Natriumgehalt werden formal als  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Na}_2\text{O}$  berechnet und über deren Quotient der Modul ( $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ ) des Glases angegeben. Dieser Modul beschreibt eine Vielzahl an Eigenschaften und stellt eine entscheidende Kenngröße des Flüssigbinders dar. Im Folgenden wurde diese Methode, die bislang bei der Warenprüfung eingesetzt wird, weiterentwickelt und zur Prüfung des regenerierten anorganischen Formgrundstoffs und auch zur Bewertung der eingesetzten Regenerationsverfahren herangezogen.

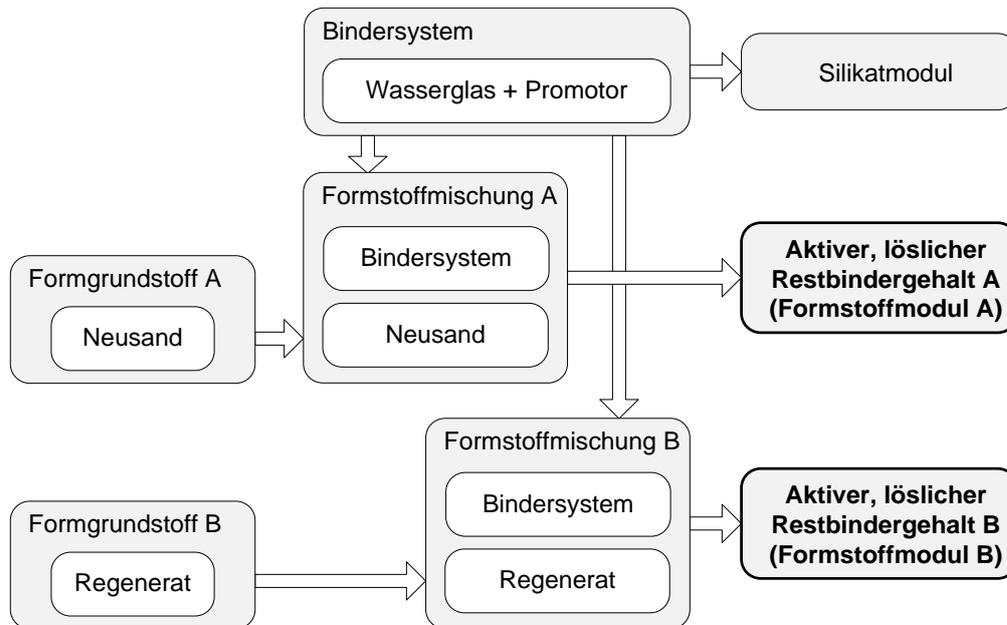
Während der Aushärtungsreaktion des Formstoffs verändert sich der Silikatmodul. Die gezielte Erhöhung des Moduls stellt eine der drei möglichen Aushärtungsreaktionen wasserglasgebundener Bindersysteme dar, die bereits nach der Mischung von Bindersystem und Formgrundstoff beginnt. Vereinfacht dargestellt, verfolgt die neue Prüfmethode das Ziel, den Unterschied in der Modulverschiebung von einem Formstoff mit Neusand und einem Formstoff mit Regeneratsand zu messen und über die Differenz eine Bewertung der Sandqualität abzuleiten. Entscheidend für die Auswertung sind neben dem Modul vor allem die Einzelwerte für  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Na}_2\text{O}$ .

In Voruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass Flüssigkeiten mit einem alkalischen pH-Wert besonders leicht vorhandene Rückstände des alkalischen Bindersystems vom Formgrundstoff (z.B. bei Regeneratsand) lösen können. Das verwendete Silikat (Wasserglas) weist vergleichbare Eigenschaften auf und löst beim Vermischen mit dem Formgrundstoff einen Teil der noch vorhandene Restbinderanteile ab. Die abgelösten Bestandteile greifen aktiv in die Bindungsreaktion ein und werden aus diesem Grund als aktiver Restbinderanteil bezeichnet. Die im Formgrundstoff verbleibenden Reste sind für die Reaktion unbedeutend und beschreiben den inaktiven, unlöslichen Anteil.

Dieser Lösungsvorgang kann zu einer zusätzlichen, ungewollten Verschiebung des Verhältnisses von  $\text{SiO}_2$  zu  $\text{Na}_2\text{O}$  und zu einer Erhöhung des absoluten Anteils führen. Dies löst wiederum eine Modifikation der Eigenschaften des Formstoffs aus, die sich aus

fertigungstechnischen Gründen nur in einem festzulegenden Grenzbereich bewegen darf, der in folgendem Abschnitt mit Hilfe einiger Laborversuche festgelegt wurde.

Abbildung 8-4 zeigt diesen Zusammenhang in einer Übersicht. Durch den Einsatz unterschiedlicher Formgrundstoffe, wie beispielsweise Formgrundstoff A und B, liegen als Prüfergebnis die aktiven Restbinderanteile A und B vor.



**Abbildung 8-4: Ausgangspunkt der Methodenentwicklung**

Der aktive Restbinderanteil beschreibt den vom Formgrundstoff abgelösten Anteil. Vergleichbar zum Silikatmodul wurde dieser durch zwei Hauptkomponenten definiert. Es wurde der gelöste Anteil an Silizium als  $\text{SiO}_2$ -Wert und der gelöste alkalische Anteil, im Folgenden als Alkalität bezeichnet, formal als  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent bestimmt. Die Alkalität gibt indirekt die Konzentration der  $\text{OH}^-$ -Ionen wieder. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Konzentration der  $\text{Na}^+$ - und  $\text{OH}^-$ -Ionen nicht korrelieren. Der Sand hält einen Teil der  $\text{OH}^-$ -Ionen zurück und gibt diese erst verzögert in die Lösung ab. Aus diesem Grund wurde das Element Natrium zur Bestimmung der Alkalität definiert. Aus diesen beiden Kenngrößen konnte ein Verhältnis dargestellt werden, woraus sich eine zusammenfassende Kenngröße ergab, die im Folgenden als Formstoffmodul (Formstoffmodul =  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ ) bezeichnet wird.

Im Gegensatz zur Prüfung der Restalkalität, bei der der gesamte alkalische Restbestandteil vom Formgrundstoff gelöst wird, resultierte aus dieser Bestimmung eine getrennte Betrachtung der aktiven, löslichen und der für die Bindereaktion unbedeutende inaktiven, unlöslichen Restbinderanteile. Weiterhin basiert diese Methode nicht auf einer Analyse des Formgrundstoffs (kornvereinzelter Sand), sondern auf einer Analyse des Formstoffs, also dem Gemisch aus Formgrundstoff und Bindersystem. Damit konnten die Eigenschaften des Formstoffs in der Produktion quantitativ bewertet werden.

## Verfahrensbeschreibung

Zur Bestimmung des Formstoffmoduls wird zunächst eine Formstoffmischung aus Regeneratsand und Flüssigbinder entsprechend der in der Fertigung eingesetzten Rezeptur hergestellt. Nach einer Topfzeit von 30 Minuten, die das Verbleiben der Formstoffmischung in der Kernschießmaschine simuliert, wird die Mischung mit Wasser eluiert und filtriert. Die Bestimmung der Anteile an Alkali und Silizium im Filtrat erfolgt mittels Titration. Im ersten Schritt wird die Lösung mit Salzsäure bis zum pH-Wert 7,0 titriert, der Verbrauch an HCl beschreibt den löslichen Alkalianteil und wird formal als Na<sub>2</sub>O-Gehalt angegeben.

Reaktionsgleichung:  $\text{NaOH} + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$

Im zweiten Schritt wird die gleiche Probe mit einem Überschuss an Kaliumfluorid und Salzsäure sowie dem Indikator Methylrot versetzt. Dabei reagiert das Silizium zu Hexafluorosilikaten unter Freisetzung von Hydroxidionen, die einen Teil der Salzsäure verbrauchen. Durch Rücktitration mit Natronlauge wird die Menge an nicht verbrauchter Salzsäure bestimmt. Das Ergebnis wird als Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) angegeben und beschreibt den löslichen Siliziumanteil.

Reaktionsgleichung:  $\text{SiO}_2 + 6 \text{KF} \rightarrow 6 \text{K}^+ + \text{SiF}_6^{2-} + 2 \text{OH}^-$

Aus den beiden Werten kann, wie oben beschrieben, der Formstoffmodul nach folgender Gleichung gebildet werden:

Berechnung:  $\text{Formstoffmodul} = (\text{SiO}_2 [\%] / 60,1) / (\text{Na}_2\text{O} [\%] / 61,9)$   
(Formel 8-1)

Da für dieses Prüfverfahren keine Erfahrungswerte vorliegen und die Regeneratsande eine mit Neusand vergleichbare Qualität besitzen sollten, wurden in einem ersten Schritt als Prozessgrenzen die Messwerte von Neusand mit einer Streuung der sechsfachen Standardabweichung (6σ) zur Bewertung eingesetzt. Als Ergebnis der Versuche sind die Grenzwerte in Tabelle 8-1 dargestellt. Der Grenzwert für den Formstoffmodul wurde auf Basis der Neusandmessungen in einem Bereich von 2,3 bis 2,4% definiert.

	Na <sub>2</sub> O [%]	SiO <sub>2</sub> [%]
Mittelwert	10,31	23,43
Standardabweichung σ	0,17	0,27
Streuung (6σ)	1,02	1,62
<b>Minimum</b>	<b>9,3</b>	<b>21,8</b>
<b>Maximum</b>	<b>11,3</b>	<b>25,1</b>

Tabelle 8-1: Referenzwerte von Neusand für den Anteil an Alkali und Silizium

### 8.3 Laborversuche - Definition der Prozessparameter

Die Ziele der im Labormaßstab durchgeführten Versuche waren die Bestätigung der definierten Grenzwerte aus Kapitel 8.2 und die Festlegung eines Prozessfensters der ein- bzw. zweistufigen Regeneration für die beiden Parameter Prozesszeit und -temperatur. Dabei wurde im Versuch L1 das Ausgangsmaterial (anorganisch gebundener Kernbruch) im Laborofen bei den in Tabelle 8-2 angegebenen Zeit- und Temperaturstufen erhitzt. Und anschließend der Formstoffmodul als Na<sub>2</sub>O- und SiO<sub>2</sub>-Gehalte bestimmt. In einer zweiten Versuchsreihe L2 wurde der anorganische Altsand einer mechanischen Vorbehandlung unterzogen, bevor die thermische Behandlung im Laborofen durchgeführt wurde.

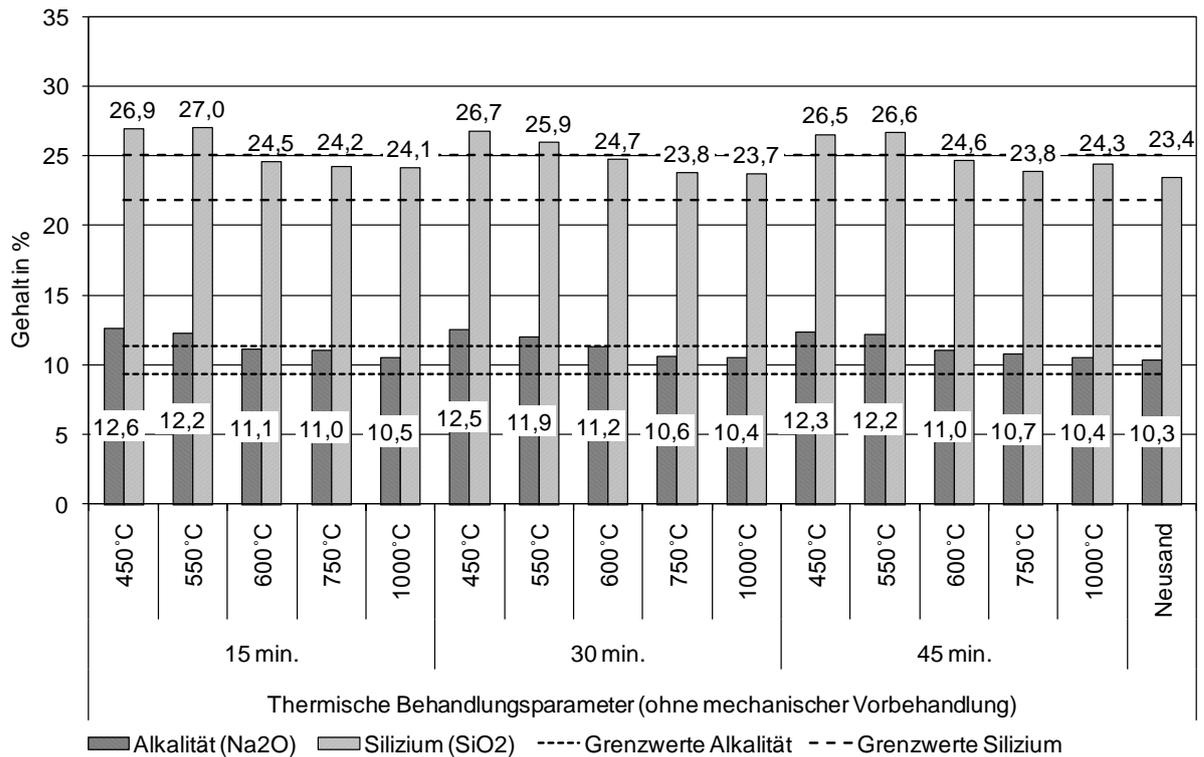
Versuch	Versuchsmaterial	Mechanische Vorbehandlung	Prozesszeit, thermisch [min]	Prozesstemperatur [°C]
Referenz	Neusand	-	-	-
L1	Kernbruch	keine	15, 30, 45, 60	450, 550, 600, 750, 1000
L2	Kernbruch	60 min.	15, 30, 45, 60	450, 550, 600, 750, 1000

**Tabelle 8-2: Versuchsparameter zur Ermittlung des Prozessfensters**

Die Ergebnisse des Laborversuchs L1 sind in Abbildung 8-5 zusammengefasst. Auf der vertikalen Achse sind jeweils die Alkali- und Siliziumanteile für die auf der horizontalen Achse aufgetragenen Temperaturstufen 450°C, 550°C, 600°C, 750°C und 1000°C bei den drei Prozesszeiten 15, 30 und 45 Minuten dargestellt. Weiterhin sind als Linien die beiden festgelegten Grenzwerte eingetragen. Als Referenz sind auf der rechten Seite die Prüfwerte von Neusand aufgeführt.

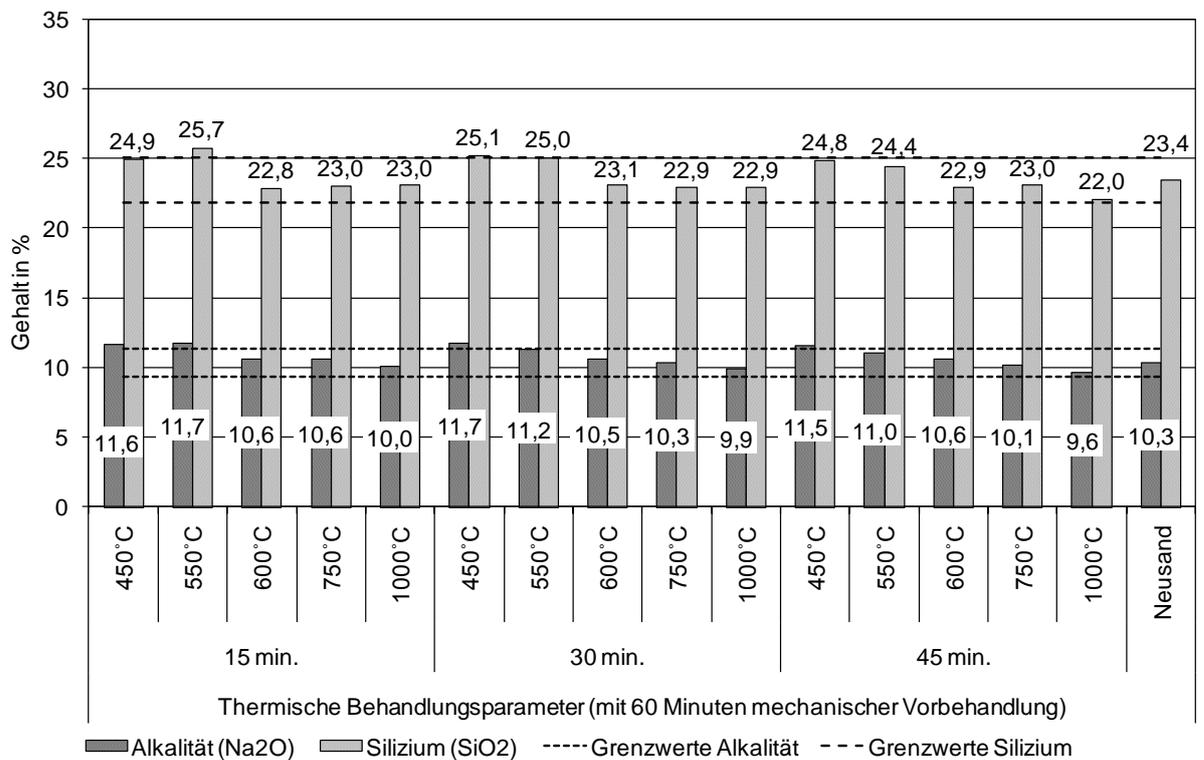
Der Alkali- und Siliziumgehalt in der Neusandprobe (H32) ergibt sich aus der Silikatmenge, die während der Prüfung hinzugegeben wurde. Diese Probe kann auch als Blindwert für einen unbelasteten Formgrundstoff bezeichnet werden. Der Alkaligehalt der Regenerate mit den niedrigeren Prozesstemperaturen von 450°C und 550°C liegt im Mittel um 2%, der Siliziumgehalt um rund 2,5% höher als der Neusandwert. Dieser zusätzliche Restbinderanteil wurde durch das zugegebene Silikat von der Sandkornoberfläche des Regenerats gelöst und steht dem System als aktiver Anteil wieder zur Verfügung.

Der Verlauf zeigt deutlich, dass der lösliche Alkali- und Siliziumgehalt durch eine Erhöhung der Prozesstemperatur weiter abgesenkt werden kann und dass dabei die Temperatur das Ergebnis stärker beeinflusst als die Regenerationszeit. Dieser Zusammenhang fällt beim Siliziumanteil deutlicher aus als bei der Alkalität. Bei Temperaturen ab 600°C liegt der gelöste, aktive Anteil der Alkalität nur 0,6% und der des Siliziums 0,1% über der Neusandprobe. Für alle drei Zeitstufen gilt, dass die Prozesstemperatur mindestens 600°C betragen muss, damit die Prüfwerte die zulässigen Grenzwerte einhalten und damit die Qualität des Regenerats der von Neusand entspricht. Eine differenzierte Auswertung der Prüfwerte ab einer Prozesstemperatur von 600°C ist nicht notwendig, da diese Werte innerhalb der Streuung der Neusandprüfung liegen und die Qualitätsanforderungen erfüllen.



**Abbildung 8-5: Alkali- und Siliziumanteil der Versuchsreihe L1**

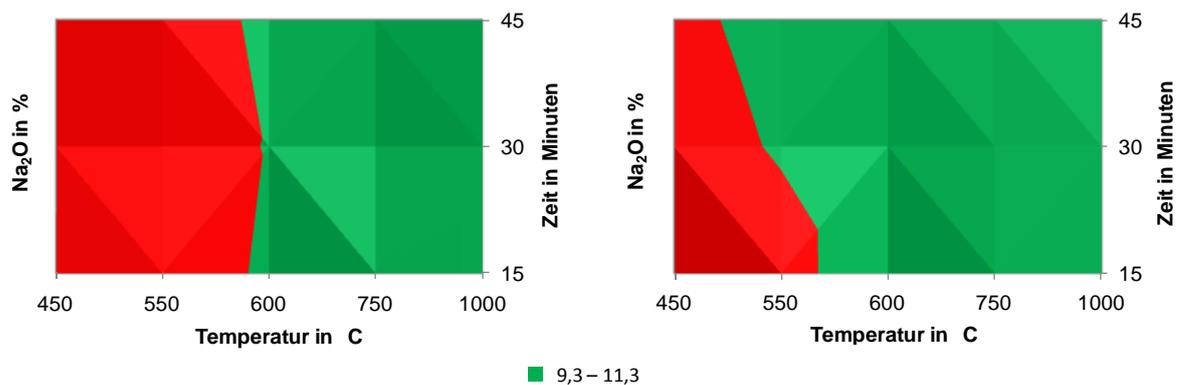
In Abbildung 8-6 sind die Ergebnisse der Versuche L2 dargestellt. Die Vorgehensweise entspricht, bis auf die zusätzliche mechanische Vorbehandlung der Altsande, der von Versuch L1. Durch die mechanische Vorbehandlung wird eine mechanisch-thermische Regeneration im Labor nachgestellt.



**Abbildung 8-6: Alkali- und Siliziumanteil der Versuchsreihe L2**

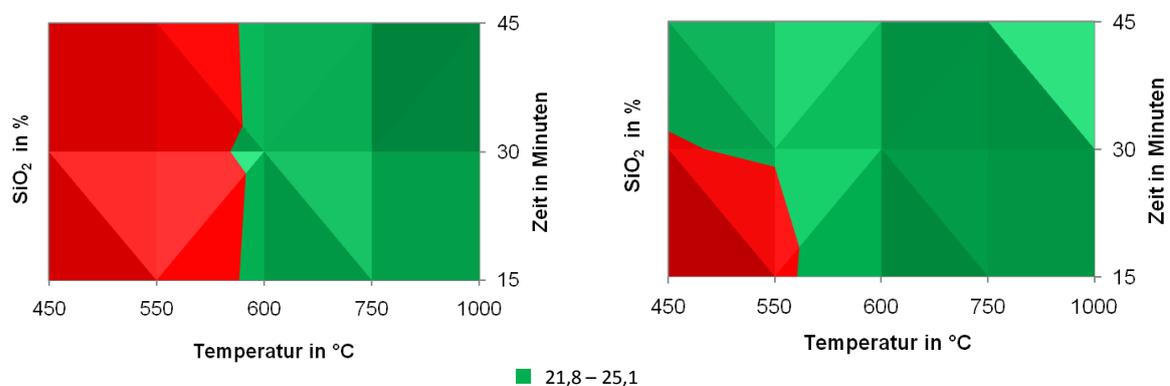
Im Vergleich zu Versuch L1 liegen die löslichen Alkali- und Siliziumanteile bei Versuch L2 deutlich niedriger. Das ist auf die mechanische Vorbehandlung zurückzuführen, durch die die Rückstände des Bindersystems von der Kornoberfläche teilweise entfernt werden. Bereits ab einer Temperatur von 550°C und einer Prozesszeit von mindestens 30 Minuten sinkt der lösliche Anteil unter den vorgegebenen Grenzwert. Grundsätzlich bewirkt die mechanische Vorbehandlung eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse.

In den folgenden Abbildungen sind zusammenfassend die Daten aus beiden Versuchen L1 und L2 in dreidimensionalen Kennfeldern dargestellt. Anhand der drei vorgegebenen Grenzwerte sind die Prozessfenster bezogen auf die einzelnen Prüfgrößen grün hinterlegt. In Abbildung 8-7 ist der Alkaligehalt in Abhängigkeit der Prozessparameter Temperatur und Zeit dargestellt. Das Prozessfenster umfasst den Bereich von 9,3 bis 11,3%. Das Feld auf der linken Seite zeigt die Ergebnisse des Versuchs L1. Deutlich zu erkennen ist die angesprochene, minimale Prozesstemperatur von 600°C und der geringe Einfluss der Prozesszeit. Den positiven Effekt der mechanischen Vorbehandlung auf das Prozessfensters ist in der rechten Abbildung dargestellt.



**Abbildung 8-7: Alkaligehalt (Na<sub>2</sub>O-Gehalt) in Abhängigkeit der Prozessparameter bei Versuch L1 (links) und Versuch L2 (rechts)**

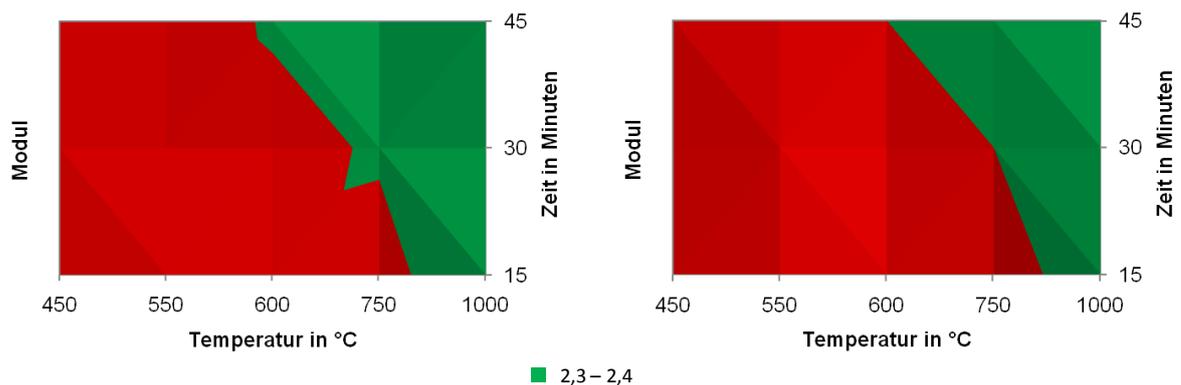
Das Kennfeld des Siliziumgehalts in Abbildung 8-8 weist eine vergleichbare Entwicklung auf. Im linken Feld ist das Prozessfenster ohne mechanische Vorbehandlung und im rechten Feld mit mechanischer Vorbehandlung im Bereich von 21,8 bis 25,1% grün markiert. Auch hier ist der positive Effekt der mechanischen Regeneration ersichtlich.



**Abbildung 8-8: Siliziumgehalt (SiO<sub>2</sub>-Gehalt) in Abhängigkeit der Prozessparameter bei Versuch L1 (links) und Versuch L2 (rechts)**

Wie oben beschrieben, kann aus dem Alkali- und Siliziumgehalt einer Messung der Formstoffmodul berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass eine alleinige Betrachtung des Moduls nicht ausreichend ist, da Kombinationen unterschiedlicher Einzelwerte des Alkali- und Siliziumanteils einen identischen Modul ergeben können. Das kann auch der Fall sein, wenn einer der beiden Werte außerhalb des zulässigen Grenzwertes liegt. Für eine zielführende Bewertung sind grundsätzlich die Einzelwerte Alkali- und Siliziumgehalt erforderlich.

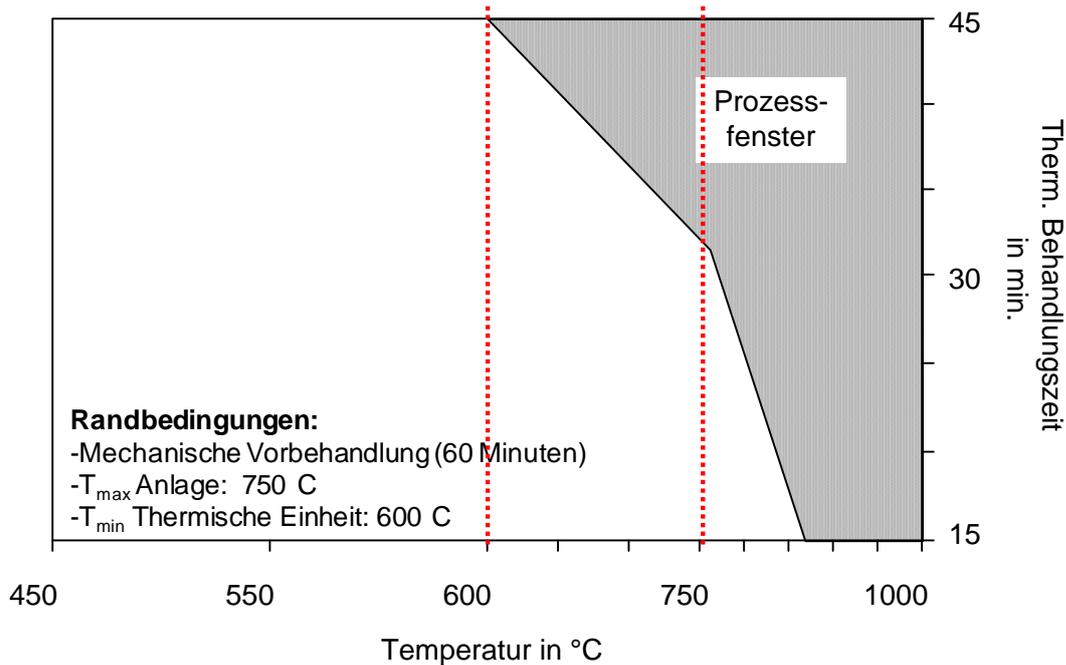
Um im ersten Entwicklungsschritt dieser neuen Prüfmethode sicher zu stellen, dass das gesetzte Qualitätsziel erreicht wird und die Eigenschaften der Regeneratsande denen von Neusand entsprechen, wurde der Modul als dritte Kenngröße für die Definition des gesamten Prozessfensters der Regeneration mit aufgenommen. Abbildung 8-9 zeigt den Formstoffmodul ohne und mit mechanischer Vorbehandlung. Im Gegensatz zum Alkali- und Siliziumgehalt bewirkt die mechanische Regeneration, die auf der rechten Seite dargestellt ist, keine Verschiebung des Prozessfensters. Das ist mit dem Verlauf der Alkalität und des Siliziumgehalts zu erklären. Die Werte beider Prüfgrößen steigen oder sinken je nach Prozessparameter und mechanischer Vorbehandlung nahezu parallel. Das daraus berechnete Verhältnis, das den Formstoffmodul beschreibt, ändert sich nur geringfügig.



**Abbildung 8-9: Formstoffmodul in Abhängigkeit der Prozessparameter bei Versuch L1 (links) und Versuch L2 (rechts)**

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz einer mechanischen Vorbehandlung eine klare Verbesserung der Kennwerte erreicht wurde. Aus diesem Grund wurden für eine abschließende Definition des Prozessfensters der mechanisch-thermischen Regeneration die drei rechten Kennfelder mit mechanischer Vorbehandlung (Abbildung 8-7; Abbildung 8-8; Abbildung 8-9) kombiniert.

In Abbildung 8-10 ist das Ergebnis dargestellt. Die drei Prozessfenster der Prüfgrößen Alkalität, Siliziumanteil und Formstoffmodul wurde kombiniert, um als gemeinsame Schnittmenge das Prozessfenster der mechanisch-thermischen Regeneration zu erhalten.



**Abbildung 8-10: Thermisches Prozessfenster der mechanisch-thermischen Regeneration; bei mechanischer Vorbehandlung**

Bei einem Vergleich der einzelnen Kennfelder mit dem gesamten Prozessfenster wird deutlich, dass der Formstoffmodul einen signifikanten Einfluss auf die Größe des Prozessfensters hat. Unklar ist derzeit noch, ob eine derart starke Einschränkung durch den Modul notwendig ist.

Wie in der Abbildung dargestellt, könnten Temperaturen zwischen 600°C und 1000°C bei den entsprechenden Zeiten von 45 bzw. 15 Minuten für eine Regeneration eingesetzt werden. Durch die verwendete Anlagentechnik sind weitere Randbedingungen vorgegeben. Die minimale Temperatur der thermischen Behandlung beträgt 600°C. Diese Temperatur ist für eine optimale Verbrennung des eingesetzten Prozessgases in dem Fluidbettfofen notwendig. Weiterhin ist die maximale Temperatur auf 750°C aufgrund der eingesetzten Materialien und Isolationen der Anlagentechnik beschränkt. Das aufgeführte Prozessfenster ist gültig für Altsande, die zuvor einer 60minütigen mechanischen Vorbehandlung unterzogen wurden.

Das erarbeitete Prüfverfahren mit den drei Prüfparametern Alkaligehalt, Siliziumgehalt und Formstoffmodul konnte bestätigt werden. Das definierte Prozessfenster für die mechanisch-thermische Regeneration wurde für eine Bewertung der folgenden Betriebsversuche zur einmaligen und mehrfachen Regeneration eingesetzt. Die Ergebnisse werden den Wissenstand zur beschriebenen und neu entwickelten Prüfung anorganischer Regeneratsande weiter aufbauen. Unter Umständen muss eine Erweiterung des Prozessfensters oder auch der Prüfgrenzen erfolgen, wenn die technologischen Eigenschaften der Regenerate eine fehlerfreie Kernfertigung zulassen.

#### 8.4 Betriebsversuche - Einmalige Regeneration

Zur weiteren Bestätigung der Laborversuche wurden Betriebsversuche mit ausgewählten mechanisch-thermischen Regenerationsparametern durchgeführt. Das aus der anorganischen Kernfertigung eingesammelte Ausgangsmaterial (Kernbruch) wurde mit den in Tabelle 8-3 angegebenen Parametern regeneriert.

Bezeichnung	Mechanische Regeneration	Thermische Regeneration	
	Zeit [min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
E1	60	15	620
E2	60	30	620
E3	60	45	620
E4	60	30	450
E5	60	30	500
E6	60	30	550

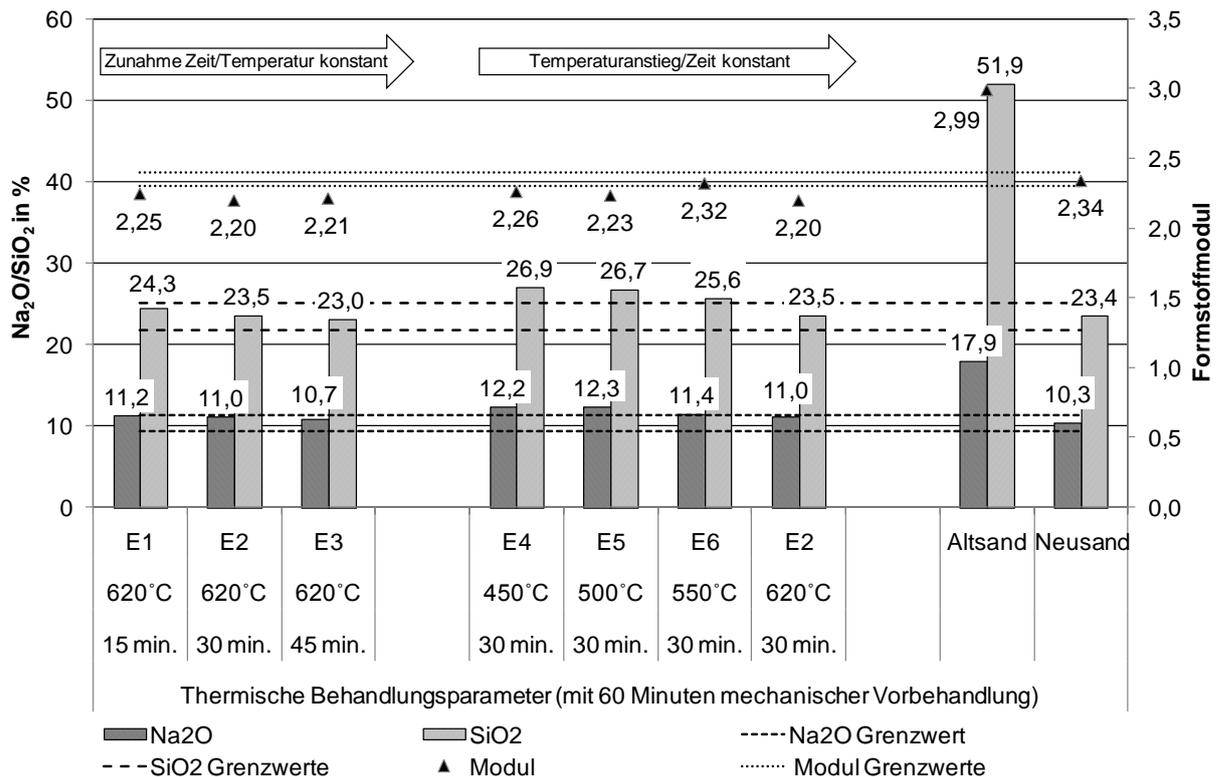
**Tabelle 8-3: Versuchsparameter der Betriebsversuche zur einmaligen Regeneration**

Nach einer Prüfung im Chemielabor wurden die Regenerate zur Fertigung der Versuchsgeometrie eingesetzt. Dabei erfolgte auch eine Bewertung der Formstoffeigenschaften über die im Werkzeug integrierten Prüfkörper (Gasdurchlässigkeit, Biegefestigkeit und Heißdeformation). Weiterhin wurden die hergestellten Gussteile auf ihre Maßhaltigkeit geprüft. Die Verarbeitung der Regeneratsande in der anorganischen Kleinserienfertigung erfolgte mit 2,0% Silikat und 0,8% Promotor bei folgenden Prozessparametern (Tabelle 8-4).

T <sub>Werkzeug</sub>	Schießdruck	Vorhärtezeit	Rampenzeit	Spülzeit	Spüldruck
160°C	5 bar	10 s	5 s	30 s	3 bar

**Tabelle 8-4: Rezeptparameter und Kernschießparameter der Betriebsversuche**

In den folgenden Abschnitten sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Zuerst erfolgt die chemische Prüfung der regenerierten Formgrundstoffe. In Abbildung 8-11 sind die drei Prüfgrößen Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), Siliziumgehalt ( $\text{SiO}_2$ ) und der Formstoffmodul dargestellt. Die Differenz zwischen den Prüfwerten von Neusand und den betrachteten Regeneratsanden beschreibt den aktiven Restbinderanteil nach der Regeneration. Die Versuchsergebnisse sind nach steigender Prozesszeit (E1, E2 und E3) und nach steigender Prozesstemperatur (E4, E5, E6 und E2) geordnet. Der Versuch E2 wird dabei zweimal aufgeführt. Auf der rechten Seite sind bei der chemischen Prüfung zusätzlich die Vergleichswerte für Neusand und Altsand angegeben. Diese Art der Anordnung wird auch bei den nachfolgenden Abbildungen angewendet, um den Einfluss des Zeit- oder Temperaturverlaufs deutlicher darstellen zu können.



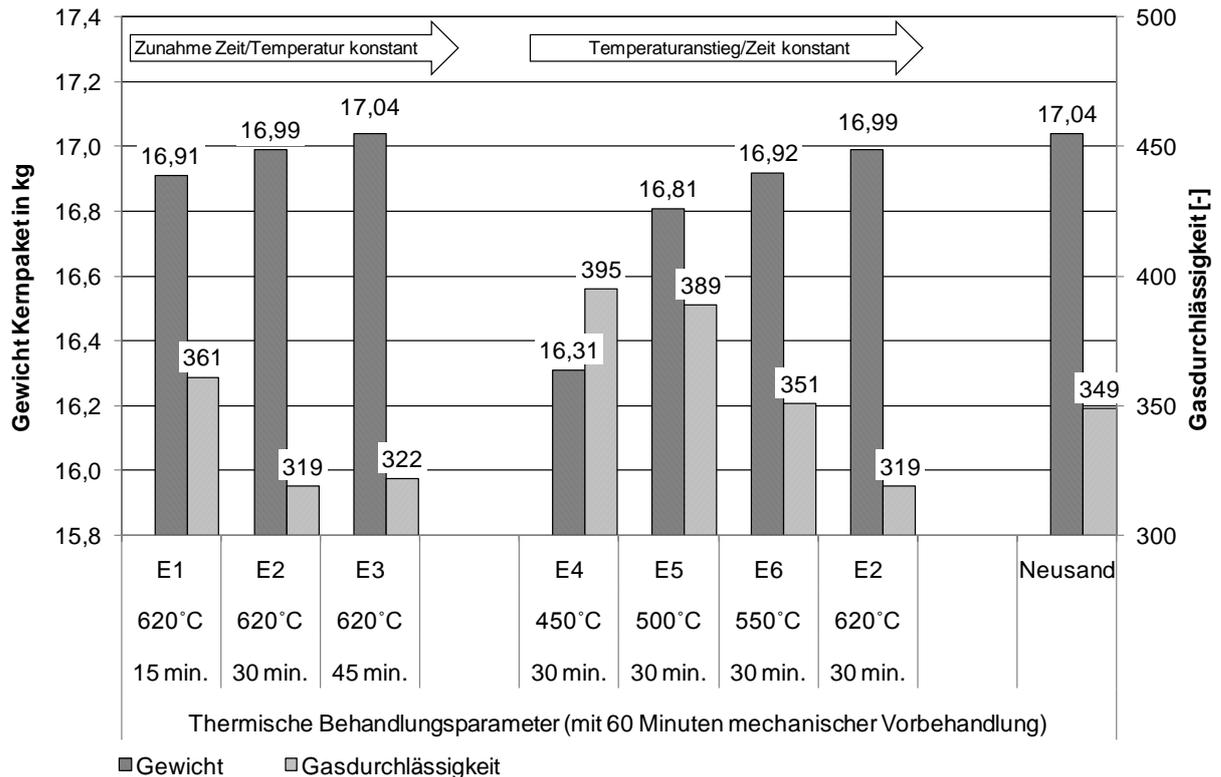
**Abbildung 8-11: Formstoffmodul - Chemische Prüfung der Versuchsreihe E**

In den Versuchen E1 bis E3 wurde bei einer konstanten Temperatur von 620°C die Prozesszeit von 15 auf 45 Minuten erhöht. Im Gegensatz zu den Versuchen der Versuchsreihe L2 bei 600°C, zeigen diese Ergebnisse einen größeren Einfluss der Zeit auf die chemische Qualität bzw. den löslichen Restbinderanteil im Regenerat. Der Siliziumanteil sinkt von 24,3 auf 23%. Der Natriumwert sinkt nur schwach, bewegt sich aber wie der Siliziumanteil innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte.

Bei den Versuchen E4, E5, E6 und E2 wurde eine konstante Prozesszeit von 30 Minuten eingestellt und die Temperatur von 450 auf 620°C in den angegebenen Stufen variiert. Die Ergebnisse bestätigen die ermittelte Grenztemperatur zwischen 550 und 600°C der Versuchsreihe L2 (Abbildung 8-7 bzw. Abbildung 8-8), ab der ein Unterschreiten des oberen Grenzwertes des Alkali- und Siliziumgehalts möglich ist. Deutlich wird dies vor allem bei der Änderung des Siliziumgehalts von Versuch E6 (550°C) auf E2 (620°C). Weiterhin wird durch diese vier Versuche nochmals der größere Einfluss der Temperatur auf das Prozessergebnis im Vergleich zur Prozesszeit von E1 bis E3 deutlich.

Der Formstoffmodul ist als dritte Größe in der Abbildung dargestellt. Deutlich wird hier die Notwendigkeit vor allem die Einzelwerte auszuwerten. Trotz der unterschiedlichen Prüfwerte für die Alkalität und den Siliziumgehalt, bleibt der Formstoffmodul relativ konstant. Der Referenzwert von Neusand wird nur durch den Versuch E6 erreicht, wobei dieser knapp über den Grenzwerten des Alkali- und Siliziumgehalts liegt.

Bei der Korngrößenverteilung wurden keine Änderungen festgestellt. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Siebanalyse nicht weiter aufgeführt.



**Abbildung 8-12: Gewicht der Kernpakete und Gasdurchlässigkeit der Prüfkörper der Versuchsreihe E**

Abbildung 8-12 zeigt den Verlauf des mittleren Gewichts und der Gasdurchlässigkeit aller produzierten Kernpakete der Versuche E1 bis E6 in Abhängigkeit der Prozesszeit und der Prozesstemperatur und zusätzlich den Vergleichswert von Neusand. Festzustellen ist, dass bei einer Reduzierung der löslichen anorganischen Binderanteile durch eine längere Prozesslaufzeit oder eine Erhöhung der Prozesstemperatur (siehe auch Abbildung 8-11), das Kerngewicht ansteigt, die Gasdurchlässigkeit sinkt und die Eigenschaften von Neusand erreicht werden. Dabei hat die Prozesstemperatur, wie auch bei der chemischen Prüfung, einen deutlich höheren Einfluss.

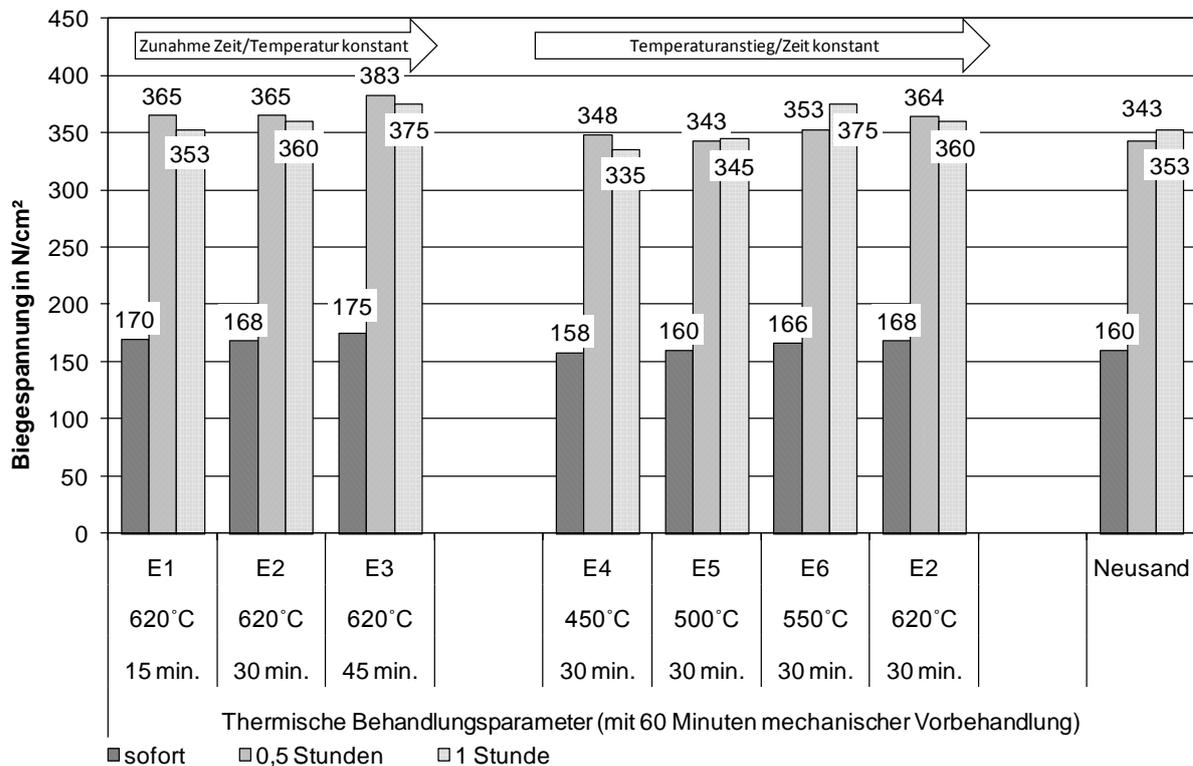
Innerhalb der Versuche E1 bis E3, die bei einer steigenden Prozesszeit von 15 auf 45 Minuten bei 620°C durchgeführt wurden, steigt das Kerngewicht nur um knapp 1% auf das Vergleichsniveau von Neusand. Eine deutlich größere Steigerung von 0,680kg (4,0%) kann durch die Erhöhung der Prozesstemperatur zwischen Versuch E4 und E2 bei einer Prozesszeit von 30 Minuten beobachtet werden.

Dieser Verlauf spiegelt sich auch in der Gasdurchlässigkeit wieder. Ein niedrigeres Kerngewicht deutet auf ein schlechteres Fließverhalten und damit auf eine geringere Verdichtung des Formstoffes hin, die eine höhere Gasdurchlässigkeit hervorruft. Dies kann zu porösen Fehlstellen im Kern und auch zu Penetrationen im Gießprozess führen. Das Fließverhalten wird durch die anorganischen Restbestandteile im Formgrundstoff beeinflusst, die erneut an der Binderaktion teilnehmen, zu einer Modulveränderung führen und die Aushärtungsreaktion beschleunigen. Bei den Kernpaketen aus Neusand beträgt die Gasdurchlässigkeit 349. Dieser Wert wird vom regenerierten Formgrundstoffen E6 genau

erreicht. Die Regenerate E2 und E3 weisen eine noch geringere Gasdurchlässigkeit von ca. 320 auf. Bezogen auf die Gasdurchlässigkeit ist eine Prozesszeit von 15 Minuten bei einer Regeneration mit 620°C nicht ausreichend (siehe E1). Erst ab 30 Minuten wird eine bessere oder zu Neusand vergleichbare Gasdurchlässigkeit erreicht. Bei dieser Prozesszeit kann wiederum die Temperatur auf 550°C abgesenkt werden. Zusammenfassend ist anzumerken, dass die besten Werte bei Regenerat E3 vorliegen. Hier wurde der Altsand nach der mechanischen Vorbehandlung bei 620°C für 45 Minuten regeneriert. Dieses Ergebnis bestätigt das Prozessfenster aus Abbildung 8-10.

Ein Zusammenhang zwischen Formstoffmodul und Kerngewicht bzw. Gasdurchlässigkeit konnte nicht hergestellt werden. Die starken Veränderungen der beiden Kennwerte spiegeln sich nicht im Verlauf des Moduls wieder.

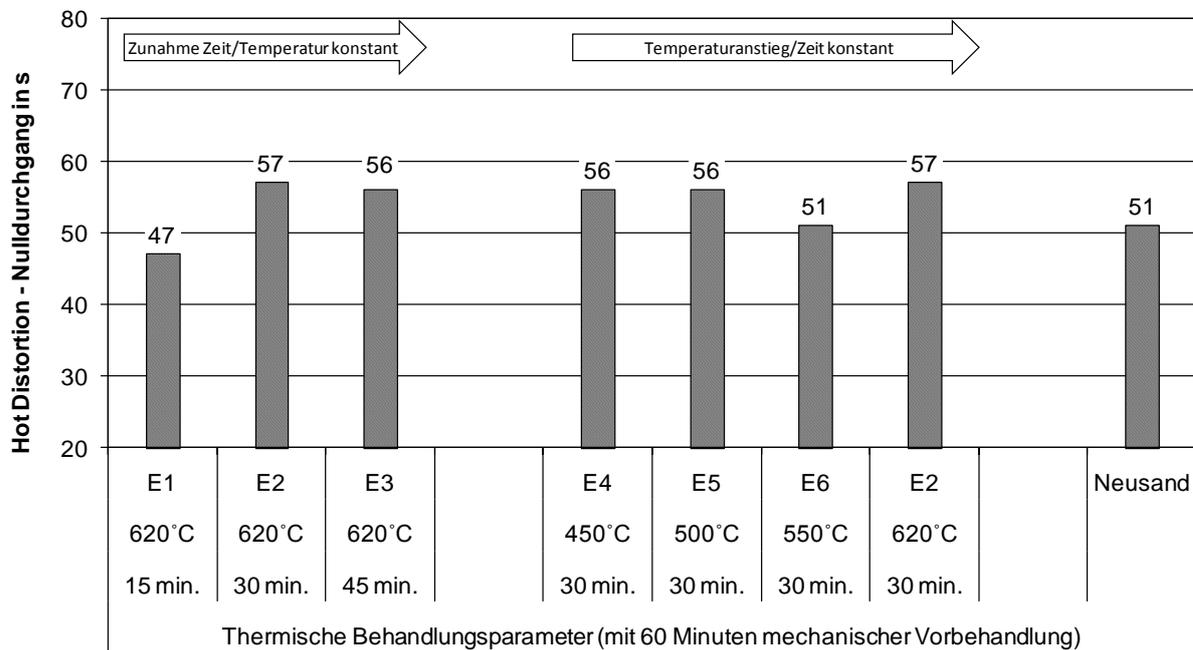
In Abbildung 8-13 sind die Festigkeitswerte in Form der Biegespannung der Versuche E1 bis E6 dargestellt. Die Anordnung der Versuchsreihen entspricht den vorangegangenen Abbildungen.



**Abbildung 8-13: Biegefestigkeiten bei einmaliger Regeneration der Versuchsreihe E**

Sowohl die Sofortfestigkeiten als auch die Festigkeiten nach einer Lagerzeit von 30 Minuten und einer Stunde liegen bei allen Versuchen auf dem Niveau der Prüfkörper aus Neusand. Eine Tendenz zu höheren Festigkeiten ist bei einer Prozesstemperatur über 600°C und einer steigenden Prozesszeit zu beobachten.

Abschließend sind in Abbildung 8-14 die Prüfwerte der Heißdeformation als Mittelwert aus drei Messungen der Versuche E1 bis E6 abgebildet.



**Abbildung 8-14: Hot Distortion bei einmaliger Regeneration der Versuchsreihe E**

Die regenerierten Formgrundstoffe der Versuche E2 bis E6 weisen sehr gute Heißdeformationseigenschaften auf. Die Zeit bis zum Nulldurchgang des Prüfkörpers unter thermischer Belastung verlängert sich durchschnittlich um 10%. Das Regenerat aus Versuch E6 erreicht exakt den Neusandwert. Das abweichende Verhalten von Regenerat E6 kann dabei nicht geklärt werden. Die Haltezeit von Regenerat E1 liegt 6% unter der von Neusand. Unter Umständen ist die kurze Behandlungszeit von 15 Minuten eine Ursache dafür.

Mit der durchgeführten Versuchsreihe zur einmaligen Regeneration bei unterschiedlichen Parametern konnte das definierte Prozessfenster aus Abbildung 8-10 grundlegend bestätigt werden. Die chemische Prüfung, die den löslichen Restbinderanteil im Regenerat beschreibt, hat gezeigt, dass auch Prozesstemperaturen zwischen 550 und 600°C möglich sind, das Erreichen einer mit Neusand vergleichbaren Qualität aber nicht garantiert ist. Aus diesem Grund sollten die Prozesstemperaturen und -zeiten des festgelegten Prozessfensters gewählt werden. Die Auswertung von Kerngewicht und Gasdurchlässigkeit bestätigen diesen Sachverhalt mit dem besten Prüfergebnis bei der Parameterkombination 620°C und 45 Minuten, die einen Betriebspunkt innerhalb des Prozessfensters darstellt. Die Prüfergebnisse der Festigkeiten und der Heißdeformation zeigen tendenziell bessere Ergebnisse bei längeren Prozesszeiten und höheren Temperaturen.

## 8.5 Betriebsversuche - Mehrfache Regeneration

In der Serienfertigung werden die anorganischen Regeneratsande mehrmals in der Produktion eingesetzt. Mit den bisher durchgeführten Versuchen wurde der Einfluss der Regenerationsparameter bei einer einmaligen Regeneration auf die Qualität beurteilt. Um den realen Prozess in einer Gießerei abzubilden, muss eine mehrmalige Regeneration durchgeführt und Veränderungen in der Qualität der Regenerate bewertet werden. In Tabelle 8-5 sind die Parameter der drei durchgeführten Kreislaufversuche aufgeführt. Nachdem die thermisch-mechanische Regeneration nicht in den Labormaßstab übertragbar war, konnten sie nur in die Betriebsversuche zum Kreislaufverhalten mit aufgenommen werden.

Versuchsreihe	M	S	U
Umläufe	3	4	5
Reihenfolge	T – M – Neusand	M – T – Neusand	M – Neusand – T
Mechanische Regeneration	60 Minuten	60 Minuten	60 Minuten
Thermische Regeneration	620 °C 30 Minuten	650 °C 30 Minuten	650 °C 45 Minuten

**Tabelle 8-5: Versuchparameter der Betriebsversuche zur mehrfachen Regeneration**

Ziel der Versuchsreihen ist eine Bewertung des Einflusses der Prozessreihenfolge und der Anzahl an Kreisläufen auf die Regeneratqualität bei einer praxisnahen zweistufigen Regeneration. Die Prozessparameter der thermischen Behandlung mussten aus unterschiedlichen Gründen leicht angepasst werden. Eine Vergleichbarkeit, vor allem der Versuchsreihen M und S, sollte dennoch gegeben sein.

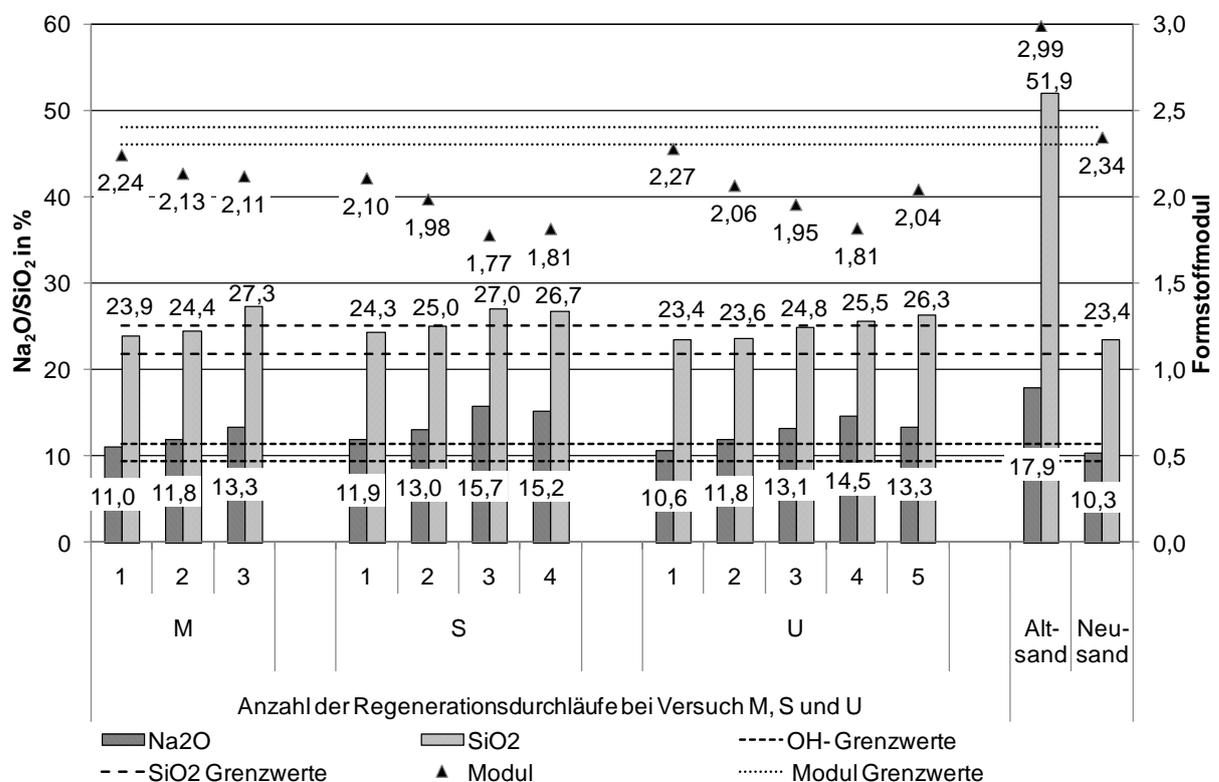
In Versuchsreihe M wurde der anorganische Altsand einer thermisch-mechanischen Regeneration unterzogen. Nach einer 30minütigen Behandlung im Fließbettöfen bei 620°C folgte eine 60minütige mechanische Behandlung. Abschließend wurde dem Regenerat ein fester Neusandanteil zugegeben, um einen späteren, zusätzlichen Mischvorgang zu vermeiden. Nach der Verarbeitung in der Kernfertigung wurde ein Teil der Sandkerne dem Gießprozess zugeführt, die restlichen Kerne als Kernbruch direkt der zweiten Regeneration eingesetzt. Der beschriebene Vorgang wurde insgesamt dreimal wiederholt.

Die Versuchsreihe S wurde bis auf eine umgekehrte Prozessreihenfolge und einer erhöhten Prozesstemperatur auf gleiche Weise durchgeführt. Durch eine höhere Menge an Ausgangsmaterial konnten bei diesem Versuch vier Regenerationsdurchläufe realisiert werden.

Die abschließende Versuchsreihe U beschreibt wie der Versuch S eine mechanisch-thermische Behandlung der anorganischen Altsande. Eine weitere Erhöhung der Altsandmenge ermöglichte eine fünffache Regeneration. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen erfolgte die thermische Behandlung bei einer Temperatur von

650°C und einer Prozesszeit von 45 Minuten. Weiterhin wurde die Neusandzugabe vor die thermische Behandlung gesetzt. Dadurch konnte eine stabilere Fluidisierung des Sandes bei höheren Betriebstemperaturen erreicht werden.

Im Folgenden sind die Versuchsergebnisse der Versuchsreihen M, S und U dargestellt. Abbildung 8-15 zeigt die Ergebnisse der chemischen Prüfung der Formstoffe aller Versuche bei entsprechender Anzahl an Regenerationen (horizontale Achse). Als Vergleich sind die Werte von Alt- und Neusand angegeben. Der lösliche Restbinderanteil aus dem regenerierten Formstoff wird durch die Differenz zwischen Regenerat- und Neusandwert beschrieben. Zusätzlich sind die in Kapitel 8.2 erarbeiteten Grenzwerte von Neusand eingetragen. Um die chemische Prüfung vergleichen zu können, wurde bei den Versuchen M und S der Neusandanteil vor der Prüfung zugegeben.



**Abbildung 8-15: Formstoffmodul - Chemische Prüfung bei mehrfacher Regeneration, Versuche M, S, U**

Die Ergebnisse von M1 (Versuch M, 1.Umlauf) bis M3 (Versuch M, 3.Umlauf) beschreiben den Verlauf der Alkalität und des Siliziumanteils bei einer thermisch-mechanischen Regeneration. Es konnte ein Anstieg des SiO<sub>2</sub>-Gehalts von 23,9 auf 27,3% und ein Anstieg der Alkalität von 11,0 auf 13,3% beobachtet werden. Bereits nach der zweiten Regeneration liegt der Na<sub>2</sub>O-Messwert über dem Grenzwert. Nach der dritten Regeneration überschreiten beide Messwerte die Grenzwerte. Der Anstieg verläuft nahezu parallel, wodurch sich der Modul nur gering verändert. Der lösliche Restbinderanteil aus dem regenerierten Formstoff kann aus der Differenz zwischen Regenerat und Neusand ermittelt werden. Nach drei Umläufen enthält der Regeneratsand einen löslichen SiO<sub>2</sub>-Anteil von 3,9% und Na<sub>2</sub>O-Anteil von 3%.

Bei der mechanisch-thermischen Regeneration in Versuchsreihe S zeigen die Ergebnisse einen deutlich steileren Anstieg des löslichen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Anteils im Regenerat, mit einem Maximum von 5,4% nach der dritten Regeneration. Der Siliziumanteil steigt vergleichbar zur thermisch-mechanischen Versuchsreihe M. Durch den höheren Alkalianteil sinkt der Modul stark ab. Die höhere Prozesszeit und die geänderte Prozessreihenfolge ermöglichen keine Verbesserung der chemischen Prüfergebnisse gegenüber der Versuchsreihe M.

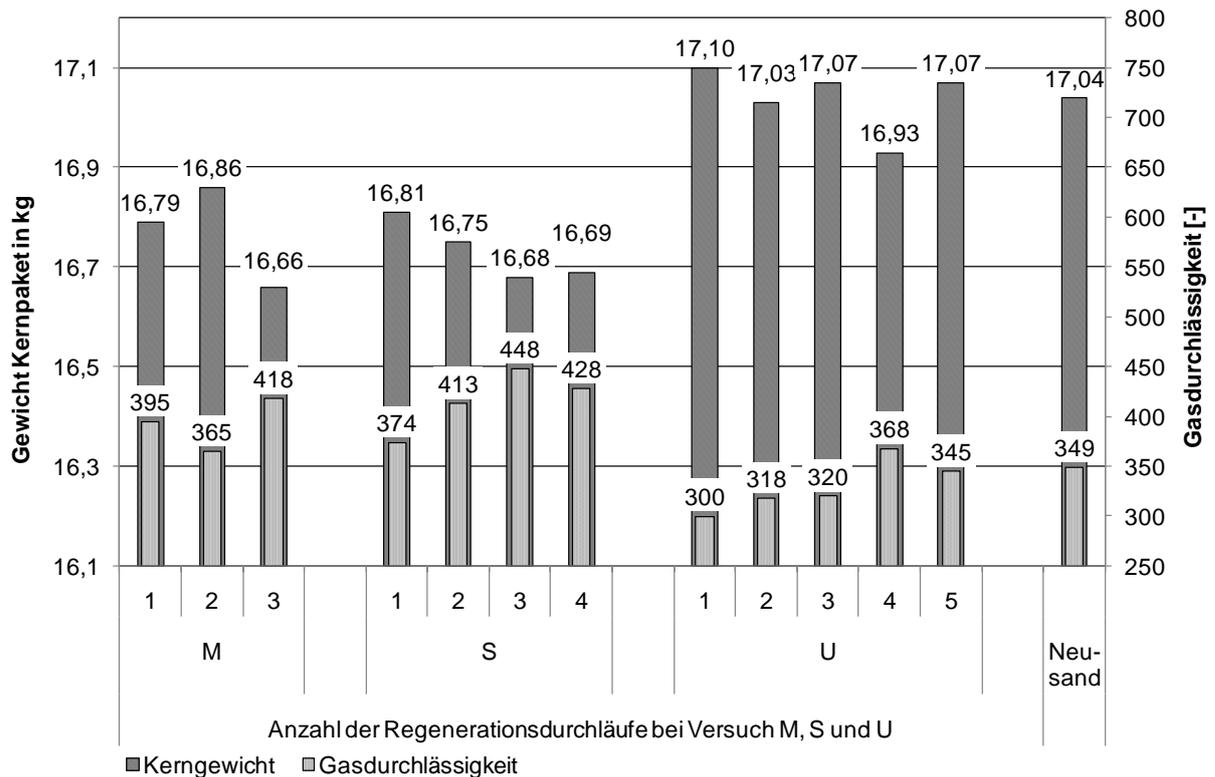
In der zweiten mechanisch-thermischen Versuchsreihe U wurde die Prozesszeit um 15 Minuten erhöht und der Neusandanteil vor der thermischen Behandlung zugegeben. Der Versuch U1 weist den niedrigsten Alkali- und Siliziumanteil mit 10,6% und 23,4% auf, der das Niveau von Neusand erreicht. Auch in dieser Versuchsreihe ist ein Anstieg des löslichen Restbinderanteils im Regenerat zu beobachten. Dennoch steigt der Siliziumanteil langsamer. Im Vergleich zu Neusand und den Versuchen M3 und S3, liegt bei U3 mit 1,4% der niedrigste Wert bei dreifacher Regeneration vor. Auch nach einer fünffachen Regeneration wird der Maximalwert der Vergleichsversuche nicht erreicht. Die Alkalität steigt bis zur dritten Regeneration analog zur Versuchsreihe M. Nach einem weiteren Anstieg von 1,4% bei U4 fällt der Wert bei U5 wieder um 1,2% ab. Der Modul, der durch den stärkeren Anstieg der Alkalität erst fällt, steigt nach der fünffachen Regeneration wieder leicht an.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei allen drei Kreislaufversuchen in einzelnen Chargen der Regenerationsbehandlung die Zieltemperatur aufgrund einer schlechten Fluidisierung des Sandes während der thermischen Behandlung nicht erreicht werden konnte. Zum einen liegen die Gründe im schwer einstellbaren Aufbau der Versuchsanlage und zum anderen im thermischen Verhalten der Wasserglasbinderreste bei höheren Temperaturen. Das Auftreten eines leichten Verklumpens durch das Aufweichen der Restsilikate kann Ursache für die teilweise schlechte Fluidisierung sein. In der chemischen Auswertung kann dies unter Umständen einen Anstieg der Restbinderanteile begünstigen. Dennoch zeigen im Vergleich die Ergebnisse der Versuchsreihe U die besten Eigenschaften, die durch die folgenden Kenngrößen weiter bestätigt werden.

Abbildung 8-16 zeigt den Verlauf des mittleren Gewichts und der Gasdurchlässigkeit aller produzierten Kernpakete der Versuche M, S und U über die einzelnen Regenerationsdurchläufe. Zusätzlich ist der Vergleichswert von Neusand angegeben. Bei der Verarbeitung der regenerierten Sande in der Kernfertigung wurde festgestellt, dass die Versuchssande M und S schlechtere Verarbeitungseigenschaften als der Versuchssand U und Neusand aufweisen. Dieses Verhalten spiegelt sich bereits zum Teil in der chemischen Prüfung wieder, deutlicher wird es in der unteren Abbildung. Vor allem der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Wert erweist sich hier als zweckmäßig. So äußert sich beispielsweise der erhöhte Alkaligehalt im 4. Umlauf der Versuchsreihe U in einer niedrigeren Verdichtung (höhere Gasdurchlässigkeit, geringeres Kerngewicht).

Das mittlere Kerngewicht bei Versuch M über die Umläufe eins bis drei beträgt 16,77kg und damit 0,27kg weniger als das Kernpaket aus Neusand. Bei Versuch S liegt das mittlere Gewicht mit 16,73kg in einem vergleichbaren Bereich, deutlich unter dem Neusandwert mit

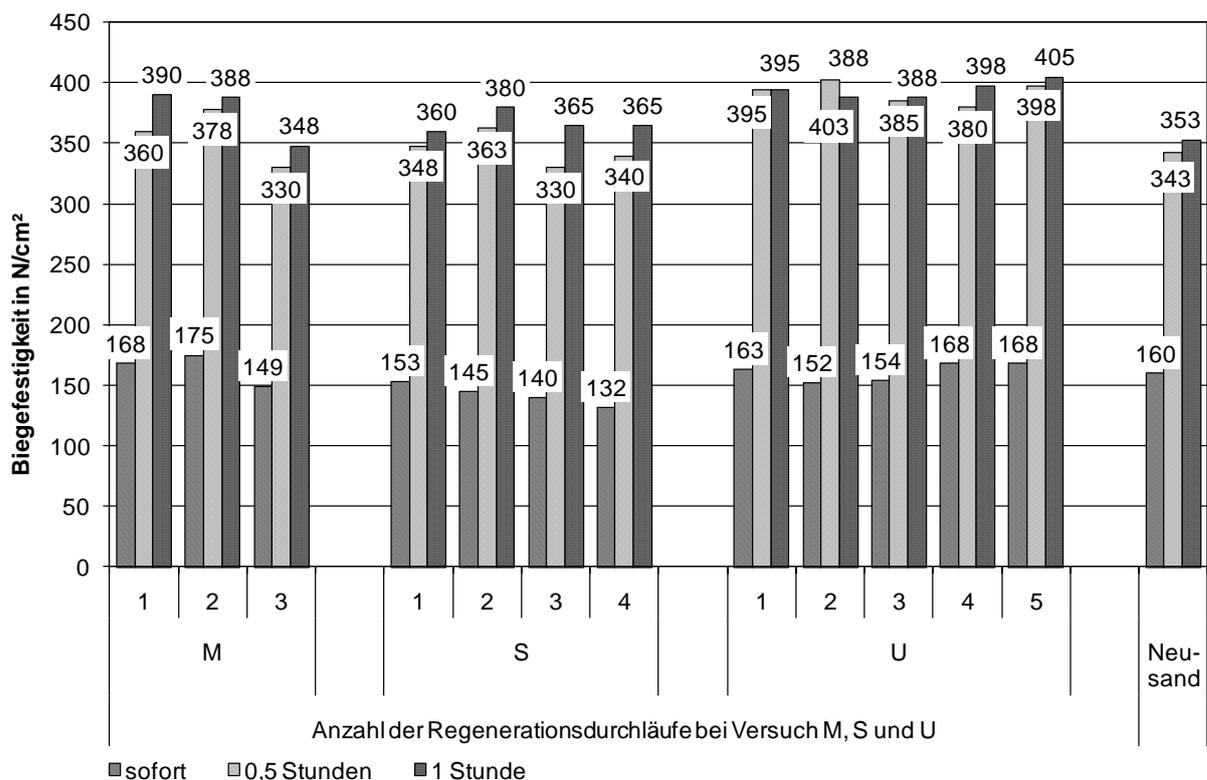
17,04kg. Die maximale Abweichung ist bei Versuch M3 mit -0,38kg zu beobachten. Die im Vergleich deutlich besseren chemischen Prüfwerte der Versuchsreihe U bestätigen sich im Verlauf des Kerngewichts. Eine höhere Verdichtung des Formstoffes im Werkzeug lässt auf verbesserte Fließeigenschaften und damit auf einen kleineren Einfluss der geringen Mengen an aktiven Restbinderanteilen schließen. Mit einem mittleren Kerngewicht von 17,04kg liegt diese Versuchsreihe genau auf dem Neusandwert. Das Kerngewicht der Versuche U1, U3 und U5 übersteigt geringfügig das Niveau von Neusand.



**Abbildung 8-16: Gewicht der Kernpakete und Gasdurchlässigkeit der Prüfkörper bei mehrfacher Regeneration; Versuche M, S, U**

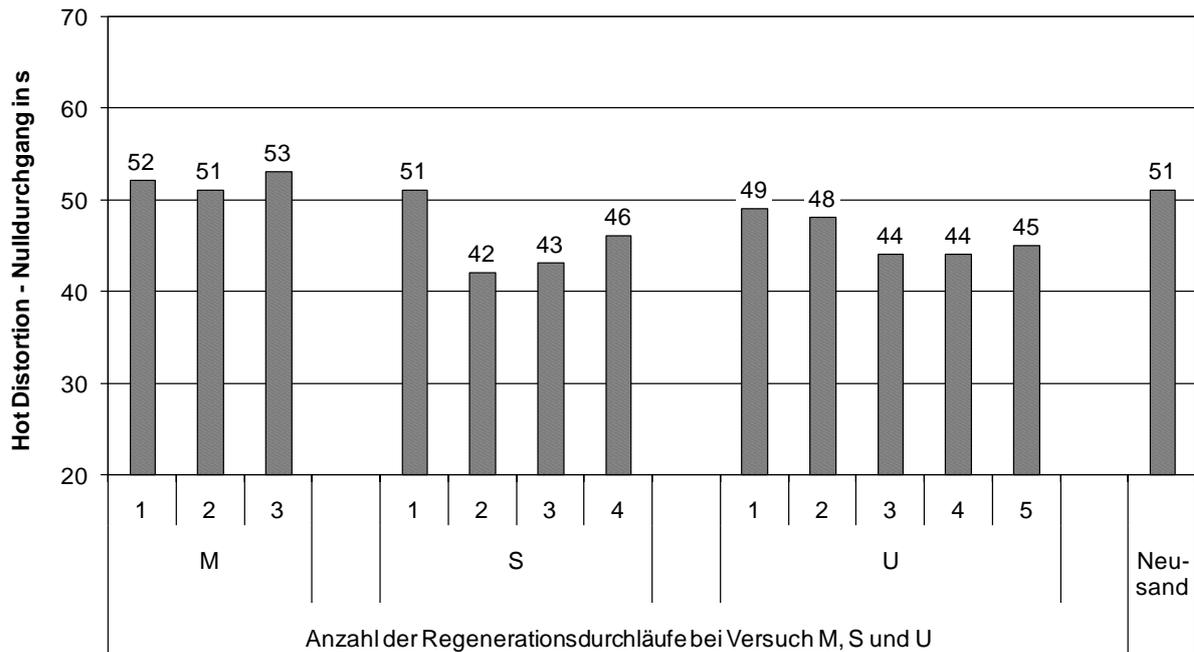
Eine deutliche Abhängigkeit der beschriebenen Ergebnisse zeigt sich im entgegengesetzten Verlauf der Gasdurchlässigkeitsprüfung, die mit Hilfe des integrierten Probekörpers ermittelt wurde. Eine hohe Gasdurchlässigkeit ist bezogen auf die Qualität der Kernoberfläche und der Verdichtung des Kernes als kritisch einzustufen. Hohe Werte fördern einen Abtransport der Gießgase über den Kern, die Gefahr von porösen Stellen im Kern steigt, was zu Penetrationen im Gussteil führen kann. Auch bei den Messwerten der Gasdurchlässigkeit schneidet die Versuchsreihe U mit zu Neusand vergleichbaren Werten am besten ab.

In der Darstellung der Biegefestigkeit (Abbildung 8-17) sind nur geringe Änderungen festzustellen. Die eingesetzten Regeneratsande weisen tendenziell ein höheres Festigkeitsniveau bei längerer Lagerzeit als Neusand auf. Das ist deutlich in der Versuchsreihe U festzustellen, bei der bei gleichbleibender Sofortfestigkeit die Festigkeit nach 0,5 Stunden um durchschnittlich 14% und nach 1 Stunde um 12% höher liegt. Auffällig ist das Absinken der Sofortfestigkeiten zwischen M1 und M3 und zwischen S1 und S4. Die Versuchsreihe U zeigt dagegen einen konstanten Verlauf der Sofortfestigkeiten und damit insgesamt die besten Festigkeitseigenschaften.



**Abbildung 8-17: Biegefestigkeit bei mehrfacher Regeneration; Versuche M, S, U**

Abschließend sind in Abbildung 8-18 die Ergebnisse der Heißdeformationsprüfung abgebildet. Erkennbar ist ein konstantes Niveau der Heißdeformation bei der Versuchsreihe „M“ über alle Umläufe und eine Abnahme bei den Versuchen S und U. Die thermische Haltezeit pendelt sich ab dem 2. bzw. 3. Umlauf bei etwa 45 Sekunden ein.



**Abbildung 8-18: Hot Distortion bei mehrmaliger Regeneration, Versuche M, S, U**

Mit den durchgeführten Kreislaufversuchen wurde der Einfluss der Prozessreihenfolge und der Anzahl an Regenerationszyklen auf die Qualität des Formgrundstoffs untersucht. Mit zunehmender Zahl an Regenerationszyklen konnte ein Anstieg des löslichen Restbinderanteils festgestellt werden. Dieser Anteil fiel bei den einzelnen Versuchsreihen unterschiedlich aus. In Kombination mit den fertigungstechnischen Prüfungen hat sich die mechanisch-thermische Regeneration mit einer Neusandzugabe zwischen den beiden Prozessschritten durch besonders gute Verarbeitungseigenschaften ausgezeichnet. Hier wurde die geringste Überschreitung festgestellt und es konnten bis zum fünften Umlauf zu Neusand vergleichbare Eigenschaften erzielt werden. Dabei spielen die veränderte Neusandzugabe und die um 15 Minuten verlängerte Prozesszeit in Kombination mit der hohen Prozesstemperatur eine entscheidende Rolle.

Grundsätzlich wurde der Einsatz der neuen chemische Prüfung als richtiger Weg bestätigt. In weiteren Fertigungsversuchen muss die Gültigkeit der sehr eng gesetzten und auf Neusand basierenden Grenzwerte weiter verifiziert und unter Umständen angepasst werden. Weiterhin wird deutlich, dass eine Prüfung zusätzlicher fertigungstechnischer Kenngrößen, wie z.B. der Gasdurchlässigkeit oder des Kerngewichts, zu empfehlen ist.

### 8.6 Auswertung der Maßhaltigkeit der Gussteile

Im Folgenden wird an ausgewählten Beispielen die Prüfung der Maßhaltigkeit der gegossenen Versuchsbauteilen beschrieben. Abbildung 8-19 zeigt das Gussteil im CAD-Format und eine Auswahl der betrachteten Längenmaße.

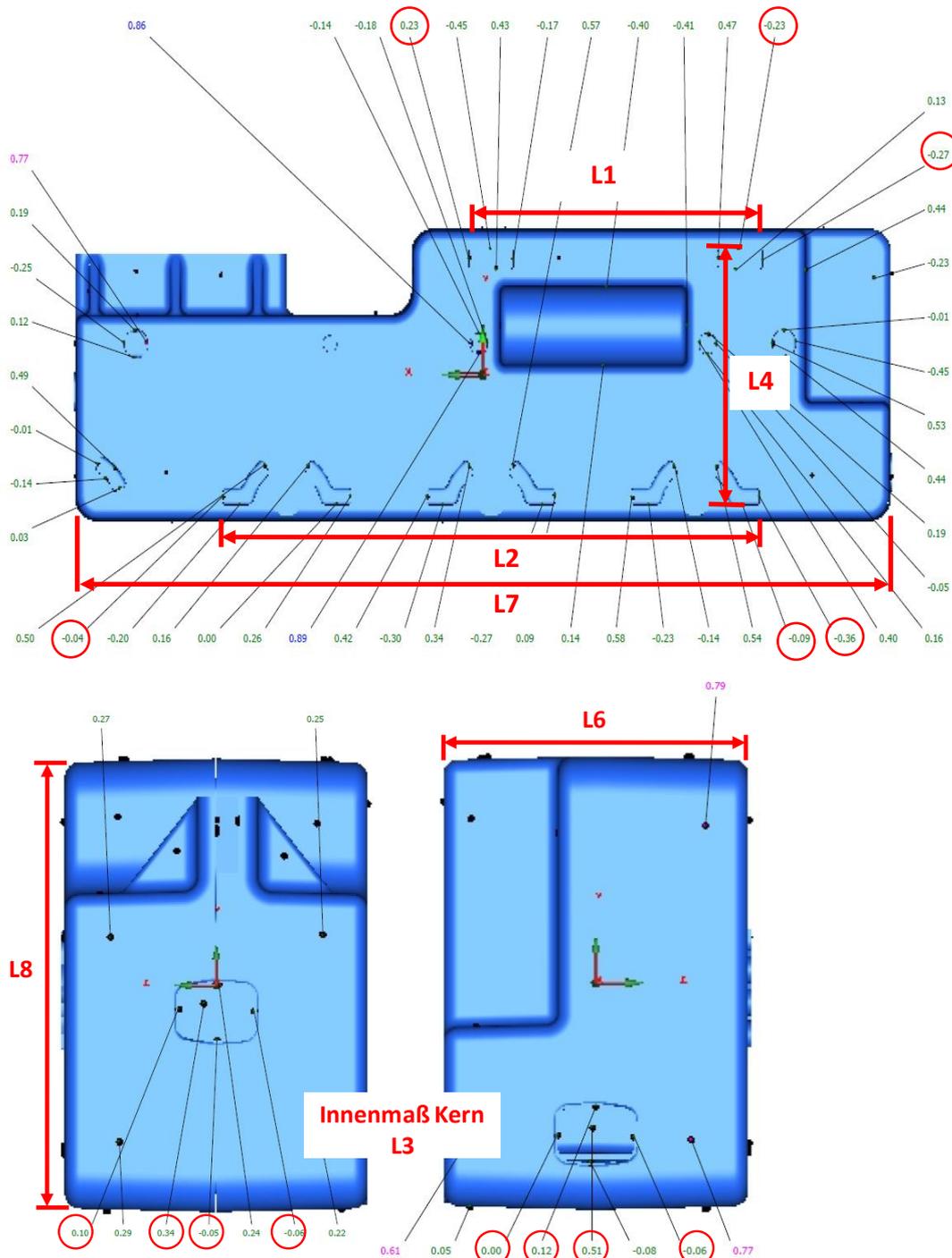


Abbildung 8-19: Ausgewählte Messstrecken des Versuchsbauteils

Aus den Positionen von zwei Messpunkten wird die Abweichung eines Längenmaßes bestimmt. Der Mittelwert aus den Messungen aller Versuchsbauteile ist in den

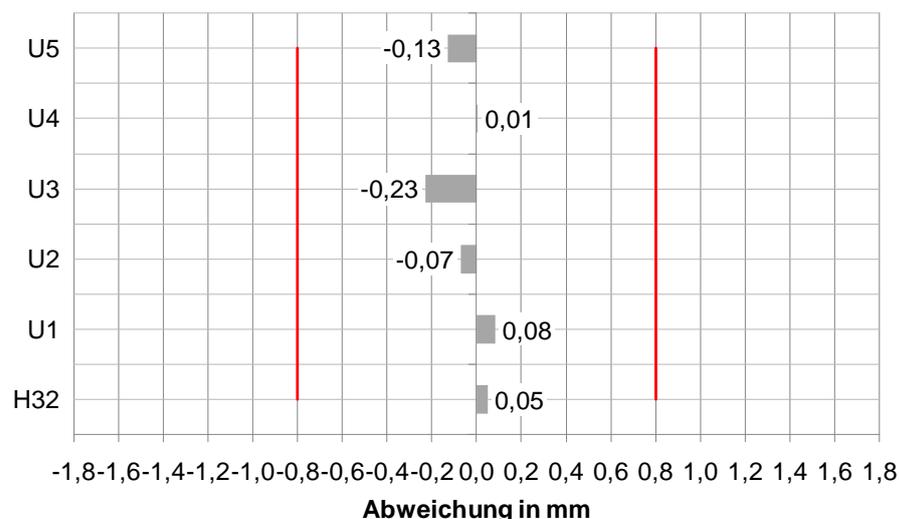
nachfolgenden Diagrammen dargestellt. Je Versuch wurden zwischen drei und sieben Gussteile ausgewertet. Grundlage zur Bewertung der Abweichungen ist folgendes Toleranzschema:

- Durch Sandformteil (Außenkontur) abgebildete Geometrie:  $\pm 1,8$  mm
- Durch Sandkern abgebildete Geometrie (z. B. Kerndurchbruch):  $\pm 0,8$  mm

Die Längenmaße L1, L2 und L4 beschreiben die durch den Sandkern abgebildeten Öffnungen zur Außenseite des Gussteils (Kerndurchbruch) und damit auch die Lage des Sandkerns im Gussteil. Ergänzt wird diese Messung durch das Längenmaß L3, das den Abstand der innenliegenden Wände, die durch den Kern abgebildet werden, definiert. Abschließend sind in dieser Auswertung noch die Außenmaße L6 (Höhe des Gussteils), L7 (Breite des Gussteils) und L8 (Tiefe des Gussteils) dargestellt.

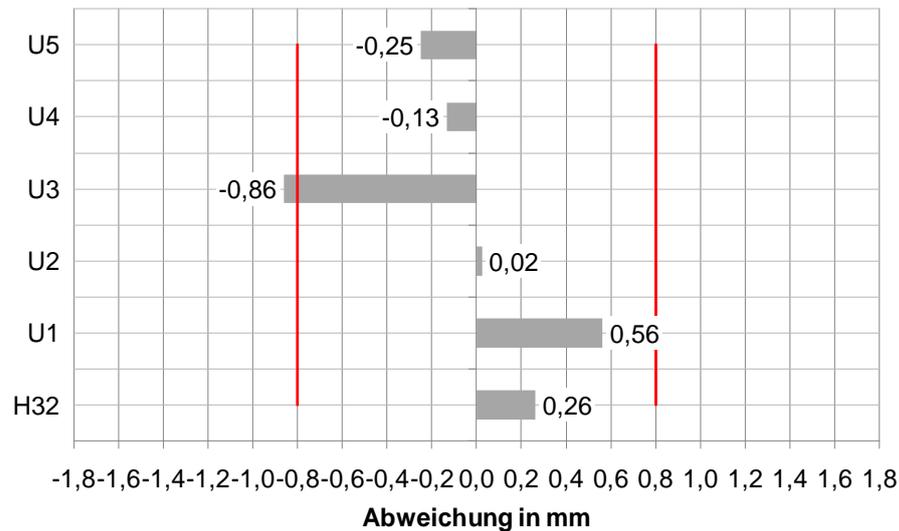
Auf Basis der vorangegangenen Auswertung der fertigungstechnischen und chemischen Eigenschaften der Regeneratsande, wird die Darstellung weiter auf einen Wertevergleich von Neusand und den Regeneraten aus dem Kreislaufversuch U reduziert. Dieser Versuch erzielt grundsätzlich die besten Eigenschaften, beschreibt die höchste Anzahl an Umläufen und wird aus diesem Grund hier näher betrachtet. Bei der Versuchsreihe S liegen nur zwei Gussteile des Versuchs S4 vor. Die restlichen Formen verloren während der Lagerung ihre Festigkeit und konnten nicht abgegossen werden, um ein unkontrolliertes Austreten von Schmelze zu vermeiden. Ein Grund für den Festigkeitsverlust wurde nicht gefunden. Eine Tendenz zu geringeren Festigkeitswerten kann allerdings bereits in Abbildung 8-17 beobachtet werden.

Abbildung 8-20 zeigt die mittlere Abweichung des Längenmaßes L1. Bei einer mittleren Korngröße des Formgrundstoffes von 0,32mm sind die geringfügigen Unterschiede nur schwer interpretierbar. Alle Werte liegen innerhalb der Toleranz. Bei Versuch U3 (nach dreimaliger Regeneration) zeigt sich die höchste negative Abweichung. Negative Abweichungen beschreiben bei innenliegenden Konturen eine verlängerte Messstrecke.



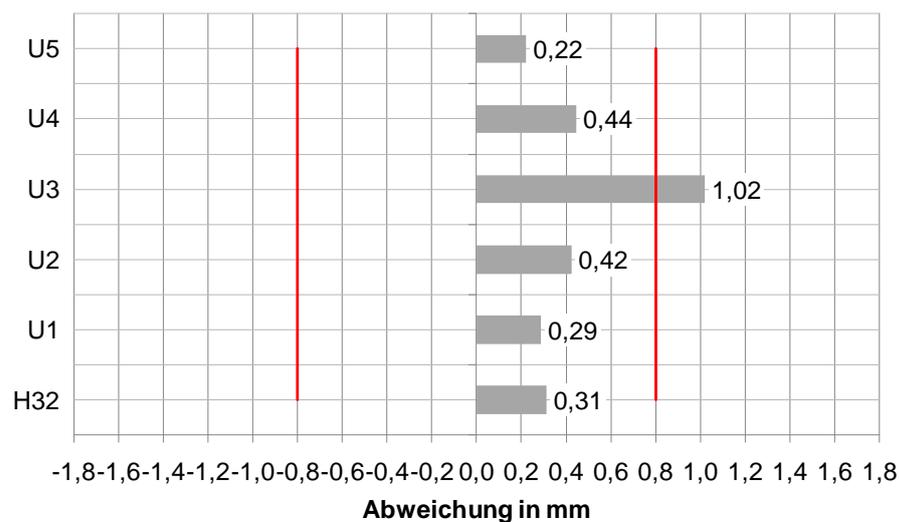
**Abbildung 8-20: Längenmaß L1 - Mittlere Abweichung**

Im Längenmaß L2 (Abbildung 8-21) sind größere Abweichungen festzustellen, die vor allem die Versuche U1 und U3 betreffen. Bei U3 wird der Grenzwert leicht überschritten. Auffällig ist der Vorzeichenwechsel zwischen U1 und U3. Ein Grund für dieses Verhalten könnten die Veränderungen im Verhalten der Heißdeformation sein (vgl. hierzu Abbildung 8-18). Aus den oben genannten Gründen konnte kein Vergleich mit den Versuche S2 und S3, die ein ähnlich niedriges Niveau bei der Prüfung der Heißdeformation zeigten, hergestellt werden.



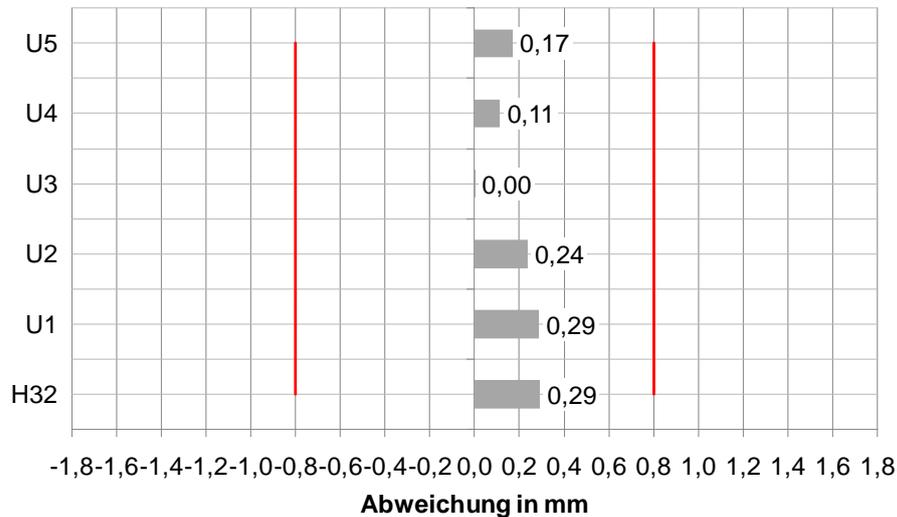
**Abbildung 8-21: Längenmaß L2 - Mittlere Abweichung**

Das in Abbildung 8-22 abgebildete Längenmaß L4 beschreibt die im rechten Winkel zu L1 und L2 liegende Position der Kerndurchbrüche. Auch hier zeigt U3 wieder ein auffälliges Verhalten und überschreitet den Grenzwert von 0,8mm. Die restlichen Versuche liegen innerhalb der Toleranz und sind vergleichbar zu Neusand.



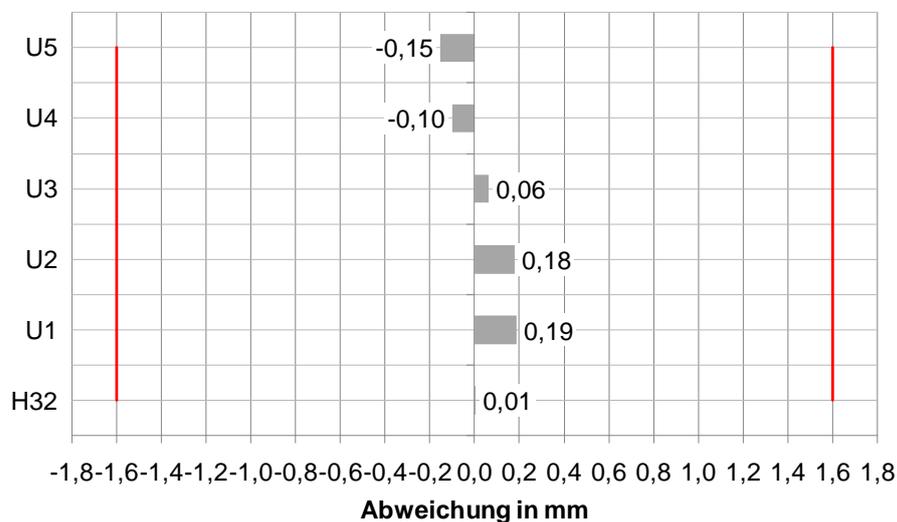
**Abbildung 8-22: Längenmaß L4 - Mittlere Abweichung**

Im Gegensatz zu den Kerndurchbrüchen (L2 und L4) zeigt das Innenmaß L3 nur geringe Schwankungen und alle Werte liegen innerhalb der Toleranz (Abbildung 8-23). Bei U3 liegt die größte Abweichung im Vergleich zu Neusand vor.



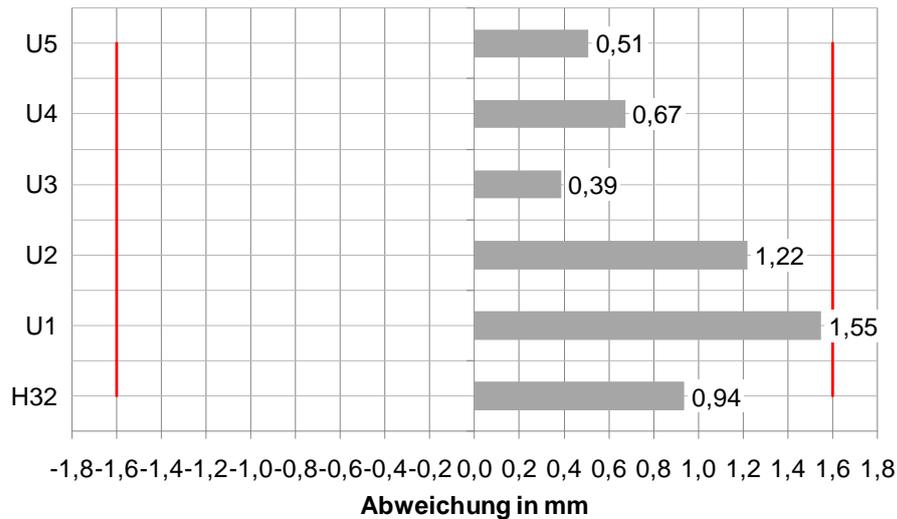
**Abbildung 8-23: Längenmaß L3 - Mittlere Abweichung**

Im Folgenden sind noch die Außenmaße der Gussteile dargestellt. Die Höhe der Gussteile aus Neusand liegt auf dem Sollwert (Abbildung 8-24). Im Vergleich dazu zeigt die Versuchsreihe U eine sinkende Tendenz bei einem leicht erhöhten Startwert.

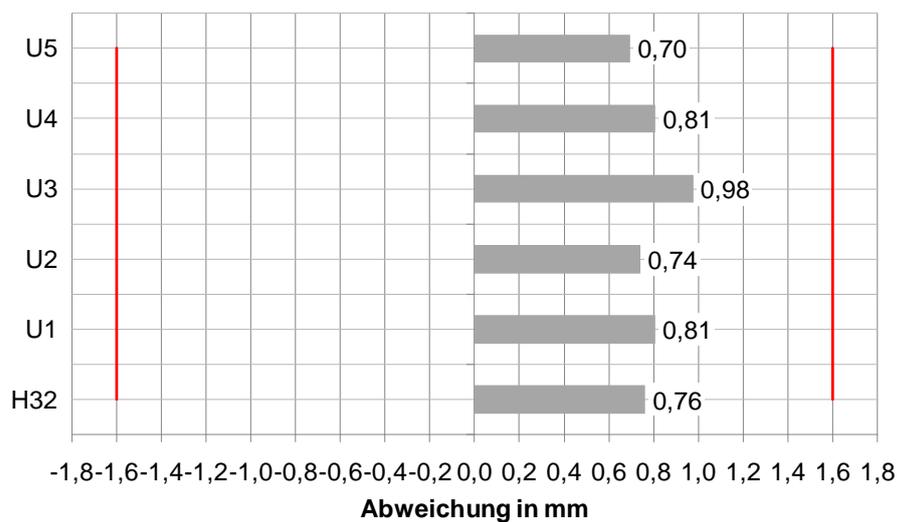


**Abbildung 8-24: Längenmaß L6 - Mittlere Abweichung der Gussteilhöhe**

Sowohl die Breite (Abbildung 8-25) als auch die Tiefe (Abbildung 8-26) der Gussteile weisen deutliche Abweichungen auf. Zu beobachten ist eine Verbesserung der Messwerte bei der Gussteilbreite im Verlauf von U1 bis U5. Die Gussteiltiefe bleibt relativ konstant und auf dem Niveau von Neusand. Die Messwerte liegen innerhalb der Toleranz.



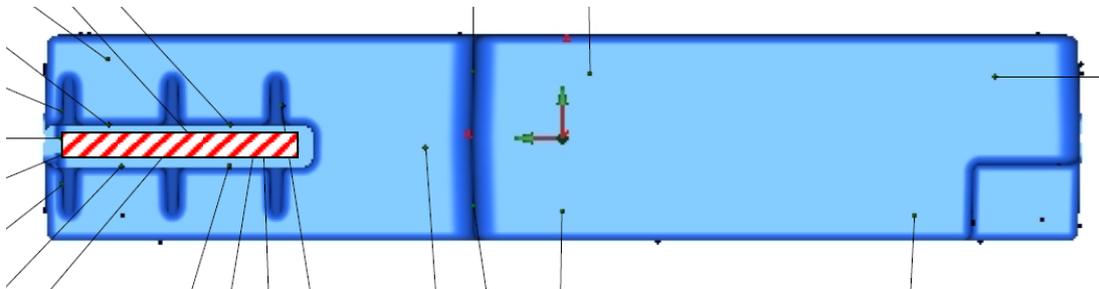
**Abbildung 8-25: Längenmaß L7 - Mittlere Abweichung der Gussteilbreite**



**Abbildung 8-26: Längenmaß L8 - Mittlere Abweichung der Gussteiltiefe**

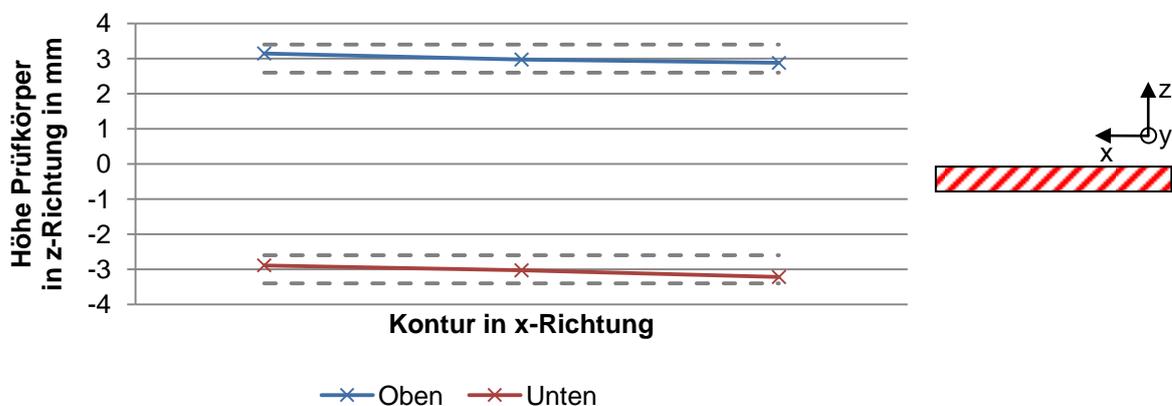
Zusammenfassend weisen alle gemessenen Versuchsteile eine positiv zu bewertende und zu Neusand vergleichbare Qualität auf. Das betrifft sowohl die einmal regenerierten Sande der Versuchsreihe E (hier nicht dargestellt) als auch die Gussteile der Versuchs M, U und soweit vorhanden des Versuchs S. Leichte Tendenzen zu Veränderungen bei erhöhter Anzahl an Umläufen ist erkennbar. Um mögliche Folgen ableiten zu können, müsste eine deutlich höhere Zahl an Gussteilen im Serienbetrieb hergestellt und ausgewertet werden.

Abschließend ist die Auswertung des Prüfkörpers zur Heißdeformation dargestellt, der vor dem Gießen in das Kernpaket eingelegt wurde (vgl. Abbildung 8-2, rechts). Der zu messende Bereich im Gussteil wurde durch eine spannende Bearbeitung freigelegt. In Abbildung 8-27 ist der Prüfkörper schematisch als rote Markierung dargestellt.



**Abbildung 8-27: Position des Prüfkörpers zur Heißdeformation im Gussteil**

Der Prüfkörper wird im Bauteil zweiseitig eingespannt und hinterlässt nach dem Gießen einen Hohlraum, dessen obere und untere Kontur auf ein Durchbiegen (Heißdeformation) während des Abgusses und der anschließenden Erstarrung schließen lässt. Abbildung 8-28 zeigt die mittleren Abweichungen der oberen und unteren Kontur nach der taktilen Vermessung aller Gussteile mit Neusand. Als gestrichelte Linien sind die Toleranzen von  $\pm 0,4\text{mm}$  dargestellt. Bis auf einen gebrochenen Prüfkörper wurde keine Toleranzüberschreitung festgestellt.



**Abbildung 8-28: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von Neusand**

Weder bei einmal regenerierten Sanden (Versuche E, nicht dargestellt) noch bei mehrmals regenerierten Kreislaufsanden konnte ein negativer Effekt festgestellt werden. In den nachfolgenden Abbildung 8-29 bis Abbildung 8-31 sind beispielhaft die mittleren Abweichungen der Versuche U1, U3 und U5 abgebildet. Die Werte bei U1 liegen nahe dem oberen Grenzwert. Die Situation stabilisiert sich bei ansteigender Umlaufzahl.

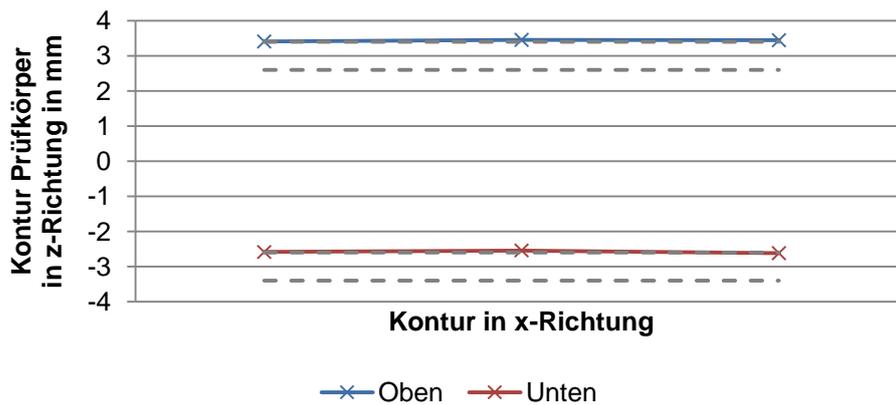


Abbildung 8-29: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von U1

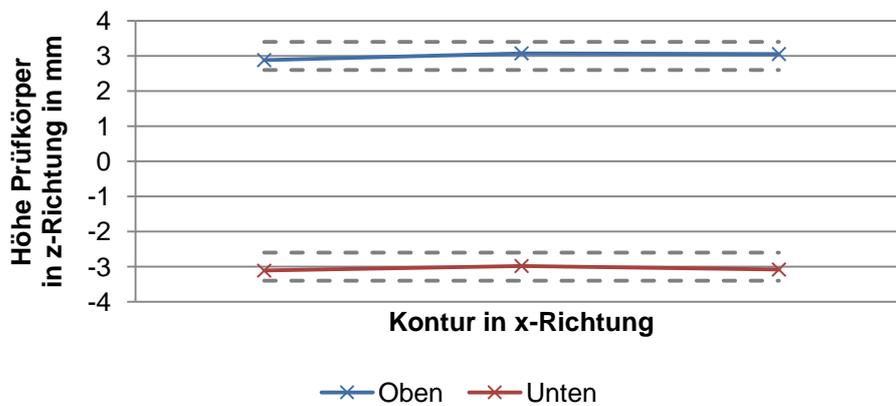


Abbildung 8-30: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von U3

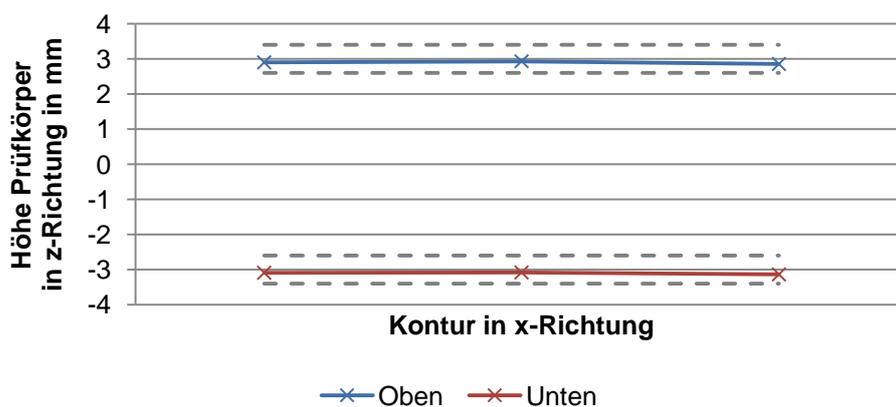


Abbildung 8-31: Auswertung der Prüfkörperkontur der Gussteile von U5

Bei der Entkernbarkeit waren im Vergleich zu Neusand keine auffälligen Abweichungen erkennbar. Gleiches gilt für die provozierten Gießfehler in den Gussteilbereichen mit einer starken Materialanhäufung.

## 8.7 Anlagenkonzept

Als Auslegungsbasis für eine Regenerationsanlage im Serieneinsatz dient der verwendete Pilotprozess. Dieser besteht aus einer mechanischen und einer thermischen Regenerationseinheit, die chargenweise betrieben wird. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wurde eine Regeneration mit der Prozessreihenfolge mechanisch-thermische als zielführend definiert. Die thermische Regeneration kann im Serienbetrieb auch als kontinuierlicher Prozess ausgeführt sein. Abbildung 8-32 zeigt schematisch den Ablauf des Regenerationsprozesses, der zur weiteren Auslegung und Kalkulation des Anlagenkonzeptes verwendet wurde.

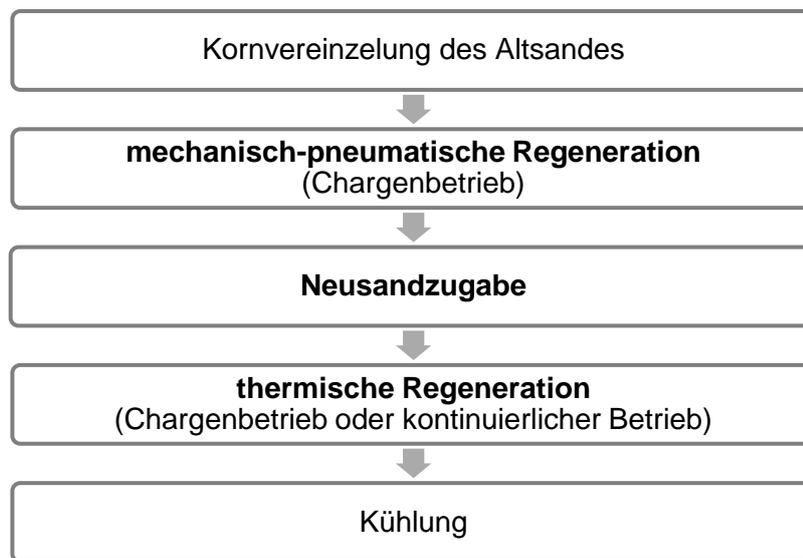


Abbildung 8-32: Ablauf der anorganischen Regeneration

## 8.8 Wirtschaftlichkeit

Für eine Prüfung der Wirtschaftlichkeit muss das grob beschriebene Anlagenkonzept zur Regeneration anorganisch gebundener Altsande detailliert ausgeplant werden. Diese Aufgabe übernahm die R. Scheuchl GmbH, Ortenburg. Ziel war die Bestimmung von Betriebsdaten, Investitions- und Betriebskosten für unterschiedliche Anlagengrößen und Leistungsstufen. Dies war Grundlage für eine einstufige Deckungsbeitragsrechnung und Erfolgsanalyse, die wiederum für eine Bewertung des Einsatzes der Regeneration sowohl in kleineren und mittelständischen Unternehmen, als auch in großen Gießereien herangezogen werden kann.

Eine allgemeine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Regenerationsanlagen ist aus folgenden Gründen ungenau und nicht aussagekräftig. Die Kosten für Neusand sind zum einen abhängig vom jährlichen Bedarf einer Gießerei und zum anderen von den Transportkosten. Die Transportkosten betragen ab einer Entfernung von ungefähr 200 km zur Lagerstätte etwa so viel, wie die Kosten für das Material. Weiterhin bestimmen sie neben den Deponiekosten zu einem großen Anteil die Entsorgungskosten für den Altsand bzw. den Feinstaub. Diese Abhängigkeiten erschweren eine pauschale Berechnung des Preises von Neusand  $k_{VN}$ . Ähnlich ist die Situation beim Einsatz einer Sandregeneration. Hier spielt der Energieeinsatz mit den Kosten für Gas und Strom eine große Rolle. Da diese von der Unternehmensgröße und -lage abhängig sind, ist eine allgemeine Betrachtung nicht darstellbar. Aus den genannten Gründen werden für eine wirtschaftliche Bewertung der Regeneration anorganisch gebundener Altsande zwei konkrete Unternehmensbeispiele betrachtet. Auf Basis der Unternehmensdaten sind zwei Anlagenkonfigurationen ausgeplant worden, die als Berechnungsgrundlage in Tabelle 8-6 dargestellt sind. Dabei ist zu beachten, dass die beiden Unternehmen unterschiedliche Sandklassen einsetzen, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Allerdings können die variablen Kosten der Regeneration gegenübergestellt werden, da sich das Regenerieren bei unterschiedlichen Sandklassen nicht verändert und die Kosten größtenteils über den Durchsatz und die Betriebsart beeinflusst werden.

Anlage	Leistung		Betriebsart	Stromverbrauch [kW]	Gasverbrauch [m <sup>3</sup> /h]	Investitionskosten * [EUR]
1	0,3 t/h	2,4 t/d	Charge, 1-schichtig	36	20	410.000 EUR
2	6 t/h	144 t/d	Charge, kontinuierlich	450	220	2.500.000 EUR

\* Investitionskosten überschlägig kalkuliert.

**Tabelle 8-6: Leistungsdaten und Investitionskosten unterschiedlicher Anlagenkonzepte**

Tabelle 8-6 stellt zwei ausgewählte Konzepte in der Übersicht dar. Anlage 1 beschreibt eine Konfiguration, die für kleinere Sandvolumina bis 2,4 Tonnen pro Tag geeignet ist und in einem Chargenbetrieb betrieben wird. Diese Konfiguration ist personalintensiver und könnte

entsprechend der gewünschten Leistung auch im Mehrschichtbetrieb eingesetzt werden. In der vorliegenden Berechnung wird nur der Einschichtbetrieb betrachtet. In Anlage 2 findet die Regeneration in einem kontinuierlichen und vollautomatisierten Prozess statt. Der Personaleinsatz sinkt und beschränkt sich größtenteils auf Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten. Diese Konfiguration ist für einen hohen Durchsatz von bis zu 144 Tonnen pro Tag geeignet. Alle Investitionskosten sind überschlägig kalkuliert.

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung stehen zwei Punkte im Vordergrund. Erstens muss geprüft werden, ob durch den Einsatz von Regenerat ein positiver Deckungsbeitrag vorliegt. Zweitens wird der Zeitraum bestimmt, den die Regenerationsanlage betrieben werden muss, bis die Einsparungen die laufenden Betriebskosten und Investitionskosten der Regeneration abdecken (Break-Even-Point) und die Gewinnzone erreicht wird. In der Kostenrechnung wird dazu der Deckungsbeitrag angesetzt. Normalerweise wird er als Differenz aus dem Netto-Verkaufspreis und den variablen Selbstkosten eines Produktes definiert. Grundlage dieser Berechnung ist die getrennte Betrachtung von variablen Kosten und Fixkosten.

$$d = p - k_V$$

d: Deckungsbeitrag/Stück

p: Netto-Verkaufspreis/Stück

$k_V$ : variable Kosten/Stück

Im vorliegenden Fall wird der Deckungsbeitrag als Differenz der variablen Kosten von Neusand  $k_{VN}$  und der variablen Kosten der Regeneratsand  $k_{VR}$  definiert. Die variablen Kosten von Neusand werden als Erlös angesetzt und beschreiben den Wert einer Tonne Sand für den Betrieb, der demnach auch für eine Tonne Regenerat gültig ist.

$$d = k_{VN} - k_{VR}$$

d: Deckungsbeitrag/Tonne

$k_{VN}$ : variable Kosten für Neusand/Tonne

$k_{VR}$ : variable Kosten für Regenerat/Tonne

Bei einem positiven Deckungsbeitrag liegen die variablen Kosten für eine Tonne Regeneratsand unter dem Kaufpreis für eine Tonne Neusand inkl. Transport. Multipliziert mit der Tonnage eines ganzen Jahres erhält man den Gesamtdeckungsbeitrag pro Jahr. Für die Bestimmung des Betriebsergebnisses werden vom Gesamtdeckungsbeitrag die Fixkosten  $K_{FR}$  der Regeneration abgezogen. Bei einem positiven Betriebsergebnis erzielt ein Unternehmen Gewinn. Auf den betrachteten Fall übertragen beschreibt ein positives Betriebsergebnis die Einsparung für das Unternehmen, die durch den Wechsel von Neusand auf regenerierten Sand erreicht wird.

$$D = d * x = (k_{VN} - k_{VR}) * x$$

$$G = D - K_F = (k_{VN} - k_{VR}) * x - K_F$$

$K_F$ : Gesamtfixkosten

D: Gesamtdeckungsbeitrag für Regenerat im betrachteten Zeitraum (hier: pro Jahr)

x: Tonnen Regenerat /Jahr

G: Gewinn (Betriebsergebnis)

Im Anschluss an die Berechnung des Deckungsbeitrages kann mit Hilfe der Break Even-Analyse der Zeitraum bestimmt werden, in dem das Unternehmen von der Verlust- in die Gewinnzone gelangt (Break-Even-Point). Dieser Punkt ist erreicht, wenn der Deckungsbeitrag den Gesamtfixkosten entspricht. Die unten stehende Gleichung wird gleich Null gesetzt. Weiterhin werden sowohl der Umsatz als auch die Kosten durch die entsprechenden Gleichungen ersetzt und nach der Menge aufgelöst. Die Einheit Tonnen entfällt, wodurch sich als Ergebnis die Anzahl der Jahre ergibt, die notwendig sind, durch den Deckungsbeitrag die Fixkosten abzudecken

$$G = D - K_F = (k_{VN} - k_{VR}) * x_A - K_F = 0$$

$$x_A = K_F / (k_{VN} - k_{VR})$$

$$y = x_A / x$$

K: gesamte Kosten

U: Umsatz

$x_A$ : kritische Absatzmenge (Tonnen)

y: Anzahl der Jahre bis Break-Even-Point (mit konstantem Gesamtdeckungsbeitrag D)

In Tabelle 8-7 sind die berechneten Einzelwerte für die beiden Anlagenkonfigurationen aufgeführt. Der Preis von Neusand  $k_{VR}$  ist aufgrund eines geringen Sandbedarfs von 552 Tonnen pro Jahr und einer feineren Sandqualität höher. Die variablen Kosten  $k_{VR}$  setzen sich aus den Energie-, Transport-, Entsorgungs- und Personalkosten pro Tonne Regeneratsand zusammen. Zusätzlich wird ein Neusandanteil von 10% angesetzt. Im Rahmen der Deckungsbeitragsrechnung erfolgt eine Kostentrennung. Für den Einsatz der Regeneration sind als Fixkosten nur die Anlagenkosten aufgeführt. Weitere Punkte, wie z.B. die bereitgestellte Anlagenfläche oder eine steuerliche Abschreibung sind in der Rechnung nicht enthalten. Weiterhin werden konstante Randbedingungen vorausgesetzt, wodurch beispielsweise steigende Entsorgungskosten für die Deponierung nicht berücksichtigt werden. Tabelle 8-7 zeigt die Ergebnisse der Berechnung des Deckungsbeitrages und des Break-Even-Points in der Übersicht.

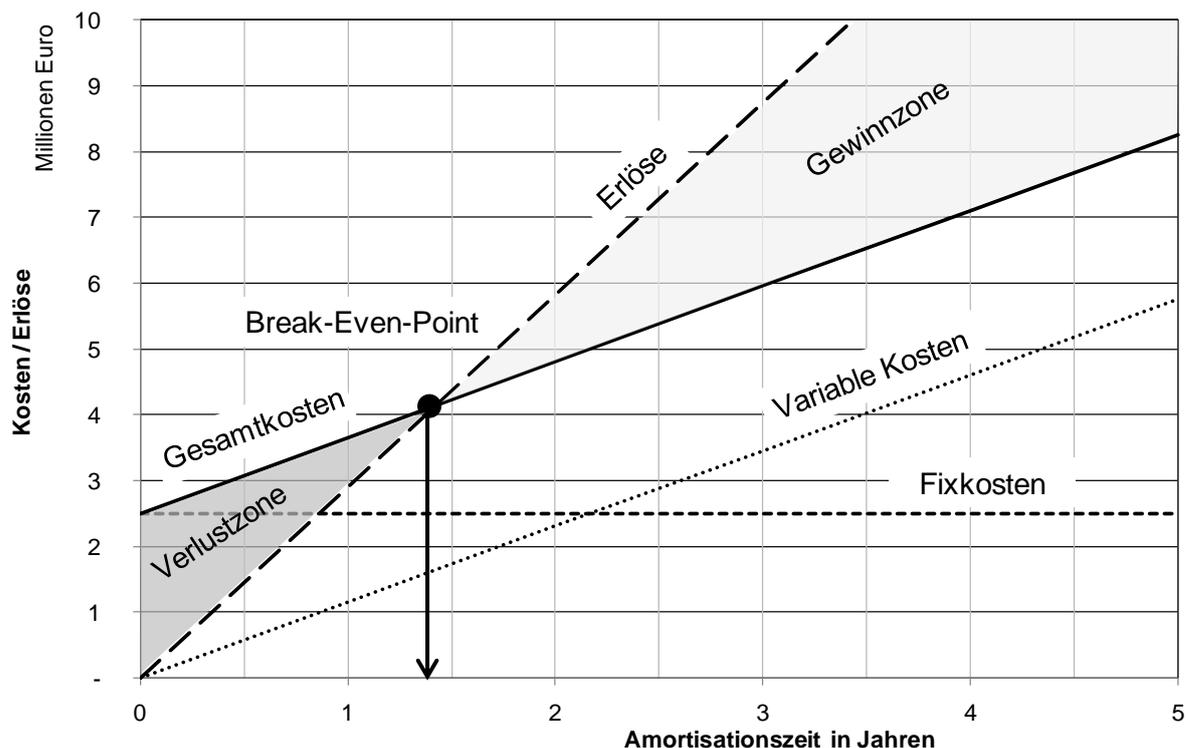
	$k_{VN}$ [€/t]	$k_{VR}$ [€/t]	d [€/t]	x [t/Jahr]	$K_F$ [€]	D [€/Jahr]	Break-Even-Point [Jahre]
1	93,37	104,34	-10,97	552	410.000	-6.055	-
2	70,40	27,84	42,56	41.328	2.500.000	1.758.850	1,4

**Tabelle 8-7: Vergleich der Kennzahlen - Anlagenkonfiguration 1 und 2**

Bei der Anlagenkonfiguration 1, die einschichtig mit einem Durchsatz von 300kg/t betrieben wird, liegen hohe variable Kosten für eine Tonne Regenerat vor. Die Energiekosten und die erhöhten Kosten für Personal im Chargenbetrieb, die nur auf eine geringe Menge an Regeneratsand umgelegt werden können, sind die Hauptgründe dafür. Es zeigt sich deutlich, dass die variablen Kosten  $k_{VR}$  über den Kosten  $k_{VN}$  liegen, wodurch ein negativer Deckungsbeitrag entsteht. Das bedeutet, dass die Kosten für regenerierten Sand in diesem Betrieb mit den gegebenen Randbedingungen und dem vorliegenden Anlagenkonzept um

ca. 6.000 EUR pro Jahr höher liegen, als der Bezug von Neusand. Zusätzlich entstehen Ausgaben zur Deckung der Anlagen-Fixkosten. Eine Regeneration anorganischer Altsande ist hier nur aus ökologischer Sicht zu begründen, wirtschaftlich jedoch nicht umsetzbar.

Im zweiten Fall, einer kontinuierlich betriebenen Anlagenkonfiguration mit einem Durchsatz von sechs Tonnen pro Stunde, ist ein positiver Deckungsbeitrag von ca. 40 EUR pro Tonne festzustellen. Da der Energieverbrauch und die Fixkosten nicht linear mit dem Anlagendurchsatz ansteigen, fallen bezogen auf die deutlich höhere Sandmenge geringere Kosten an. Die variablen Kosten  $k_{VR}$  einer Tonne Regeneratsand betragen rund 50 % der variablen Kosten  $k_{VN}$  von Neusand. Diese Differenz setzt sich aus Einsparungen bei den Transport- und Entsorgungskosten zusammen. Die Einsparungen sind höher als der notwendige Energieeinsatz zur Regeneration. Werden die Materialkosten für eine erste Befüllung des Sandkreislaufes nicht in die Berechnung mit einbezogen, wird bei einem Jahresdurchsatz von knapp 42.000 Tonnen ein Gesamtdeckungsbeitrag von 1.700.000 Euro pro Jahr erreicht. Abbildung 8-33 stellt die Kenngrößen und den Break-Even-Point, der nach 1,4 Jahren erreicht wird, in graphischer Form dar.



**Abbildung 8-33: Break-Even-Analyse für Anlagenkonfiguration 2**

Somit ist ein wirtschaftlicher Einsatz des vorliegenden Konzeptes für große Unternehmen möglich. Weitere, hier nicht aufgeführte Kalkulationen haben gezeigt, dass auch kleinere Anlagenkonfigurationen mit einer Leistung von beispielsweise einer Tonne pro Stunde und einem jährlichen Durchsatz von rund 7.000 Tonnen wirtschaftlich betrieben werden können. Entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg ist ein kontinuierlicher, vollautomatisierter Betrieb mit einem geringen Personal- und Logistikaufwand.

## 9 Fazit

Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden in Gießereien anorganische Bindersysteme für Sandkerne nur im offenen Materialkreislauf eingesetzt, da kein Regenerationsverfahren bekannt ist, das eine ausreichende Regeneratqualität für die Sandkernfertigung erzeugen kann. Im vorliegendem Forschungsprojekt wurde der Einsatz eines kombinierten Regenerationsverfahrens für anorganisch gebundene Kernsande untersucht, um die bislang notwendige Entsorgung auf Deponien oder die alternative Weiterverwendung in Zementwerken zu umgehen. Ziel des Projektes war eine qualitative und wirtschaftliche Bewertung des Pilotverfahrens für den Einsatz in der Kleinserienfertigung eines mittelständischen Unternehmens.

Das für die Untersuchung eingesetzte und modular aufgebaute Pilotverfahren bestand aus einer mechanischen und einer thermischen Regeneration. Dabei konnten die Prozesse einzeln oder kombiniert in beliebiger Reihenfolge chargenweise betrieben werden. Für die qualitative Bewertung wurde eine spezielle Versuchsgeometrie entworfen und in einem Kernfertigungswerkzeug umgesetzt. Die Versuchsgeometrie ermöglichte eine Prüfung der Verarbeitungseigenschaften der regenerierten Versuchssande im Kernfertigungsprozess. Die erzeugten Sandformteile konnten zu Gießformen zusammengesetzt werden, um weiter den Einfluss der Sandqualität auf die nachfolgenden Prozessschritte Gießen und Entkernen ermitteln zu können. Abschließend konnten die Gussteile auf ihre Maßhaltigkeit geprüft werden.

Aufgrund der Begebenheit, dass anorganische Altsande derzeit nicht regeneriert werden, stand zu Projektbeginn kein geeignetes Prüfverfahren zur Bestimmung der für den Kernfertigungsprozess relevanten chemischen Eigenschaften zur Verfügung. Im Gegensatz zur Regeneration von Altsanden mit organischen Binderresten, können anorganische Restbestandteile nicht vollständig von der Sandoberfläche entfernt werden. Um den Erfolg der einzelnen Regenerationsversuche bewerten zu können, wurde ein neues Prüfverfahren entwickelt. Entwicklungsziel war die Bestimmung der Binderreste des Wasserglases im regenerierten Formgrundstoff, die bei der Wiederverwendung in Lösung gehen und die ursprünglichen Eigenschaften des Bindersystems negativ beeinflussen. Durch die abschließende Definition eines Prozessfensters für die Regenerationsparameter und die Festlegung von Grenzwerten bei der neu eingeführten chemischen Prüfung, für die in diesem ersten Entwicklungsschritt die Prüfwerte von Neusandproben verwendet wurden, wurde eine gute Bewertungsgrundlage geschaffen. Ergänzt wurde die chemische Prüfung durch bekannte Prüfverfahren zur Bewertung der fertigungstechnischen Eigenschaften. Hierzu zählen beispielweise die Biegefestigkeit, Heißdeformation oder auch Gasdurchlässigkeit.

Die durchgeführten Regenerationsversuche gliederten sich in zwei Bereiche. Zum einen wurden Versuche mit einer einmaligen Regeneration bei unterschiedlichen Prozessparametern und zum anderen Versuche mit einer mehrfachen Regeneration im geschlossenen Materialkreislauf bei unterschiedlicher Prozessreihenfolge durchgeführt.

Mit den Versuchen zur einmaligen Regeneration bei unterschiedlichen Parametern konnte das definierte Prozessfenster grundlegend bestätigt werden. Die chemische Prüfung, die den löslichen Restbinderanteil im Regenerat beschreibt, hat gezeigt, dass auch niedrigere Prozesstemperaturen möglich sind, das Erreichen einer mit Neusand vergleichbaren Qualität aber nicht garantiert ist. Aus diesem Grund sollten die Prozesstemperaturen und -zeiten des festgelegten Prozessfensters gewählt werden. Die Auswertung von Kerngewicht und Gasdurchlässigkeit bestätigen diesen Sachverhalt mit dem besten Prüfergebnis bei der Parameterkombination 620°C und 45 Minuten bei einer mechanisch-thermischen Regeneration, die einen Betriebspunkt innerhalb des Prozessfensters darstellt. Die Prüfergebnisse der Festigkeiten und der Heißdeformation zeigen tendenziell bessere Ergebnisse bei längeren Prozesszeiten und höheren Temperaturen.

Durch die Kreislaufversuche konnte der Einfluss der Prozessreihenfolge und der Anzahl an Regenerationszyklen auf die Qualität des Formgrundstoffs untersucht werden. Mit zunehmender Zahl an Regenerationszyklen wurde ein Anstieg des löslichen Restbinderanteils festgestellt. Dieser Anteil fiel bei den einzelnen Versuchsreihen unterschiedlich aus. In Kombination mit den fertigungstechnischen Prüfungen hat sich die mechanisch-thermische Regeneration mit einer Neusandzugabe zwischen den beiden Prozessschritten durch besonders gute Verarbeitungseigenschaften ausgezeichnet. Hier wurde die geringste Überschreitung festgestellt und es konnten bis zum fünften Umlauf zu Neusand vergleichbare Eigenschaften im Kernfertigungsprozess erzielt werden. Dabei spielen die veränderte Neusandzugabe und die verlängerte Prozesszeit in Kombination mit der hohen Prozesstemperatur eine entscheidende Rolle. Dieses Verfahren eignet sich für einen Einsatz in der Serienfertigung.

Grundsätzlich wurde der Einsatz der neuen chemischen Prüfung als richtiger Weg bestätigt. In weiteren Fertigungsversuchen muss die Gültigkeit der sehr eng gesetzten und auf Neusand basierenden Grenzwerte weiter verifiziert und unter Umständen angepasst werden. Weiterhin wird deutlich, dass eine Prüfung zusätzlicher fertigungstechnischer Kenngrößen, wie z.B. der Gasdurchlässigkeit, zu empfehlen ist.

Die Auswertung der Maßhaltigkeit der Gussteile aus regeneriertem Sand ist durchweg positiv und in der Qualität mit Neusand-Gussteilen vergleichbar. Das betrifft sowohl die einmal regenerierten Sande als auch die Kreislaufsande. Leichte Tendenzen zu Veränderungen bei erhöhter Zahl an Regenerationszyklen waren erkennbar. Um mögliche Folgen ableiten zu können, müsste eine deutlich höhere Zahl an Gussteilen im Serienbetrieb hergestellt und ausgewertet werden.

Für die wirtschaftliche Betrachtung wurde das ausgewählte mechanisch-thermische Regenerationsverfahren in mehreren Varianten im Detail ausgeplant und die Investitions- und Betriebskosten ermittelt. Durch eine Deckungsbeitragsrechnung und eine Erfolgsanalyse wurden zwei Varianten bewertet. Variante 1 ist für den Einsatz in einem mittelständischen Unternehmen ausgelegt. Die Anlagenkonfiguration, die einschichtig mit einem Durchsatz von 300kg/t betrieben wird, liegen hohe variable Kosten für eine Tonne Regenerat vor. Die Energiekosten und die erhöhten Kosten für Personal im Chargenbetrieb, die nur auf eine

geringe Menge an Regeneratsand umgelegt werden können, sind die Hauptgründe dafür. Es zeigt sich deutlich, dass die Kosten für Regenerat über den Kosten für Neusand liegen, wodurch ein negativer Deckungsbeitrag entsteht. Eine Regeneration anorganischer Altsande ist hier nur aus ökologischer Sicht zu begründen, wirtschaftlich jedoch nicht umsetzbar.

Die zweite Variante ist für einen Einsatz in großen Unternehmen kalkuliert. Die kontinuierlich betriebene Anlagenkonfiguration mit einem Durchsatz von sechs Tonnen pro Stunde, ist ein positiver Deckungsbeitrag festzustellen. Da der Energieverbrauch und die Fixkosten nicht linear mit dem Anlagendurchsatz ansteigen, fallen bezogen auf die deutlich höhere Sandmenge geringere Kosten an. Die Kosten einer Tonne Regeneratsand betragen rund 50 % der Kosten von Neusand. Diese Differenz setzt sich aus Einsparungen bei den Transport- und Entsorgungskosten zusammen. Die Einsparungen sind höher als der notwendige Energieeinsatz zur Regeneration.

Somit ist ein wirtschaftlicher Einsatz der zweiten Variante für große Unternehmen möglich. Weitere, hier nicht aufgeführte Kalkulationen haben gezeigt, dass auch kleinere Anlagenkonfigurationen mit einer Leistung von beispielsweise einer Tonne pro Stunde und einem jährlichen Durchsatz von rund 7.000 Tonnen wirtschaftlich betrieben werden können. Entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg ist ein kontinuierlicher, vollautomatisierter Betrieb mit einem geringen Personal- und Logistikaufwand. Diese Betriebsart ist in kleineren Unternehmen nicht gegeben, wodurch mit den bestehenden Randbedingungen ein wirtschaftlicher Betrieb einer anorganischen Regeneration derzeit nicht möglich ist.

## 10 Literaturverzeichnis

- [DD07] Danko, J. und Danko, R.: *Effektive Regenerierungstechnologien*. Giesserei-Praxis (2007) Nr. 5.
- [Eßb10] Eßbauer, S.: *World's first emission-free foundry, BMW Group's light-alloy foundry goes over to new eco-friendly sand core production*. Casting Plant & Technologie, 2/2010.
- [EC05] European Commission, Joint Research Centre: *Integrated Pollution Prevention and Control, Best available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry*. May 2005, <http://eippcb.jrc.es/reference/>.
- [Koo07] Kooyers, T.: *Das anorganische Bindersystem Cast Clean*. Giesserei-Praxis (2007) Nr. 5.
- [Mül08] Müller, J.: *Advantages of inorganic binder systems*. Casting Plant & Technologies 2/2008.
- [MS98] McIntyre, S. und Strobl, S.: *Adapting Hot Distortion Curves to Process Control*. Foundry Management & Technology, March 1998
- [Pol06] Polzin, H.: *Emissionsreduzierte Binder in der Kern- und Formherstellung*. Giesserei-Praxis (2006) Nr. 1-2.
- [PT04] Polzin, H. und Tilch, W.: *Neue Erkenntnisse zum Umlaufverhalten regenerierter Wasserglasformstoffe*. Giesserei-Praxis (2004) Nr. 11.
- [PTK06] Polzin, H., Tilch, W. und Kooyers, T.: *Fortschritte in der Entwicklung des Wasserglasformverfahrens*. Giesserei-Praxis (2006) Nr. 6.
- [Spu81] Spur, G. und Stöferle, Th.: *Handbuch der Fertigungstechnik, Band 1: Urformen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1981.
- [TP03] Tilch, W. und Polzin, H.: *GIFA 2003 - Formstoffe, Formverfahren und Maschinen zur Form- und Kernherstellung, Formstoffaufbereitung und Regenerierung*. Giesserei-Praxis (2003) Nr. 10.
- [WWW08] Weissenbek, E., Willimayer, J. und Wolf, J.: *BMW-Leichtmetallgießerei setzt auf anorganisch gebundene Kerne*. Giesserei 95 (2008) Nr. 6.