

Beitrag zur Gefügebeeinflussung erstarrender Metallschmelzen durch Vibration

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Claudia Dommaschk

geboren am 14. April 1965

in Dresden

Gutachter: Univ.- Prof. em. Dr.- Ing. habil. Roland Mai, Freiberg

Prof. Dr.- Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg

Prof. Dr.- Ing. Gudrun Lange, Dresden

Tag der Verleihung: 07. Februar 2003

Inhaltsverzeichnis

1.	Problemsituation	6
1.1.	Erstarrung und Kristallisation	7
1.1.1.	Gefügebildung bei der Erstarrung eines Gussblockes	11
1.2.	Gefüge und Eigenschaften	12
1.3.	Einfluss der Erstarrungsstruktur auf die gießtechnologischen Eigenschaften	14
2.	Stand der Technik zur Schmelzebehandlung	18
2.1.	Chemisch-metallurgische Schmelzebehandlung	18
2.1.1.	Kornfeinung und Impfen	18
2.1.2.	Veredlung	20
2.2.	Mechanische Schmelzebehandlung	21
2.2.1.	Mechanische Manipulation der freien Oberfläche	21
2.2.2.	Elektromagnetisches Rühren, Magnetofluidodynamik	23
2.2.3.	Gießen bei niedrigen Temperaturen	23
2.2.4.	Ultraschallbehandlung	24
2.2.5.	Vibration	25
2.2.6.	Grundlagen zur Kornfeinung durch Vibration	27
2.2.7.	Zusammenfassende Aussagen zu physikalischen Schmelzebehandlungsverfahren	29
2.3.	Aufgabenstellung zur Erweiterung des Kenntnisstandes	37
3.	Grundlagenuntersuchungen zum Energieeintrag in erstarrende Metallschmelzen durch Vibration	39
3.1.	Vibrationstische zur Schmelzebehandlung	39
3.1.1.	Vibratoren zur Durchführung der experimentellen Arbeiten	39
3.1.2.	Aufbau der verwendeten Vibrationstische	40
3.1.2.1.	Labor-Vibrationstisch	40
3.1.2.2.	Vibrationstisch zur Durchführung kleintechnischer Versuche	42
3.1.2.3.	Vibrationstisch für die Vorbereitung der industriellen Umsetzung	43
3.1.3.	Messtechnik zur Ermittlung der Vibrationsparameter	44

3.2.	Einfluss der Vibrationsparameter auf den Kristallisationsprozess	46
3.2.1.	Versuche mit einer Modellflüssigkeit	46
3.2.2.	Einfluss der Vibrationsparameter auf den Erstarrungsablauf von Gusswerkstoffen	50
3.3.	Einfluss der Vibration auf die Gefügeausbildung und Eigenschaften einer Rotgusslegierung	62
3.3.1.	Werkstoffcharakteristik	62
3.3.2.	Einfluss der Vibration auf die Gefügeausbildung	67
3.3.2.1.	Gefügeausbildung bei der Erstarrung im Schmelztiegel	68
3.3.2.2.	Gefügeausbildung am Barrenmodell	71
3.3.2.3.	Wanddickeneinfluss am Stufenkeil	73
3.3.3.	Einfluss der Vibration auf die Ausbildung der mechanischen Eigenschaften	78
3.3.3.1.	Mechanische Eigenschaften am Barren	78
3.3.3.2.	Mechanische Eigenschaften und Wanddickeneinfluss an Rundstäben	81
3.4.	Schlussfolgerungen aus den grundlegenden Untersuchungen zum Energieeintrag in erstarrende Metallschmelzen durch Vibration	85
4.	Die Anwendung der Vibration bei der Herstellung gegossener Bauteile	89
4.1.	Die Herstellung von Bauteilen aus der Rotgusslegierung Rg 5	89
4.1.1.	Armaturenteil	90
4.1.2.	Kegel	91
4.1.3.	Schleifring	93
4.2.	Die Herstellung von Hydraulikteilen aus Gusseisen mit Lamellengrafit	95
4.3.	Die Herstellung von Zinkanoden	99
5.	Erarbeitung eines Projektes zur Anwendung der Vibration bei der Herstellung von Gussteilen	102
5.1.	Erläuterung des Vibrationsprozesses anhand eines schwingungstechnischen Modells	103
5.2.	Konstruktive Auslegung der Vibratoren	107
5.3.	Erarbeitung und Bewertung von Varianten zur technischen Realisierung einer kombinierten Schmelzebehandlungseinrichtung	110

5.3.1.	Realisierungsvorschläge für das Kippgussverfahren	110
5.3.2.	Konzept zur technischen Umsetzung der Schmelzebehandlung durch Vibrationseintrag	114
5.3.3.	Kombinierte Schmelzebehandlungsanlage	116
6.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	120
	Tabellenverzeichnis	124
	Abbildungsverzeichnis	125
	Quellenverzeichnis	128

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen denjenigen danken, die mich bei dieser Arbeit gefördert und unterstützt haben.

Den Herren Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Roland Mai und Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast danke ich für die Betreuung sowie ihre wertvollen Hinweise und Anregungen.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Dr.-Ing. Jürgen Hübler für viele fachliche Diskussionen und Ideen, mit denen er mich immer wieder motivieren konnte.

Bei den Geschäftsführern und Mitarbeitern des Sächsischen Metallwerkes Freiberg, vor allem bei Herrn Wallmann, möchte ich mich für die Zusammenarbeit sowie für die großzügig gewährte Unterstützung bei den Praxisversuchen bedanken.

Ich danke Frau Hannelore Hoffmann für die Probenpräparationen sowie den Mitarbeitern des Versuchsfeldes des Gießerei-Institutes für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Für die Hilfe bei Rechnerproblemen aller Art und für Korrekturen bin ich Herrn Dirk Renker sehr dankbar.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Mann und meinen Kindern sowie meinen Eltern, auf deren Verständnis und Hilfe ich jederzeit bauen konnte.

1. Problemsituation

Die Forderungen der Gussteilabnehmer hinsichtlich ausreichend hoher und gleichbleibender Qualität der Gussteile steigen ständig. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, muss die Gießereiindustrie diesen Anforderungen gerecht werden und nach neuen Wegen suchen, qualitätsgerechte Gussteile zu produzieren.

In Abhängigkeit von der Art der Legierung und der daraus resultierenden Erstarrungsmorphologie, vom Keimhaushalt und von den Wärmeentzugsbedingungen entstehen unterschiedliche Gussgefüge. Die Art des Gefüges aber ist entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes und in der Folge für die technologischen Gebrauchseigenschaften der gegossenen Bauteile.

Die Wärmeentzugsbedingungen sind wanddickenabhängig und führen zu Inhomogenitäten von Gefüge und Eigenschaften innerhalb des Gussteils. Diese Inhomogenitäten wiederum sind von der Anzahl der in der Schmelze vorhandenen oder verfügbaren Keime, also vom Keimhaushalt abhängig.

Einige Gusslegierungen erstarren dendritisch und neigen dadurch stark zur Ausbildung von Mikrolunkern. Durch hohen Speiseraufwand und speisungstechnische Maßnahmen ist es möglich, deren Ausbildung einzuschränken, aber nicht zu vermeiden. Durch eine gezielte Einflussnahme auf den Erstarrungsablauf kann es gelingen, die Mikrolunkerneigung zu senken und bei vertretbarem speisungstechnischen Aufwand ein ausreichend dichtes Gefüge zu erzielen.

Bei Gusseisenlegierungen hat die Einflussnahme auf den Erstarrungsablauf in Hinsicht auf die Art der Kohlenstoffausbildung (Grafit oder Zementit), die Größe und Form der Grafitausbildung sowie die Größe der eutektischen Zellen eine besondere Bedeutung. Gusseisen mit Lamellengrafit unterliegt einer ausgeprägten Wanddickenabhängigkeit. Bei ausgewählten dickwandigen Bauteilen (z. B. Hydraulikguss) führt die Ausbildung von großen Grafitlamellen in der Kernzone der Gussteile zu spezifischen Problemen. Bei der mechanischen Bearbeitung solcher Teile können große Lamellen herausgelöst und in der Folge zu undichten Stellen werden. Der Ein-

griff in den Erstarrungsablauf zur Feinung der Lamellen und des Grundgefüges ist bei dieser Sortimentsgruppe ein interessanter Aspekt.

Ein praxisübliches Verfahren der Schmelzebehandlung ist die Verbesserung des Keimhaushaltes der Schmelze durch einen Substanzeintrag (Kornfeinungsbehandlung, Impfen). Diese Methode ist jedoch nicht uneingeschränkt anwendbar und führt nicht in jedem Fall zum gewünschten Erfolg.

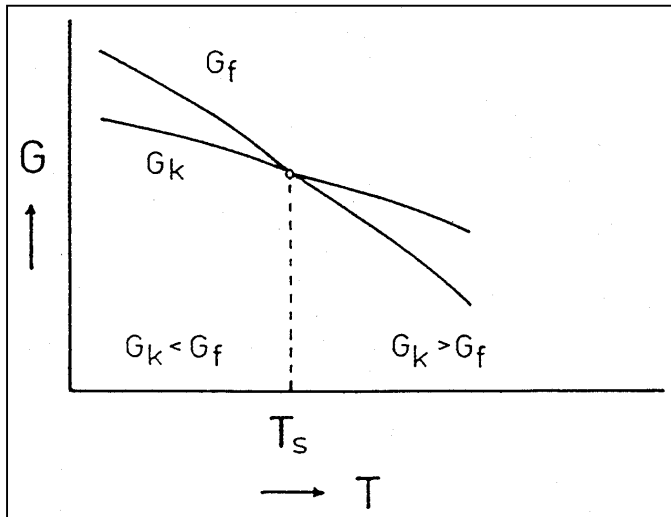
Eine Alternative zur chemisch-metallurgischen Schmelzebehandlung stellen die mechanischen Schmelzebehandlungsmethoden dar. Bei diesen Verfahren wird der Erstarrungsablauf durch einen Energieeintrag in die Schmelze modifiziert.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, in welchem Maße durch eine Vibrationsbehandlung der erstarrenden Schmelze eine effektive Einflussnahme auf den Erstarrungsablauf und eine Verbesserung der Qualität von ausgewählten Gussteilen möglich ist.

1.1. Erstarrung und Kristallisation

Die technische Nutzung metallischer Werkstoffe erfolgt im allgemeinen im festen Zustand. Zu einem bestimmten Zeitpunkt ihrer Gewinnung und Verarbeitung liegen sie meist als Schmelzen vor, sodass die Bildung des festen Aggregatzustandes aus einer Schmelze technisch sehr bedeutsam ist.

Bei der Liquidustemperatur befinden sich die feste und flüssige Phase im thermodynamischen Gleichgewicht, das heißt sie existieren nebeneinander. Zustände außerhalb des Gleichgewichtes sind metastabil, also auch die unterkühlte Schmelze. Im Bild 1 ist schematisch der Verlauf der freien Enthalpie in Abhängigkeit von der Temperatur in der Umgebung des Schmelzpunktes T_s dargestellt.



T_s = Schmelztemperatur
 G_k = freie Enthalpie des
 kristallinen Zustandes
 G_f = freie Enthalpie des
 flüssigen Zustandes

Bild 1: Verlauf der freien Enthalpien

Die Kristallisation aus dem flüssigen Zustand (Erstarrung) geht von Keimen aus, an die sich Atome, Ionen oder Moleküle der sie umgebenden flüssigen Ausgangsphase anlagern. Der Ablauf der Kristallisation ist durch zwei Teilvorgänge gekennzeichnet - die Keimbildung und das Kristallwachstum.

Erfolgt die Keimbildung in einer Schmelze, in der keine schon vorgebildeten Keime aus arteigenem Material enthalten sind, dann spricht man von homogener Keimbildung. Heterogene Keimbildung dagegen ist die Bildung von wachstumsfähigen Keimen an in der Schmelze vorhandenen Fremdkeimen.

Stabile und wachstumsfähige Keime entstehen erst dann, wenn die thermodynamische Gleichgewichtstemperatur um einen gewissen Betrag ΔT (Unterkühlung) unterschritten wird. Die Differenz $\Delta G = G_f - G_k$ für die freie Enthalpie stellt die treibende Kraft für die Kristallisation dar. Bei der Abkühlung sinkt die Temperatur der Schmelze vorerst unter die Schmelztemperatur, ohne dass die Kristallisation beginnt. Erst, nachdem eine bestimmte Unterkühlung erreicht wird, startet der Kristallisationsprozess. Die dabei freiwerdende latente Wärme (entspricht der Schmelzenthalpie) heizt die Schmelze erneut auf, ohne die Schmelztemperatur wieder zu erreichen.

Bei Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur T_s ist ein Keim nur stabil, wenn er eine kritische Größe überschreitet. Geht man von einem kugelförmigen Keim mit Radius r aus, so sind für die Keimbildung im wesentlichen zwei Energiebeiträge ver-

antwortlich. Ein negativer Beitrag ergibt sich aus der freien Bildungsenthalpie ΔG der neuen Phase gegenüber der alten. Dagegen entsteht ein positiver Beitrag durch den Energieaufwand für die Bildung der Oberfläche des Keimes. Ein Keim wird dann als thermodynamisch stabil angesehen, wenn die freie Bildungsenthalpie des Keimes beim Keimwachstum sinkt.

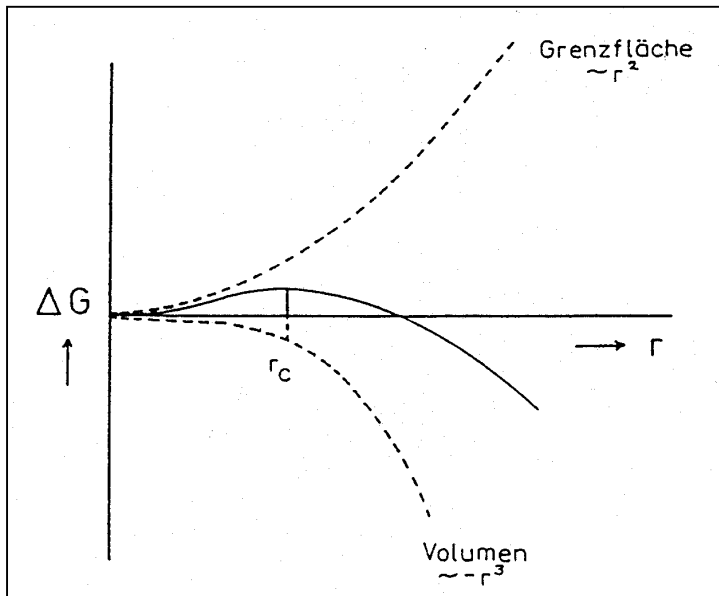


Bild 2: Abhängigkeit der freien Enthalpie für die Keimbildung vom Keimradius

Keime mit einem Radius $r < r_c$ vergrößern bei einem Wachstum die freie Enthalpie, sie lösen sich daher mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder auf. Wenn die Keime aber einen Radius $r > r_c$ erreichen, führt ihr Wachstum zu einer Verringerung der freien Enthalpie, diese Keime sind wachstumsfähig.

Da mit wachsender Unterkühlung die erforderliche Keimbildungsarbeit und die kritische Keimgröße verringert werden, nimmt die Anzahl n der in einer bestimmten Zeit t und einem bestimmten Volumen der unterkühlten Schmelze gebildeten Keime (Keimbildungshäufigkeit oder Keimzahl dn/dt) zu.

Das Keimwachstum schließt sich unmittelbar an die Keimbildung an. Die Kristallwachstumsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Kristallisationsfront eines Keims in die Schmelze hinein verschiebt. Der Wachstumsprozess kann so lange fortschreiten, bis sich die Kristalle berühren und Korngrenzen bilden. Für das

bei der Erstarrung entstehende Gefüge ist das Verhältnis von Keimbildungshäufigkeit und Kristallwachstumsgeschwindigkeit entscheidend. Das bedeutet praktisch, hohe Keimbildungsraten bei kleinen Kristallwachstumsgeschwindigkeiten führen zur Erzielung eines feinkörnigen Gefüges. Diese Zusammenhänge sind im Bild 3 gegenübergestellt.

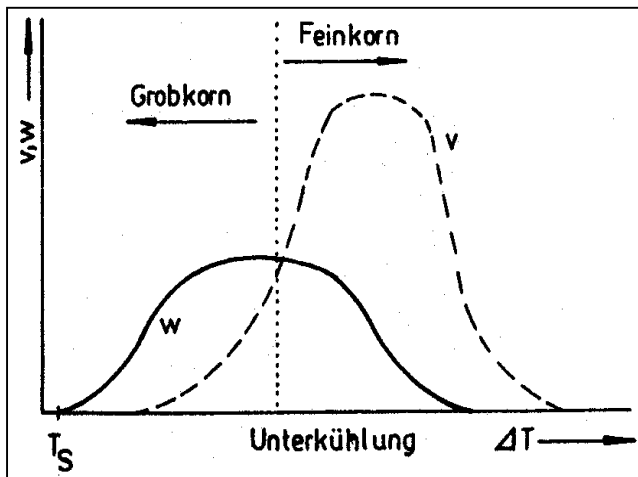


Bild 3: Keimbildungsgeschwindigkeit v und Wachstumsgeschwindigkeit w in Abhängigkeit von der Unterkühlung [1]

Der Prozess der homogenen Keimbildung tritt in der Praxis sehr selten auf. Die Erstarrung der Metallschmelzen ist häufig an die Anwesenheit von Fremdkeimen gebunden, dieser Prozess gestattet die Keimbildung auch bei geringen Unterkühlungen.

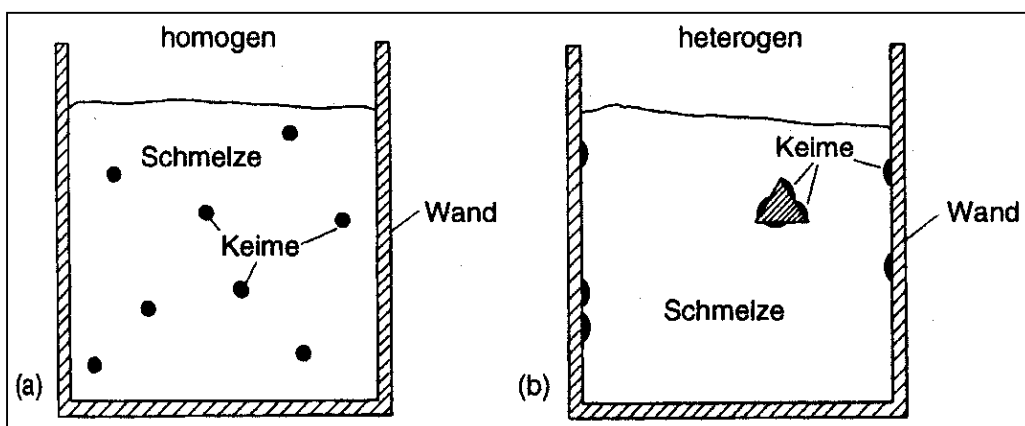


Bild 4: Prinzipielle Darstellung von homogener und heterogener Keimbildung

Bei technischen Erstarrungsprozessen ist immer mit einer solchen heterogenen Keimbildung zu rechnen. Zur gezielten Einstellung eines feinkörnigen Gefüges muss also der Erstarrungsablauf so beeinflusst werden, dass die Keimbildungsgeschwindigkeit deutlich höher als die Kristallwachstumsgeschwindigkeit ist. Die Möglichkeit der Unterkühlung ist technisch begrenzt. Durch einen Energieeintrag in die erstarrende Schmelze wird angestrebt, diesen Keimbildungsprozess zu unterstützen [2; 3; 4; 5; 6; 7].

1.1.1. Gefügebildung bei der Erstarrung eines Gussblockes

Kühlt eine metallische Schmelze in einer Form ab, dann erreicht sie am Rand der Form zuerst eine starke Unterkühlung, sodass dort über eine heterogene Keimbildung zahlreiche Keime gebildet werden, die sich zu einer feinkörnigen Randzone auswachsen (Zone 1).

Durch die weitere Abkühlung und einer, durch die freiwerdende latente Erstarrungswärme bedingt, thermischen und konstitutionellen Unterkühlung ergeben sich danach Bedingungen für ein dendritisches Wachstum. Durch das Erstarren der Restschmelze zwischen den Dendritenarmen bilden sich säulenförmige Kristalle mit Längsachsen parallel zur Wärmeflussrichtung und einer durch die Dendritenwachstumsrichtung vorgegebenen Orientierung aus. Man spricht dabei von der Transkristallisations- oder Stengelkornzone (Zone 2).

Mit fortschreitender Erstarrung wird ein Zustand erreicht, bei dem sich die Bereiche der konstitutionellen Unterkühlung in der Mitte des Blockes überlagern. Das führt zu einer Keimbildung in der zentralen Restschmelze, es bildet sich ein globulitisches Gefüge mit äquiaxialen Körnern ohne Vorzugsorientierung aus, die globulitische Innenzone (Zone 3). Die Entstehung dieser Zone ist dadurch gekennzeichnet, dass Verunreinigungen von den Transkristalliten vor sich hergeschoben werden und im Kern anreichern. Diese Verunreinigungen wirken als Keime und führen zur globulitischen Kristallisation.

Im Bild 5 ist ein solches Gussgefüge schematisch dargestellt.

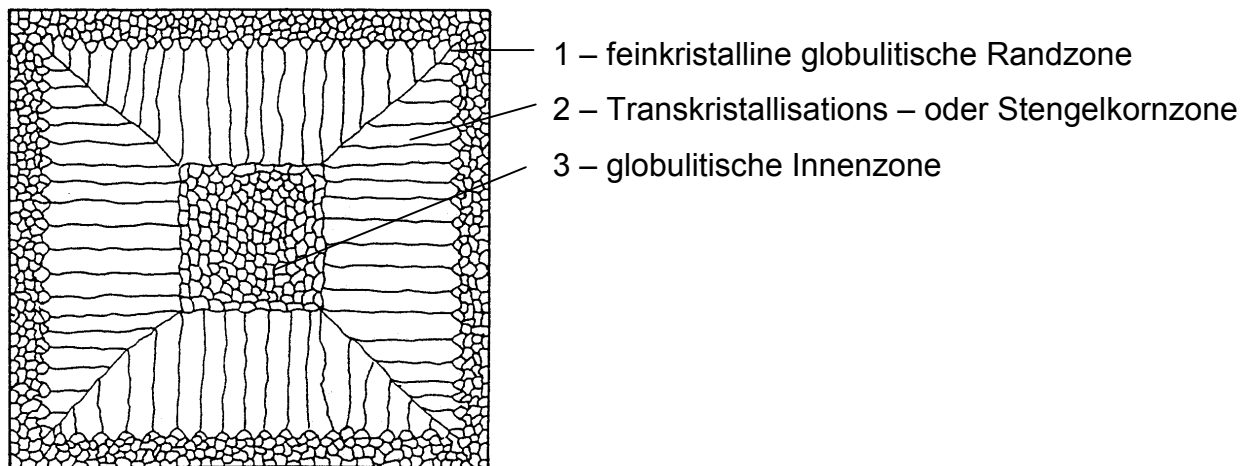


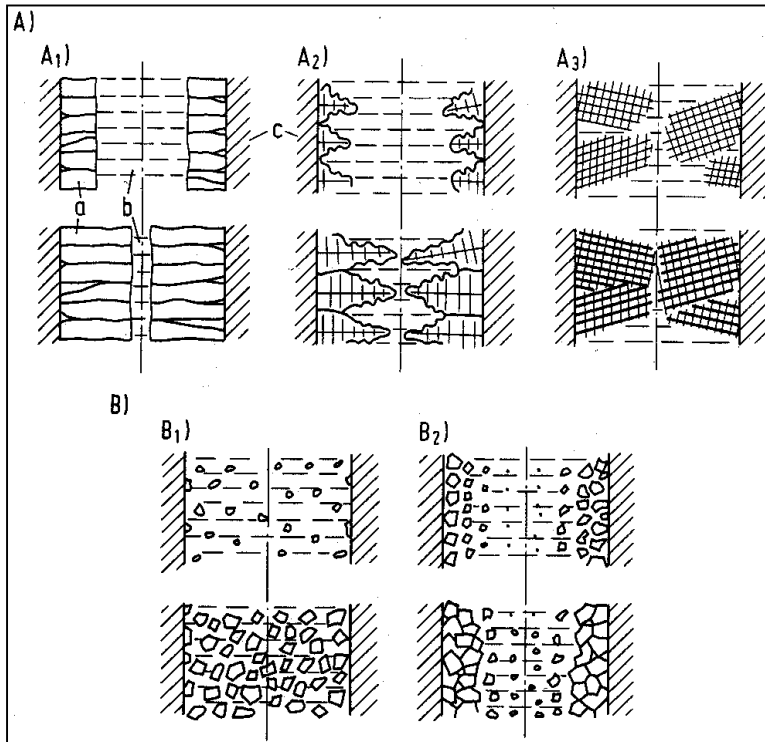
Bild 5: Schematisches Gefüge eines Gussblockes

Die Gefügebildung (Relationen der Zonen zueinander, Korngrößen und Texturgrade) hängt dabei von der Reinheit des Metalls bzw. der Legierungszusammensetzung, der thermischen Eigenschaften der Form und der Schmelze, der Ausgangstemperatur der Schmelze und der Abkühlungsgeschwindigkeit ab [2, 6].

1.2. Gefüge und Eigenschaften

Die Formen der metallischen Kristalle oder Kristallaggregate, die während der Erstarrung entstehen, sind vielfältig.

Kristalle können sich an der Formwand (exogen) oder im Inneren der Schmelze (endogen) bilden. Sie bleiben beim weiteren Wachstum entweder kompakt oder können sich verzweigen, dann entstehen die sogenannten Dendriten. Es kann also unter dem exogenen und endogenen Erstarrungstyp unterschieden werden. Innerhalb dieser Gruppen gibt es eine Reihe weiterer Unterteilungen, beim exogenen Typ glattwandige, rauwandige und schwammartige Erstarrung, beim endogenen Typ die breitartige und schalenbildende Erstarrung [8].



A) Exogene Erstarrung (A₁ glattwandig, A₂ rauwandig, A₃ schwammartig)

B) Endogene Erstarrung (B₁ breiartig, B₂ schalenbildend)
a fest; b flüssig; c Form

Bild 6: Erstarrungstypen [8]

Die Ausbildung des Gefüges, welches durch die Erstarrungsmorphologie bestimmt wird, beeinflusst in starkem Maße die Eigenschaften des entstehenden Gussteils. Somit ist das Gussgefüge wesentlicher Träger der Werkstoffeigenschaften. Feinkörnige Legierungen haben im allgemeinen bessere Festigkeitseigenschaften als grobkörnige. Aus diesem Grund wird oft ein feinkörniges Gefüge angestrebt. Bei den Gusseisensorten kommt der Ausscheidung des Kohlenstoffs und der Graphitbildung eine große Bedeutung zu.

Es ist möglich, in den Erstarrungsablauf durch Impf- oder Kornfeinungsbehandlungen einzugreifen. Außerdem kann die Entstehung der Gussstruktur durch die Regelung der Wärmeabfuhr aus dem erstarrenden Metall in den Formstoff beeinflusst werden. Bei verschiedenen metallischen Werkstoffen ist es nach abgeschlossener Erstarrung zur Erzielung bestimmter Eigenschaften möglich, das Gefüge durch eine Wärmebehandlung zu verändern.

Der Beeinflussung der Erstarrungsmorphologie zur gezielten Gefügeeinstellung, u. a. auch durch einen Energieeintrag während der Erstarrung durch Vibration, kommt daher eine große Bedeutung in Hinblick auf die zu erzielenden Eigenschaften und der Vermeidung von Gussfehlern zu [8].

1.3. Einfluss der Erstarrungsstruktur auf die gießtechnologischen Eigenschaften

Das Gefüge beinhaltet auch mögliche Gefügefehler, wie z. B. nichtmetallische Einschlüsse, Gasporen, Lunker, Warmrisse und Seigerungen. Ist ein Werkstoff für solche Fehler nicht oder nur in geringem Maße anfällig, so hat er gute gießtechnologische Eigenschaften. Bei Kenntnis dieser Eigenschaften eines Werkstoffes können gezielte Maßnahmen ergriffen werden, die die Entstehung eines möglichst fehlerfreien Gussstücks in der Form gewährleisten.

Der Ablauf von Formfüllung und Erstarrung sowie die damit im Zusammenhang stehenden Veränderungen des Gusswerkstoffes haben einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des entstehenden Gussteils. Die gießtechnologischen Eigenschaften vereinen ausgewählte physikalische und chemische Eigenschaften in ihrer komplexen Wirkung auf diese Prozesse. Wenn eine Schwingungsbehandlung der erstarrenden Schmelze die Erstarrungsmorphologie eines Gusswerkstoffes beeinflussen kann, so wirkt sie damit auch auf die gießtechnologischen Eigenschaften ein.

Fließvermögen:

Das Fließvermögen bezeichnet die Fähigkeit einer Schmelze, einen Formhohlraum auszufüllen, ohne dass der Metallfluss durch die einsetzende Erstarrung unter- oder abgebrochen wird. Das Fließvermögen ist abhängig von der Temperatur der Schmelze und ihrer Erstarrungsmorphologie.

Formfüllungsvermögen:

Das Formfüllungsvermögen bezeichnet die Fähigkeit einer Schmelze, den Formhohlraum konturengenau abzubilden. Im wesentlichen hängt das Formfüllungsvermögen

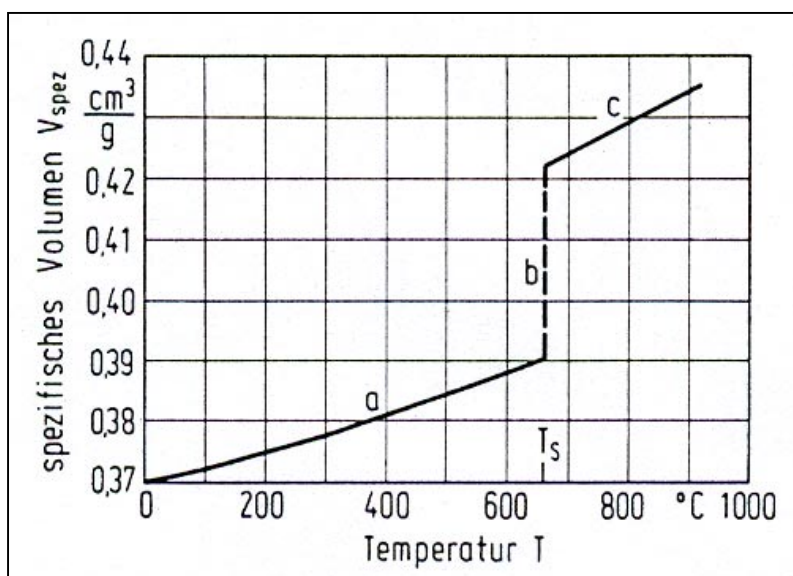
von der Oberflächenspannung der Metallschmelze ab. Die Gießtemperatur und der Gießdruck üben ebenfalls einen Einfluss auf die Formfüllung aus.

Die Wirkungen einer Vibrationsbehandlung auf das Fließ- und Formfüllungsvermögen wurden in [34] an Aluminiumlegierungen untersucht. Es wurde festgestellt, dass unter dem Einfluss von Vibration Gießkanäle mit erheblich geringeren Durchmessern noch vollständig mit Schmelze gefüllt werden können. Die Beeinflussung der Erstarrungsmorphologie durch Vibration kann also zu einer Verbesserung der Vergießbarkeit führen.

Lunkerverhalten:

Das Lunkerverhalten bezeichnet den Betrag und die Aufteilung des Volumendefizits, das bei der Erstarrung und Abkühlung einer Schmelze entsteht.

Die Gesamtkontraktion eines Metalls kann in die drei Bereiche Flüssigkontraktion, Erstarrungskontraktion und Festkörperkontraktion aufgeteilt werden. Für Gusseisen ist außerdem eine Volumenexpansion durch die Ausscheidung von Graphit charakteristisch.



- a- Festkörperkontraktion
- b- Erstarrungskontraktion
- c- Flüssigkontraktion

Bild 7: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens von Aluminium

Speisungsvermögen:

Das Speisungsvermögen bezeichnet die Fähigkeit des Transportes von flüssigem oder breiartigem Metall im Inneren erstarrender Körper zum Ausgleich des Volumendefizits, das bei der Abkühlung und Erstarrung im Gusstück entsteht. Das Speisungsvermögen hängt in besonderem Maße von der Erstarrungsmorphologie ab.

Glattwandige Speisungskanäle gewährleisten einen ungehinderten Transport von Speisemetall (Bild 8 A), dagegen behindern vorwachsene Dendritenspitzen (Bild 8 B) oder größere Festbestandteile in der Schmelze (Bild 8 C) den Metallfluss bereits vor abgeschlossener Erstarrung des Gussteils. Das interkristalline Speisungsvermögen hängt stark vom Feststoffanteil und der Dendritenstruktur ab.

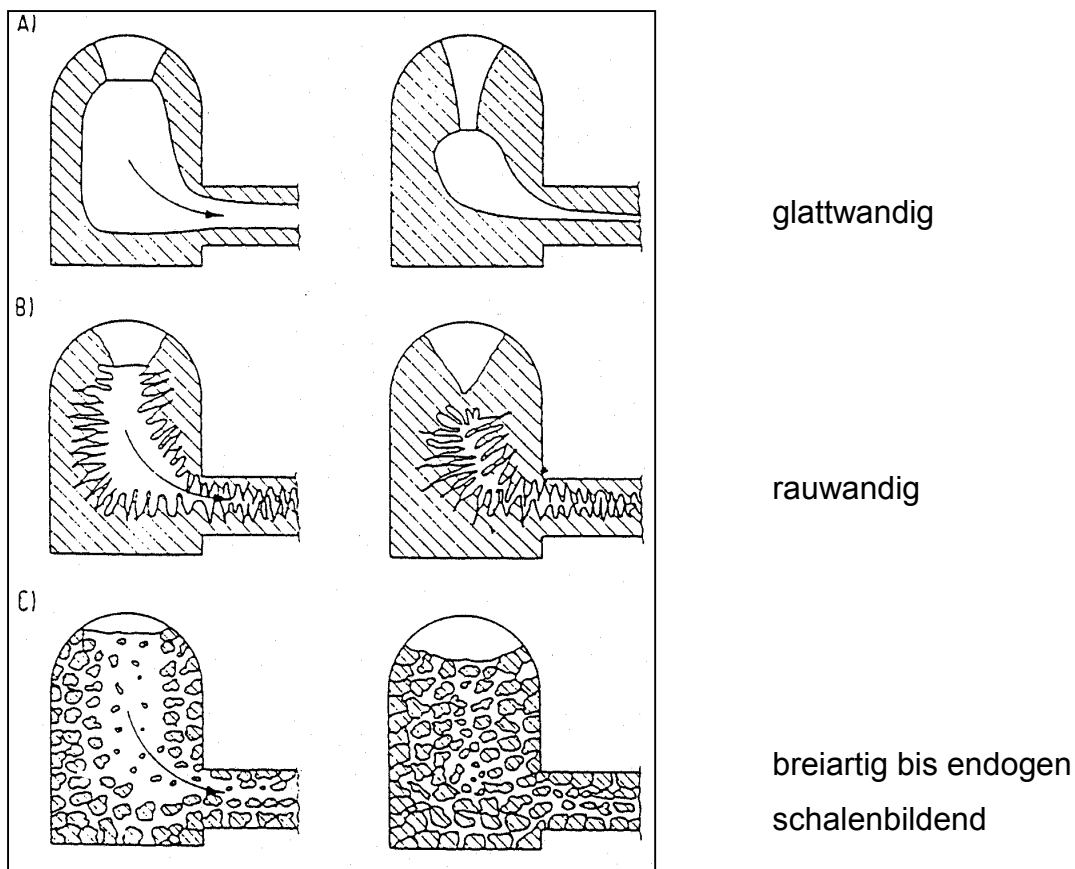


Bild 8: Speisung bei unterschiedlicher Erstarrungsmorphologie

Aufgrund der angestrebten Kornfeinung und einer größeren Beweglichkeit der Schmelze wird durch eine Vibrationsbehandlung eine Verbesserung des Speisungsvermögens erwartet.

Warmrissneigung:

Warmrisse entstehen durch behinderte Volumenkontraktion während der Erstarrung des Gusskörpers. Gusswerkstoffe neigen dann bevorzugt zur Warmrissbildung, wenn in dem weitgehend erstarrten Gusskörper noch geringe Reste flüssiger Phase vorliegen. Das Nachlaufen von Restschmelze in den Bereich des Warmrisses kann zum Ausheilen von Rissen führen. Das Ausheilungsvermögen ist dabei identisch mit dem interkristallinen Speisungsvermögen.

Durch eine Vibration während der Erstarrung ist es möglich, die Warmrissneigung bestimmter Legierungen zu reduzieren. So wird z. B. in [45] und [68] über Ergebnisse an Aluminium, Zink und Kupferlegierungen berichtet, bei denen eine Verringerung der Warmrissneigung beobachtet werden konnte.

2. Stand der Technik zur Schmelzebehandlung

Die Art des Gefüges ist entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes sowie für die technologischen Gebrauchseigenschaften der gegossenen Bauteile. Für viele Anwendungsgebiete ist es erforderlich, dass bestimmte Gussstückeigenschaften, wie zum Beispiel hohe Druckdichtheit oder Zugfestigkeit, gewährleistet werden. Mit der gezielten Einstellung eines feinglobulitischen Gussgefüges kann man solchen Forderungen entsprechen. Es ist möglich, durch eine Kornfeinungsbehandlung des flüssigen oder erstarrenden Metalls die Erstarrungsmorphologie so zu lenken, dass ein feinkörniges Gefüge entsteht.

Man unterscheidet die chemisch-metallurgische und die mechanische Kornfeinung.

2.1. Chemisch-metallurgische Schmelzebehandlung

2.1.1. Kornfeinung und Impfen

Die chemische Kornfeinung stellt eine Möglichkeit dar, den Keimzustand einer Schmelze durch das Einbringen von Fremdkeimen zur Kristallisation so zu beeinflussen, dass sich bei der Erstarrung ein feinkörniges Gefüge bildet.

Untereutektische Aluminiumlegierungen werden üblicherweise mit Titan oder Bor behandelt. Diese Modifizierung feint den Aluminium-Mischkristall. Die Kornfeinung von übereutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen erfolgt mit Phosphor. Diese Zugabe dient der Feinung der Si-Primärkristalle [9, 10, 16, 19].

Zur Kornfeinung von Kupferlegierungen verwendet man u. a. Titan, Zirkonium oder Bor. Die Modifikatoren werden dabei in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung einzeln oder in Kombination verwendet.

Neben der gewünschten Kornfeinung können allerdings auch unerwünschte Nebeneffekte auftreten. Es ist möglich, dass die Fremdstoffe außer Keimen auch Gefügeheterogenitäten bilden, die zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führen. Auswertungen des Fachschrifttums zur chemischen Kornfeinung von Metallschmelzen lassen bei bestimmten Legierungsgruppen Grenzen und Schwierigkeiten

erkennen [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. So wurde z. B. bei Reinstkupfer der Effekt festgestellt, dass bei der Zugabe einer wirksamen Menge von Feinungsmitteln ein starker Verlust an elektrischer Leitfähigkeit in Kauf genommen werden muss. Bei der Herstellung von Zinkanoden wird das geforderte feinglobulitische Gefüge durch eine Aluminiumzugabe erzielt. Unerwünscht ist dabei, dass sich Aluminium im Sumpf ansammelt, sodass eine Alternative zur chemischen Behandlung angestrebt wird.

Das Impfen von Gusseisenschmelzen zählt ebenfalls zu den chemischen Kornfeinungsverfahren. Da bei Gusseisen eine homogene Graphitkeimbildung thermodynamisch erschwert ist, werden mit impfwirksamen Zusätzen wie z. B. Ferrosilizium (FeSi) oder Kalziumsilizium (CaSi) Fremdkeime in die Schmelze eingebracht. Die Behandlung erfolgt durch verschiedenartige Methoden wie z. B. Pfannenimpfung beim Abstich aus dem Schmelzofen, Zwischenpfannenimpfung beim Umschütten, Gießstrahlimpfung, Formimpfung oder Drahtimpfung.

Durch die Impfung wird die Zahl der Keime erhöht, die die Grafitausscheidung und die Bildung einer vermehrten Zahl von kleineren eutektischen Zellen bei der Erstarrung fördern. Bei Gusseisen mit Kugelgraphit erfolgt das Impfen nach der Magnesiumbehandlung, üblicherweise mit 0,3 bis 0,4 % FeSi75. Die Impfung beeinflusst über den Keimhaushalt der Schmelzen die Zahl, Größe und zum Teil auch die Form der Graphitausscheidungen, das Verhältnis Ferrit/Perlit und verhindert die Ausscheidung von Zementit im Grundgefüge. Die Impfbehandlung zeigt einen Abklingeffekt. Durch das Koagulieren der Fremdkeime und ihren Auftrieb an die Oberfläche wird nach ca. 20 bis 30 min das Gefüge einer nichtgeimpften Schmelze wieder erreicht [18].

Teile aus Gusseisenlegierungen zeigen eine starke Wanddickenabhängigkeit der Gefügeausbildung und damit der Eigenschaften. Die Zahl und Größe der Grafitausscheidungen sind trotz einer Impfbehandlung erheblich von der Erstarrungsgeschwindigkeit im Gussstück abhängig.

Aus der Literatur ist die Möglichkeit bekannt, die Grafitausbildung und die Größe der eutektischen Zellen durch den Eintrag von Energie durch Vibration oder Ultraschall während der Erstarrung zu verändern [25, 54, 64]. Wenn es gelingt, durch solch eine Behandlung die Homogenität des Gefüges über den Querschnitt zu erhöhen, könn-

ten Qualitätsprobleme speziell bei der Herstellung dickwandiger Teile vermindert werden.

2.1.2. Veredlung

Die Veredlung von eutektischen und naheutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen behindert die Primärausscheidung von körnigem Silizium bei Unterkühlung der eutektischen Temperatur. Durch die Ausbildung einer faserigen Struktur des Siliziums werden deutlich höhere Festigkeits- und Dehnungswerte erzielt. Die Veredlung erfolgt durch Natrium- oder Strontiumzusätze. Diese Zusätze können aber zu Problemen bei der Schrottverwertung führen.

Zur Kontrolle von Kornfeinungs- und Veredlungsbehandlungen wird vielfach die thermische Analyse angewendet. Bild 9 zeigt schematisch die Abkühlungskurven von jeweils zwei Aluminiumlegierungen (untereutektisch und eutektisch) im unbehandelten und behandelten Zustand.

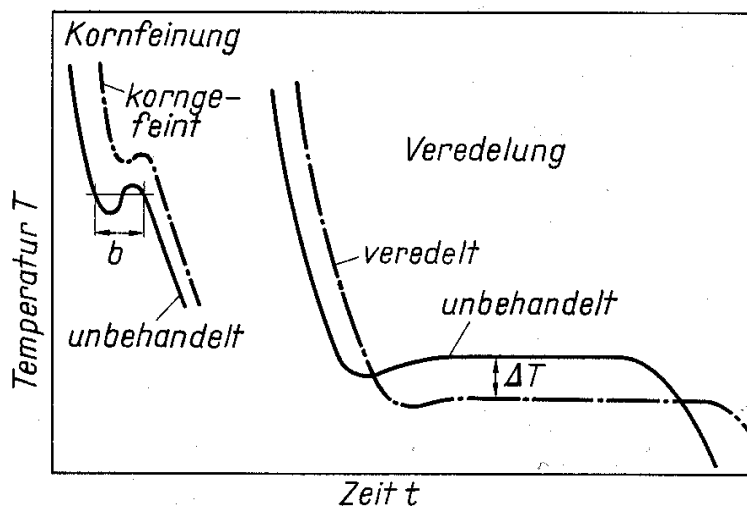


Bild 9: Temperaturkurven bei Kornfeinung einer untereutektischen (links) und Veredlung einer eutektischen Aluminium-Silizium-Legierung

Der Vergleich beider Kurven für die Kornfeinung macht bei der unbehandelten Probe eine ausgeprägte Unterkühlung mit größerer Zeitdauer gegenüber der chemisch

korngefeint Probe deutlich. Bei der Veredlungskontrolle ist ΔT das Maß für den Erfolg der Veredlung. Bei gut veredelten Schmelzen sollte ΔT nach Praxiserfahrungen im Bereich von 6 bis 10 K liegen [9, 10, 19].

2.2. Mechanische Schmelzebehandlung

Bei den mechanischen Schmelzebehandlungsmethoden erfolgt ein Energieeintrag in die erstarrende Schmelze. Diese Verfahren haben den Vorteil, dass der Schmelze im Gegensatz zur chemischen Behandlung keine Fremdstoffen zugeführt werden müssen. Die Keime zum Wachsen globulitischer Kristalle werden von der teilerstarrten Schmelze selbst gebildet [20; 21].

Im Fachschrifttum sind unter anderem folgende Methoden der physikalischen Schmelzebehandlung bekannt [u. a. 20, 22]:

- mechanische Manipulation der freien Oberfläche
- elektromagnetisches Rühren
- Gießen bei niedrigen Temperaturen
- Ultraschallbehandlung
- Energieeintrag durch Vibration

In den folgenden Abschnitten sollen die Varianten der physikalischen Kornfeinung diskutiert und bewertet werden.

2.2.1. Mechanische Manipulation der freien Oberfläche

Die mechanische Manipulation der freien Oberfläche bedeutet eine Intensivierung des von Ellerbrock und Engler in [20] erläuterten Kristallschauermechanismus. Im Bild 10 sind dessen schematischer Ablauf, im Bild 11 die Entstehung des Gussgefüges bei mechanischer Manipulation unter Nutzbarmachung des Kristallschauermechanismus dargestellt.

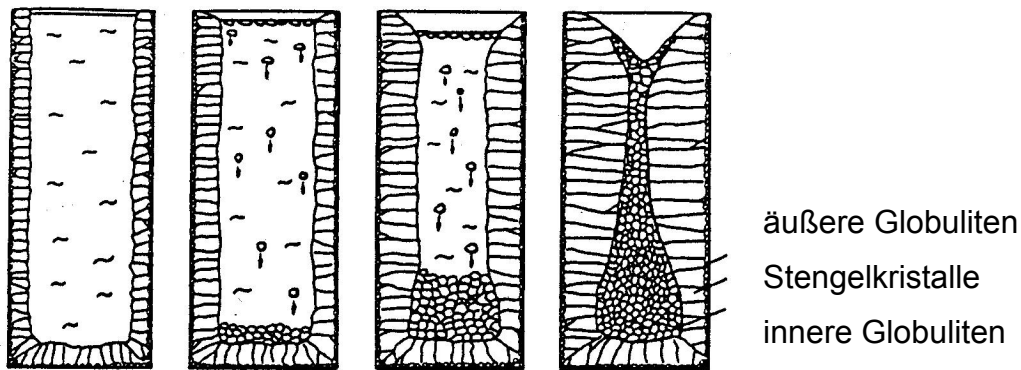


Bild 10: Schematischer Ablauf des Kristallschauermechanismus [22]

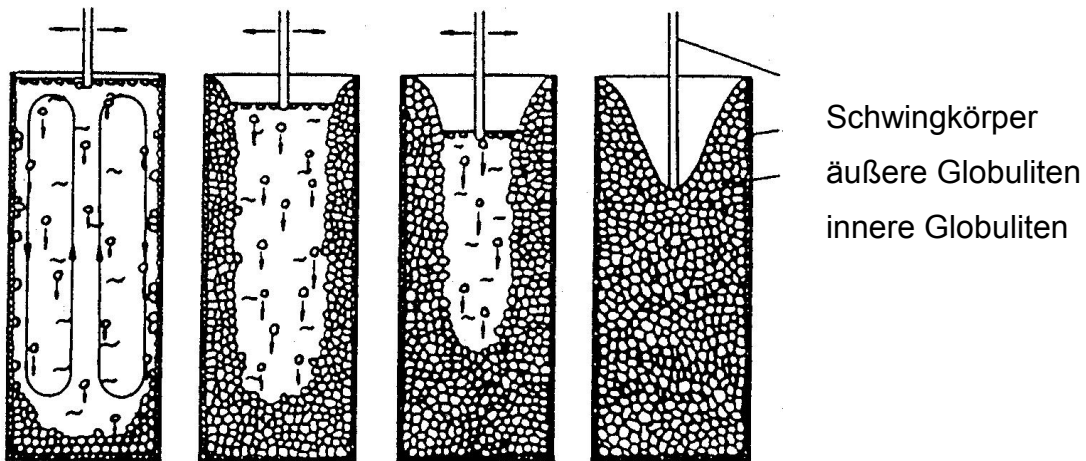


Bild 11: Entstehung des Gussgefüges durch mechanische Manipulation der Oberfläche [22]

Wie im Bild 11 erkennbar ist, können aus der kristallisierten Oberflächenschicht eines Gussstücks Kristallpartikel abgelöst werden, die aufgrund ihrer im Verhältnis zur Schmelze größeren Dichte absinken und im unteren Teil des Gussstücks als Globuliten weiterwachsen. Der Erfolg dieses Mechanismus ist allerdings an bestimmte Erstarrungsbedingungen gebunden.

Dieses Verfahren ist durch die Notwendigkeit einer freien Gussstückoberfläche für den praktischen Einsatz nur bedingt geeignet.

2.2.2. Elektromagnetisches Rühren, Magnetofluidynamik

Beim elektromagnetischen Rühren wird eine elektroinduktiv hervorgerufene Schmelzebewegung zur Erzielung einer Kornfeinung genutzt. Die technische Realisierung der Methode ist allerdings nicht unproblematisch [22, 23].

Über die Wirkungen eines variierenden Magnetfeldes auf Gefüge und Eigenschaften von nach dem Feingießverfahren hergestellten Teilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit wird in [24] berichtet. Kornfeinung, Erhöhung der Graphitmenge und Verringerung des Perlitanteils bei einer Erhöhung der Zugfestigkeit sind die erzielten Ergebnisse.

Das von Vives [57, 58] vorgestellte neue Anwendungsgebiet der elektromagnetischen Vibration beruht auf der Erstarrung bei gleichzeitigem Vorhandensein von elektrischen Wechselfeldern und stationären Magnetfeldern. Es wird daran gearbeitet, das Verfahren zur industriellen Anwendbarkeit zu bringen. Die Wirkungen beim Stranggießen und Kokillengießen von Al-Legierungen wurden untersucht, es konnten deutliche Kornfeinungen erzielt werden.

Ein Anwendungsbeispiel für eine Rührbehandlung stellt die Herstellung von Vormaterial für das Gießverfahren „Thixocasting“ dar. Zur Erzielung eines guten thixotropen Verhaltens des Vormaterials muss der α -Mischkristall in globulitischer Form vorliegen, um ein gleichmäßiges Fließen von Schmelze und Feststoff ohne Entmischung zu erreichen. Die Erzeugung eines derartigen Gefüges erfolgt u. a. durch das sogenannte „Reocasting“, bei dem während der Erstarrung gerührt wird. Das Rühren der Schmelze erfolgt elektromagnetisch [9]. Für dieses Anwendungsgebiet sind besonders Aluminiumlegierungen mit einem ausgeprägten Erstarrungsintervall geeignet, z. B. G-ALSi7Mg.

2.2.3. Gießen bei niedrigen Temperaturen

Das Gießen bei niedrigen Temperaturen erhöht im allgemeinen die Kornzahl. Diese Variante ist aber dadurch begrenzt, dass das Fließ- und Formfüllungsvermögen noch ausreichend sein müssen.

2.2.4. Ultraschallbehandlung

Beim Ultraschallverfahren als spezielle Form der Vibrationsbehandlung werden Schwingungen mit Ultraschallfrequenzen in die erstarrende Schmelze eingebracht. Es zählt zu den intensiver untersuchten und erprobten Verfahren. Das Problem dieser Art der Schwingungsbehandlung besteht in der komplizierten Ankopplung des Schwingungserregers an das flüssige bzw. erstarrende Metall.

In einer anonymen Veröffentlichung aus Japan [25] wird über Untersuchungen u. a. an Gusseisen mit Kugelgraphit und Vermiculargrafit berichtet. Die Werkstoffe wurden einer Ultraschallbehandlung während der Erstarrung unterzogen. Der mittlere Durchmesser der Grafitphasen konnte dabei um 33 bis 50 % verringert werden.

In Japan wurde ein neues Verfahren zur Ultraschallbehandlung entwickelt [56]. Es beruht auf der direkten Übertragung durch eine hochfeste Keramik als Ultraschallgenerator, die auch bei Temperaturen über 1000 °C von den Metallschmelzen nicht angegriffen wird. Als Versuchswerkstoffe kamen Aluminium, Kupfer sowie Gusseisen mit Kugel- und Vermiculargrafit zur Anwendung. Es konnten positive Ergebnisse erzielt werden, so z. B. eine deutliche Kornfeinung sowie eine Verbesserung des Reinheitsgrades. Beim Gusseisen konnte der mittlere Durchmesser der Grafitphasen verringert werden. Auch in [50, 60] werden Untersuchungsergebnisse zum Einfluss einer Ultraschallbehandlung bzw. eines Magnetfeldes vorgestellt, wobei sich letztere Arbeit mit der Kornfeinung von Flugzeugteilen im Feingießverfahren beschäftigt.

Allerdings sind die beschriebenen Varianten an das Vorhandensein einer freien Gussstückoberfläche gebunden, was bei einer praktischen Anwendung nicht generell gewährleistet werden kann.

Der Stand der Kornfeinung von Nichteisenmetallen wird von Reif in [17] dargestellt. Es wird von der Möglichkeit berichtet, die Keimzahl durch Ultraschallschwingungen zu erhöhen. Interessant ist dabei die Aussage, dass sich reine Metalle nicht durch Erstarrungsbeschallung kornfein lassen. Erst wenn die Schmelze geeignete Zusätze in entsprechender Konzentration enthält, ist ein feines Gefüge einstellbar. Auch

in [74] wird von Seemann und Buxmann dieses Ergebnis bei Untersuchungen an Zinn mit verschiedenen Zinkzusätzen bestätigt.

2.2.5. Vibration

Die Beeinflussung des Erstarrungsverhaltens durch Vibration wurde in der Vergangenheit oft recht skeptisch betrachtet. Bei ungenügender Kenntnis der Prozessparameter besteht bei Beaufschlagung der Sandform durch Vibration die Gefahr, diese zu beschädigen oder zu zerstören. Die Variante, die Schmelze durch einen in eine oben offene Gussstückoberfläche oder den Gießtumpel eingeführten Vibratorstab zu behandeln, führt nur zu einer lokalen Kornfeinung und ist für die praktische Anwendung des Verfahrens ungeeignet.

Die Anfänge der mechanischen Behandlung erstarrender Schmelzen durch Vibration liegen schon recht lange zurück. Bereits in den 30er Jahren wurde über erste Untersuchungen berichtet [26, 27, 28]. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen widmete sich vor allem ab Mitte der 50er Jahre verstärkt dieser Problematik [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Diese Untersuchungen, die sich mit verschiedenen Werkstoffen beschäftigten, lassen einheitlich ein ziemlich empirisches Herangehen an die Problematik erkennen. Mit vorhandenen Schwingungserregern wurden ohne große Variationsmöglichkeiten im Labormaßstab Versuche durchgeführt, wobei die Verwendung von Sandformen kaum eine Rolle spielte. Es wurden aber beachtliche Ergebnisse, wie Feinkörnigkeit, erhöhte Dichte, Entgasungswirkung oder verbesserte mechanische Eigenschaften, festgestellt.

Ein weiterer positiver Aspekt der mechanischen Behandlungsverfahren ist die Möglichkeit, mit Hilfe der Vibration das Formfüllungs- und Fließvermögen zu verbessern. In [34] wurden dazu Untersuchungen an Aluminiumlegierungen durchgeführt. Mit steigender Vibrationsintensität können Gießkanäle mit erheblich geringeren Durchmessern noch mit Schmelze gefüllt werden.

Nachdem die ersten Untersuchungen keine Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung gaben, ließ die Beachtung der physikalischen Behandlungsverfahren von Me-

tallschmelzen vorerst nach. Da aber die Ergebnisse sehr positiv waren, wurde die Problematik schon bald wieder aufgegriffen [z. B. 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42].

In [36] beschreibt G. Angeloff den Versuch, die notwendigen Bedingungen für eine wirkungsvolle Schwingungserregung während der Kristallisation genauer zu untersuchen und mathematische Zusammenhänge zu finden.

Die in der Folgezeit veröffentlichten Arbeiten konnten die positiven Ergebnisse, die aus früheren Arbeiten bereits bekannt waren, wiederholen [43, 44]. Meist wurden die Vibrationsuntersuchungen mit Kokillen durchgeführt, da bei Sandformen die Gefahr bestand, diese zu zerstören.

In der Arbeit von Smirnov u.a. [44] wurden erstmals die Wirkungen eines Schwingungseintrages in erstarrende Bronzeschmelzen bei Verwendung von Kokillen und Sandformen erforscht. Er stellte fest, dass bei vertikaler Beaufschlagung bereits bei Amplituden von 0,1 mm die Gefahr der Zerstörung der Sandform bestand.

In [20] wird über Untersuchungen berichtet, bei denen reines Aluminium erfolgreich mit einem direkt in die Schmelze eingetauchten, vibrierenden Al_2O_3 –Stab korngfeint wird. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu der von Reif [17] getroffenen Aussage, dass bei reinen Metallen eine Kornfeinung mittels Schwingungsbehandlung nicht erreicht werden kann.

Auf dem Gebiet des Energieeintrages in erstarrende Metallschmelzen wird auch in den letzten Jahren verstärkt geforscht [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63]. An unterschiedlichen Werkstoffgruppen werden die Versuche mit verschiedenster Versuchstechnik durchgeführt.

Die Untersuchungen an Gusseisen brachten interessante Ergebnisse. Wenn man Gusseisen vibriert, welches metastabil erstarren würde, so kann es unter Einwirkung von Vibration zur Ausscheidung von Grafitpartikeln kommen. Bei stabil erstarrendem Gusseisen können dagegen veränderte Grafitformen auftreten, die Grafitlamellen wurden kürzer, und es trat Vermiculargrafit auf. Die Ursachen dafür können in einer Unterbrechung des Wachstums in eine bevorzugte Richtung liegen [64, 65, 66].

Die Zugfestigkeit von grauem Gusseisen hängt in starkem Maße von der Größe der eutektischen Zellen ab. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Erstarrung unter Vibration zu einer Verfeinerung der eutektischen Zellen führt, was eine Erhöhung der Zugfestigkeiten zur Folge hat [64].

Die Möglichkeiten, Eigenschaften von legiertem, korrosionsfestem Stahlguss durch Vibration zu verbessern, wurden von Leger u.a. in [67] untersucht. Dabei konnte eine Kornfeinung festgestellt werden, die zu verbesserten mechanischen Eigenschaften führte.

Eine weitere in Japan veröffentlichte Arbeit beschäftigte sich mit der Steuerung des Erstarrungsmikrogefüges in Gusslegierungen auf Al-Si-Fe-Basis durch Vibration [44]. Die Autoren stellten fest, dass sich die Länge der nadelförmigen Eisenkomponente mit steigender Vibrationsenergie verringert.

2.2.6. Grundlagen zur Kornfeinung durch Vibration

Zur Auswirkung eines Energieeintrages auf den Erstarrungsprozess wurden im Schrifttum verschiedenste Hypothesen diskutiert.

Eine von Chworinov [in 68] aufgestellte Theorie besagt, dass die Vibration eine intensive Durchmischung der Restschmelze im nichterstarrten Bereich des Gussstücks hervorruft, die einen Teil der Kristallisationsfront zerstört. Die entstehenden Kristallbruchstücke wirken als freie Kristalle, die vor der Erstarrungsfront wachsen.

Walker, J. L. wird ebenfalls in [68] zitiert. Er vertritt die Ansicht, dass in der Schmelze durch die Vibration lokale Druckerhöhungen erzeugt werden, die die Unterkühlung vor der Kristallisationsfront und damit auch die Keimbildungsgeschwindigkeit erhöhen.

Es existieren weitere Theorien, welche die Wirkmechanismen der Erstarrungs- und Gefügebeeinflussung zu deuten versuchen. Beispielhaft sind dafür zu nennen: Entgasungswirkung, Subkeimaktivierung, Zerstörung erstarrungshemmender Barrieren, Druckwellenentstehung, Viskositätsabnahme der Schmelze u. a., die allerdings wissenschaftlich nicht ausreichend bewiesen sind [30, 31, 32].

Buxmann versuchte in [21] die Wirkungen verschiedener Kornfeinungsmechanismen auf die Erstarrung von Metallen zu beschreiben und zu ordnen. Es wird, um die Keimbildungseffekte besser verstehen zu können, in *dynamische Keimbildung* und *Keimmultiplikation* unterschieden.

Nach Buxmann spricht man von Keimmultiplikation, "wenn bereits erstarrte Substanz durch Schock, Vibration oder Strömung in mehrere Teile zerlegt wird". Dynamische

Keimbildung liegt vor, "wenn in einer unterkühlten Schmelze durch mechanischen Einfluss Keime entstehen, ohne dass bereits früher erstarrte Substanz an dem Mechanismus beteiligt ist".

Auch bei diesen Ausführungen wird darauf hingewiesen, dass die Ursache der dynamischen Keimbildung noch unklar ist. Es ist zwar möglich, dass die ersten Keime einer vibrierten unterkühlten Schmelze durch dynamische Keimbildung entstehen, die Erstarrungswärme dieser Keime reduziert aber die Unterkühlung der Schmelze so stark, dass eine weitere dynamische Keimbildung schnell verhindert wird [17, 21]. Diese Erklärungsversuche lassen noch eine ganze Reihe von Fragen offen.

Buxmann erläutert weiterhin, dass eine Schwingungsbehandlung erstarrender Metallschmelzen meist zu kräftigen Strömungen in der Schmelze führt. Diese können durch zweierlei Wirkungen ebenfalls kornfeinend wirken:

1. es ist möglich, dass heißere Schmelze in den Bereich eines Dendriten transportiert wird, was zum Abschmelzen der Dendritenäste führen kann und
2. diese Dendritenfragmente können durch eine Strömung in Bereiche mit günstigeren Keimwachstumsbedingungen transportiert werden.

Altenpohl beschreibt in [69] einige Deutungsversuche verschiedener Verfasser hinsichtlich der Wirkungen von Vibration und Ultraschall auf das Erstarrungsverhalten metallischer Schmelzen. So zitiert er Schmidt [70], der die durch einen Energieeintrag bewirkte Kornverfeinerung auf ein Abbrechen der aus der Erstarrungsfront herausragenden Kristallnadeln oder Dendritenarme zurückführt. Während Schmidt keine Kornfeinung im Bereich der Schallfrequenzen fand, konnte diese aber bei Untersuchungen von Rostocker und Mitarbeitern [71, 72] nachgewiesen werden. Die erzielten Effekte hängen hauptsächlich von der Amplitude ab, eine Steigerung über 0,5 mm ergibt keine weitere Verbesserung. Das Variieren der Frequenz zwischen 60 und 1500 Hz hatte keinen systematischen Einfluss. Erklärungsversuche der Autoren sind z. B. verstärkte Keimbildung nahe der Erstarrungsfront oder Erleichterung der Keimbildung während der Druckwelle innerhalb unterkühlter Schmelzebereiche durch den Eintrag von Energie während der Erstarrung.

Der Versuch, die bei einer Schwingungsbehandlung erstarrender Metallschmelzen auftretenden Effekte mathematisch zu analysieren, wird von Balakin in [73] beschrieben. Dabei treten aber eine Anzahl ungeklärter Fragen auf.

In [74] wird von Seemann und Buxmann der Einfluss einer Ultraschall-Behandlung auf Zinnlegierungen untersucht. In Auswertung dieser Versuche wird darauf eingegangen, dass vermutlich der Vorgang der Keimmultiplikation vorrangig für die Entstehung der Kornfeinung verantwortlich ist. Ein Argument dafür ist die Tatsache, dass eine ausgeprägte Zunahme des Kornfeinungseffektes mit Verlängerung der Impulsperiode bzw. Verlängerung der Pausendauer zu beobachten ist. Dieses ist mit den Ursachen der dynamischen Keimbildung nicht vereinbar, spricht aber für das Auftreten der Keimmultiplikation.

2.2.7. Zusammenfassende Aussagen zu physikalischen Schmelzebehandlungsverfahren

Zur Erfassung der Problematik der physikalischen Schmelzebehandlung wurde der Stand der Technik ausgewertet. In der Tabelle 1 wurden einige Quellenangaben und die wichtigsten Aussagen daraus zusammengefasst.

Tabelle 1: Auswahl von Untersuchungen zur physikalischen Behandlung von Metallschmelzen

Werkstoff	Form / Gussstück	Schmelzebehandlung	f (Hz)	A (mm)	Ergebnisse	Quelle
Stahl	Kokille	Nockenantrieb	0,17-1,7	15-20	Sulfide gleichmäßiger verteilt, Dichte↑, mech. Eigenschaften ↑	[26]
Al - Leg.	Kokille, Stifte verschiedener Ø	Vibration; 1,4 bis 4,5 g Beschleunigung	60		Formfüllungs- und Fließvermögen verbessert	[34]
Cu - Leg.	Strangguss – Stahlkokille, Grafitform	Elektromagnetische Vibration, Ultraschall	60 - 20000		Kornfeinung, Festigkeitssteigerung, bei US-Behandlung Effekte deutlicher	[31]
Al, Zn	Sandform	vibrierende Gießeinrichtung	230	0,1	Kornfeinung, Widerstand gegen Warmrisbildung↑	[68]
warmfeste Legierungen	Kokille	Vibration	95	0,3	Kristallisation tritt eher ein	[37]
Gusseisen	Kokille	Vibration	17-25 24	0,25- 0,5	verbesserte Eigenschaften	[39]
Sn, leg. mit Zn; Pb; Sb	Kokille	Ultraschall Leistung: max. 750 W	20000		deutliche Kornfeinung Beschreibung der Effekte	[74]
Cu	im Tiegel aufgeschmolzen und behandelt	Impulsartiger US, Koppelschwinger aus Keramik	20000		gleichmäßige Kornfeinung	[40]

Al-Leg.	Kokille	Vibration	30,50, 70	0,05- 0,3	Verbesserung der mech. Eigenschaften	[41]
Stahlguss GS-C25	ca.1 m größte Wd Gewicht 25 t, Kurbelhüben für Schiffsdieselmotoren; Sandform	elektromagnetische Wandlerfelder	0,75		feinkörnige, seigerungsarme Randzone, feinkörnige Kernzone, schmaler grobdendritischer Übergangsbereich	[14]
Stahlguss		Vibration	48	0,13- 0,3		[42]
leg. Stahl, CuZn ₂ , Alu-Leg.	Sandform Gusseisenkokillen	mech. Manipulation der Oberfläche → Kristallschaumermechanismus bei Stahl u. Cu: Eintauchen vibrierender Al ₂ O ₃ -Stab, Al: Aufblasen Argonstrahl	25-50	1-2	Kornfeinung	[20]
Pb-Sb; Al-Cu Bi-Cd- Leg.	Kokille	Ultraschall; US-Kopf taucht von oben in die Schmelze	20000		Kornfeinung	[43]
Al-Cu-Leg.	Kokille	Vibration elektromagn. Rühren	50	0,2	Kornfeinung	[51]
Al99,7 Al99,99	Strangguss- Stahlkokillen, Grafitformen	rotierendes magn. Umkehrfeld			therm. und mechan. Zerstörung der Erstarrungsfront, homogenes feinkörniges Gefüge	[23]

Bronze	Sandform	Vibration	bis 80	bis 0,1	bei 60Hz / 0,1mm wird Form zerstört Gasporosität↓	[44]
GGL	Kokille	Vibrationstisch	50	0,3	Rm, Betriebseigenschaften und Zunderbeständigkeit ↑	[64]
Al- u. Cu- Legierungen	Kokille	Vibrationstisch	16	0-4	Primärkristalle verfeinert, Rm und Dehnung↑	[46]
Cu- Leg.	Kokille, Gussstückwanddicke: 12-250 mm	Vibrationstisch	< 200		Mikroporosität, Seigerungen, Eigenspannungen und Warmrissebildung ↓, Kornfeinung	[45]
weißes und graues Gusseisen	Kokille Sandform	Mechanischer Vibrator	50	0,25 - 0,76	Rm ↑ Veränderung der Grafitpartikel, Auftreten von Vermiculargrafit, kleinere eutektische Zellen	[64]
Al-Leg.	Kokille	Ultraschall, von oben in Schmelze	19000	0,5	Kornfeinung	[53]
Al-Leg.	Strangguss	Elektromagnetische Vibration ohne Schmelzekontakt	50		gleichmäßiges Gefüge	[52]
Cu-Cr-Legierungen	Kokille	Mechanischer Vibrator	50	0,25-0,76	Ausscheidungshärte ↑	[49]
Bi, Stahl		Vibration	20-90	0,5	Mit steigender Frequenz Erstarrungszeiten ↓, Kornfeinung verstärkt	[47]

Al, Cu, GG mit 3,7 % C		Ultraschall, Sialonkeramik , als US-Generator, Leistung 1200 W	20000	13-18	superfeine, gleichmäßige Kristallstruktur, GG: Grafitpartikel 1/2 bis 1/3 so groß wie unbehandelt	[56]
X5CrNi13.4	Feingussverfahren	Elektromagnetisches Rühren			Kornfeinung, Verbesserung der mech. Eigenschaften, Einschränkungen durch Gussstückgestalt	[60]
Gusseisen		Keram. US - Strahler aus Sialon 10 mm in Schmelze		0,001 5	Grafitstruktur deutlich feiner	[54]
Al	Sandform	Magnetisches Feld Elektrisches Feld	50		verbesserte mechanische Eigenschaften; feineres Gefüge	[75]
Al - Leg.	Strangguss Kokille	Magneto hydrodynam. Verfahren, gleichzeitige Behandlung mit el. Wechsel- feld und stat. Magnetfeld	50		Kornfeinung	[57, 58]
aust. Stahl, CuSn12 CuZn15Si4	furanharzgeb. Sandformen, Speiser = Einguss Gussstück: Scheibe	Elektromagnetisches Rühren, Vibration durch vibrierenden Stempel im Speiser			aust. Stahl: bei 0,01 - 0,08 % C keine Effekte - sonst Kornfeinung Cu-Leg. – Kornfeinung auch bei CuSn12 aber Porosität ↑	[22]
Al-Leg. (7 % Si, 1 %Fe)	Kokille	Vibrationstisch	15, 30 60	3, 5, 8	Mit steigender Frequenz - Länge Fe-Nadeln ↓; stärkerer Effekt mit steigen-	[59]

						der Amplitude Form Fe- Nadeln wird verändert - Zähigkeit ↑	
austen. Stahlguss	Sandformen Laborversuche: Klein- proben Praxistest: Stufenpro- ben	Vibration der Form	0-55	0,2-2	Kornfeinung; Verbesserung der me- chanischen Eigenschaften; opt. Fre- quenz: 50 bzw. 40 Hz abh. von Guss- stückgewicht	[67]	

Nach Auswertung der Fachliteratur kann man feststellen, dass die Untersuchungsmethoden immer komplizierter und aufwendiger werden. Man versuchte, die erzielten positiven Effekte, wie Feinkörnigkeit, verminderte Warmrissneigung, verbesserte mechanische Eigenschaften oder erhöhte Dichte, für andere Gießverfahren und komplizierte Teile zu nutzen.

Auch die aktuellen Veröffentlichungen beschränken sich überwiegend punktuell auf einen Werkstoff bzw. eine Fragestellung. Das meist recht empirische Herangehen an diese Problematik lässt die Möglichkeiten einer praktischen Umsetzung nur schwer erkennen.

Das Bild 12 zeigt eine Zusammenstellung der in ausgewählten Schriften angegebenen Versuchsparemeter.

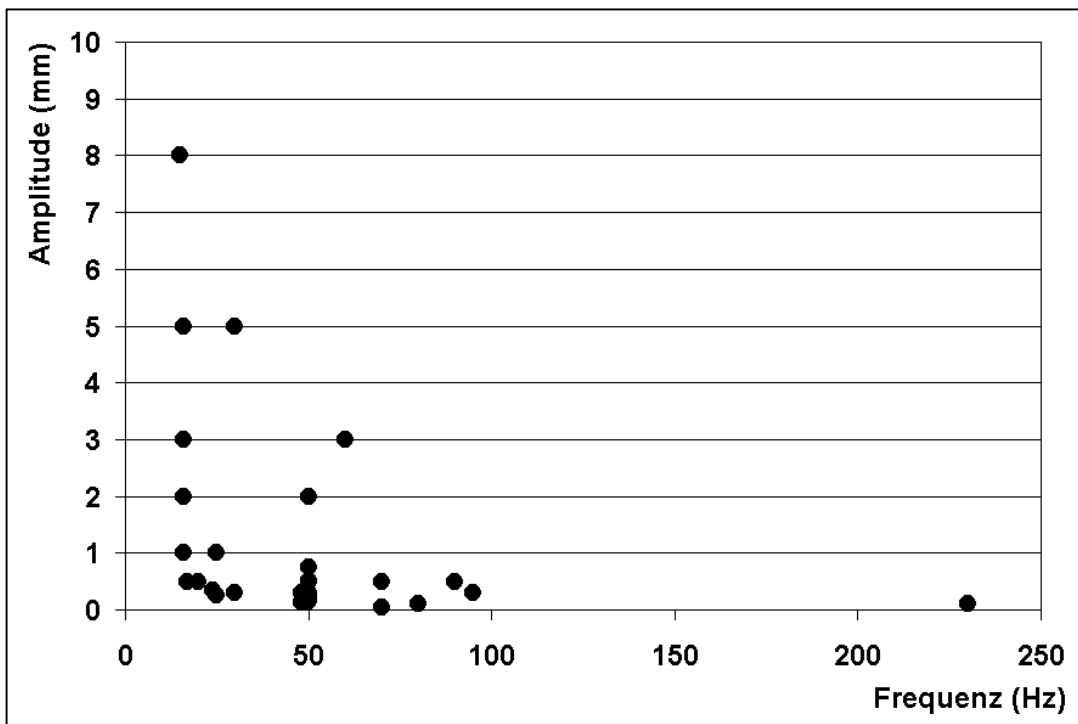


Bild 12: Auswahl von im Schrifttum angegebener Frequenzen und Amplituden zur Vibration

Es ist erkennbar, dass ein Großteil der verwendeten Frequenzen in Bereichen bis 100 Hz angesiedelt sind, was auf maschinentechnische Beschränkungen zurückzuführen ist. Die Amplituden variieren in recht großen Bereichen, wobei die höheren Werte nur für Versuche an Kokillen in Frage kommen.

Bei einer Analyse der aufgeführten Arbeiten zur Forschungsproblematik stellt man fest, dass sich die Tendenz der Anwendung der mechanischen Schmelzebehandlung von relativ einfachen Komponenten zu komplizierten, hochbeanspruchten Sicherheitsteilen verschiebt. Die Ursache dafür ist die Notwendigkeit, durch ein breites Spektrum geeigneter Maßnahmen die dem Werkstoff innewohnenden Eigenschaften vollständig und umfassend auszureizen.

Auffallend ist die zeitliche Häufung von Veröffentlichungen zur Problematik der mechanischen Schmelzebehandlung. Es wird deutlich, dass umfassende technische Realisierungen noch nicht erfolgt sind, aber durch die Erzielung sehr positiver Effekte diese Verfahren immer wieder interessieren. Im Bild 13 sind ein Teil von Veröffentlichungen in zeitlicher Ordnung gegenübergestellt.

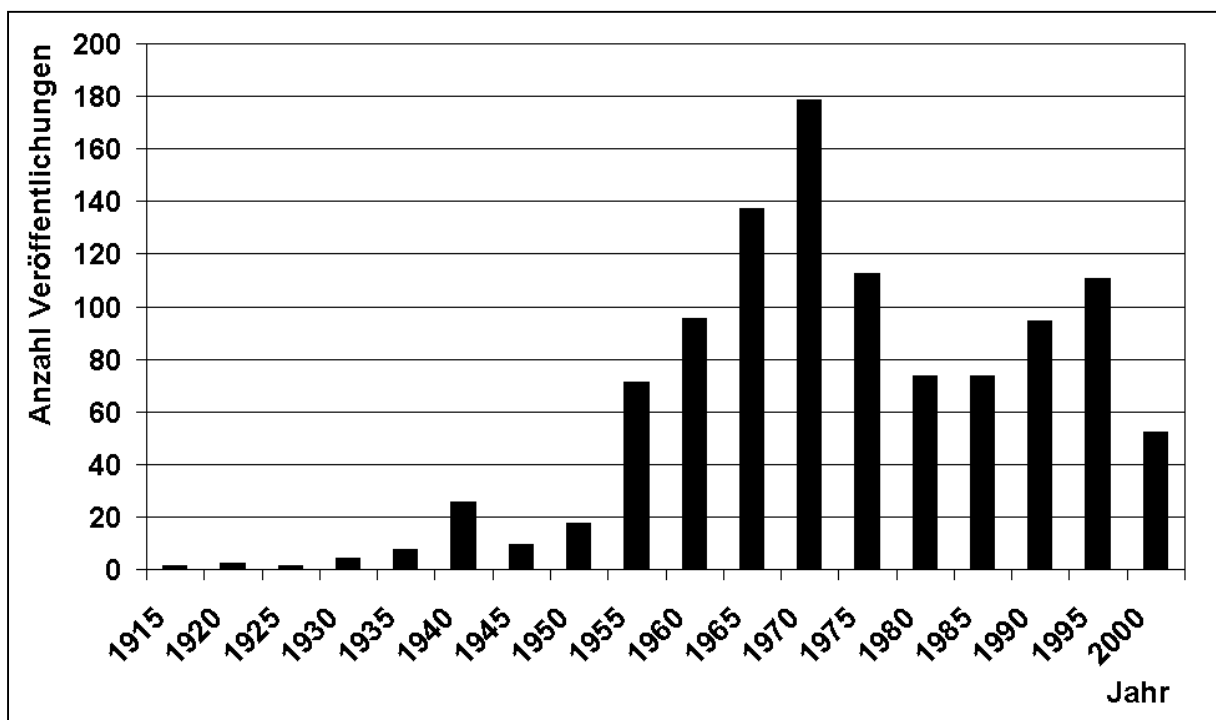


Bild 13: Anzahl von Veröffentlichungen in Fünfjahreszeiträumen

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass sich die physikalische Behandlung von Metallschmelzen während der Erstarrung als eine geeignete Methode zur Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften darstellt, ihre breite Anwendung aber noch nicht gewährleistet werden kann.

2.3. Aufgabenstellung zur Erweiterung des Kenntnisstandes

Ausgangspunkt für die Bearbeitung der Aufgabe war der Auftrag einer Schwermetallgießerei, geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität von Gussteilen aus Rotgusslegierungen zu entwickeln und in der Gießerei umzusetzen. Aus der Analyse der technischen Möglichkeiten erwies sich die physikalische Schmelzebehandlung als geeignetes Verfahren, die Probleme der Gießerei zu lösen.

Die Analyse der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren zur physikalischen Schmelzebehandlung ergab, dass in Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit die Vibration eine geeignete Variante zur Erfüllung der gestellten Anforderungen ist. Die Beaufschlagung der gesamten Gießform durch Vibration gewährleistet die Unabhängigkeit von der Probengeometrie.

Die Literaturlauswertung hat gezeigt, dass bisher oft nur partielle Untersuchungen zu jeweils aktuellen Fragestellungen durchgeführt worden sind. Außerdem wurde erkennbar, dass keine grundlegenden Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen den Vibrationsparametern und der Gefügeausbildung vorliegen.

Die Gesamtproblematik der physikalischen Behandlung metallischer Schmelzen und die Übersicht über die Vielzahl von Einflussfaktoren werden im Bild 14 deutlich.

Aus den genannten Vorbetrachtungen wird für die Lösung der Aufgabenstellung folgendes Versuchsprogramm abgeleitet:

- Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen dem jeweiligen Werkstoff und den Vibrationsparametern, bezogen auf die Gefügeausbildung
- Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der Maschine, dem jeweiligen Gusskörper und den Vibrationsparametern
- Erarbeitung von Möglichkeiten der Einordnung des Vibrationsverfahrens in den Gesamtprozess der Gussteilherstellung

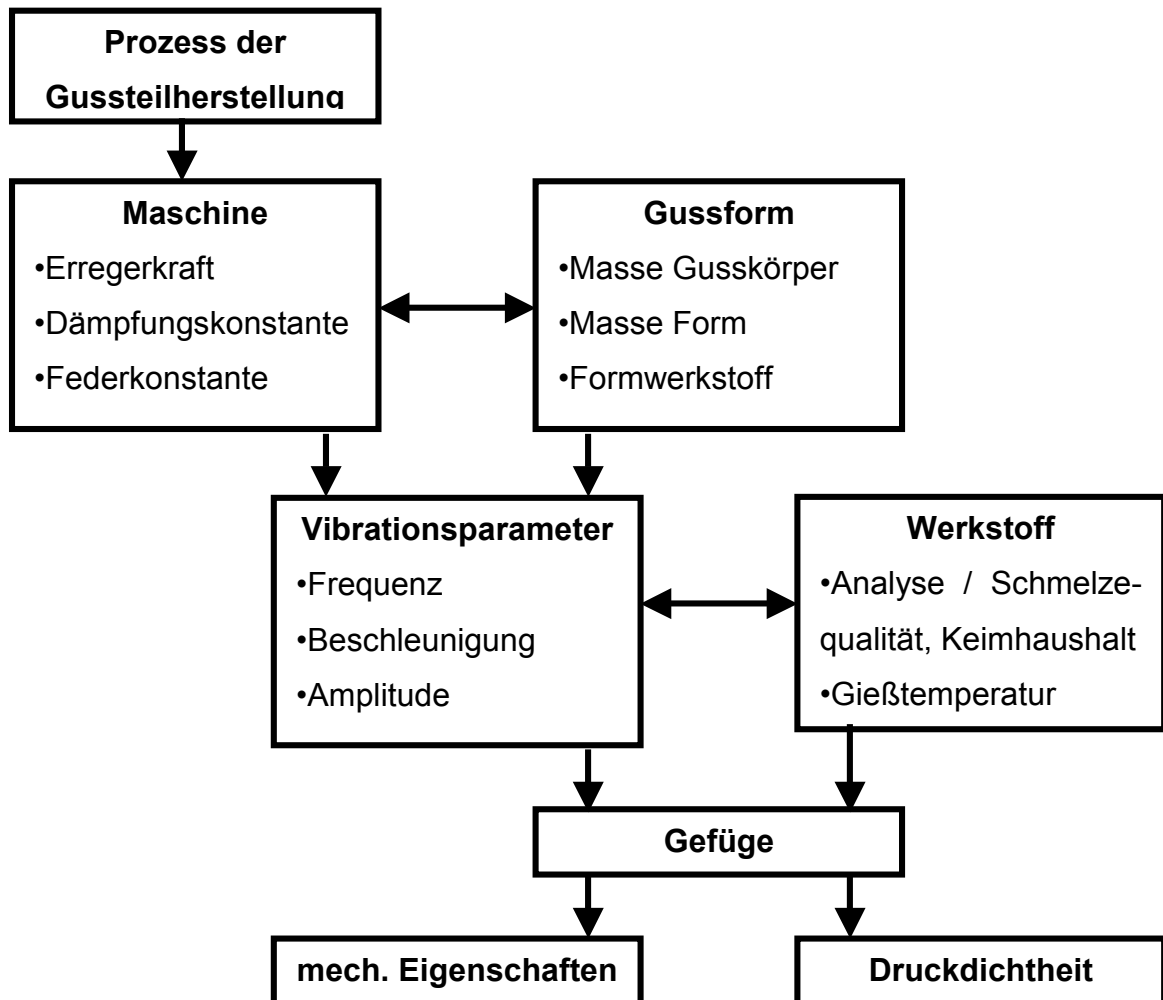


Bild 14: Einfluss- und Zielgrößen für den Energieeintrag in Metallschmelzen

Die Realisierung des Arbeitsprogramms erfolgte mit diesen methodischen Arbeitsschritten:

- Durchführung von Modellversuchen
- Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Vibrationsparameter auf die Gefügeausbildung verschiedener Gusswerkstoffe
- Herstellung von Gussteilen unter Vibration während der Erstarrung
- Projektierung einer Anlage zur Vibrationsbehandlung von erstarrenden Gussteilen

3. Grundlagenuntersuchungen zum Energieeintrag in erstarrende Metallschmelzen durch Vibration

Ausgehend von der Aufgabenstellung wurden zunächst Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Erstarrungsmorphologie und der Vibrationsparameter auf den Erstarrungsablauf metallischer Schmelzen durchgeführt. Es wurde weiterhin der Einfluss einer Vibrationsbehandlung während der Erstarrung auf die mechanischen Eigenschaften ermittelt.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden Versuchseinrichtungen benötigt, die die Vibrationsbehandlung erstarrender Metallschmelzen ermöglichten. Die erforderlichen Vibrationstische wurden aus verfügbaren Baugruppen aufgebaut und anforderungsgemäß modifiziert.

3.1. Vibrationstische zur Schmelzebehandlung

3.1.1. Vibratoren zur Durchführung der experimentellen Arbeiten

Die verwendeten Vibrationstische wurden durch drei verschiedene Arten von Vibratoren angeregt. Diese ermöglichten es, die Einflussparameter in einem breiten Spektrum im Gesamtprozess zu variieren. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Vibratortypen, die bei den Versuchen zur Anwendung kamen, näher charakterisiert.

Typ 1: Druckluft-Rollenvibrator

Die Vibration wird durch die Fliehkraft eines zylindrischen Rotors erzeugt, der durch Druckluft angetrieben mit hoher Geschwindigkeit auf einer Stahlbahn umläuft. Je nach Druckluftzufuhr können Frequenzen von ca. 200 bis 250 Hz erreicht werden.

Mit diesen Vibratoren können keine harmonischen Schwingungen erzeugt werden. Es traten Beschleunigungsspitzen auf, die teilweise zur Zerstörung der Form führten und die Registrierung von Prozessparametern unmöglich machten. Dadurch wäre

auch die mögliche Übertragbarkeit auf praxisrelevante Bedingungen nicht realisierbar gewesen. Aus diesen Gründen wurden sie nur zu Testzwecken verwendet.

Typ 2: Druckluft-Kolbenvibrator

Druckluft-Kolbenvibratoren erzeugen harmonische Schwingungen. Der gegen ein Luftpolster arbeitende frei fliegende Kolben weist einen niedrigen Geräuschpegel auf. Durch die Regelung der Druckluftzufuhr kann die Frequenz im Bereich von 26 bis 35 Hz variiert werden. Durch eine spezielle Oberflächenbehandlung von Kolben und Bohrung haben diese Vibratoren eine besonders hohe Lebensdauer.

Der Nachteil dieser Vibratoren besteht in der begrenzten Variationsmöglichkeit der Prozessparameter.

Typ 3: Elektrovibrator mit Frequenzumrichter

Diese Dreiphasen-Elektrovibratoren lassen sich mit Hilfe des Frequenzumrichters stufenlos von 0 bis 100 Hertz regeln. Die Arbeitsweise dieser Vibratoren ist äußerst geräuscharm. Durch Veränderung der Lage der Unwuchtscheiben zueinander ist es möglich, die Erregerkräfte in einem breitem Spektrum zu variieren.

3.1.2. Aufbau der verwendeten Vibrationstische

3.1.2.1. Labor-Vibrationstisch

Mit Hilfe einer einfachen Versuchseinrichtung sollte in ersten Versuchen festgestellt werden, ob und in welchem Maße die erstarrende Schmelze durch einen Vibrationseintrag beeinflusst wird. Der Aufbau dieses Versuchstisches ist im Bild 15 dargestellt.

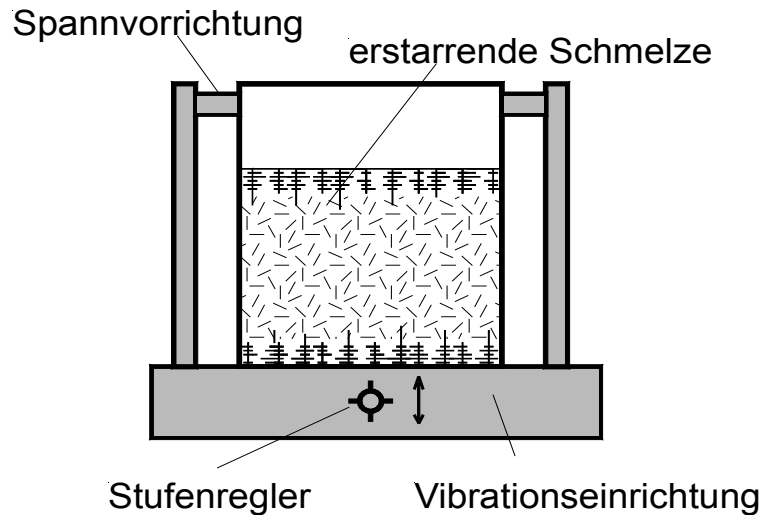


Bild 15 : Einfache Versuchseinrichtung zur Durchführung von Vibrationsversuchen

Mit dieser Versuchseinrichtung ist ein Schwingungseintrag mit folgenden Parametern möglich:

- Schwingungseintrag vertikal
- Frequenz 100 Hz
- Beschleunigung 0,95 bis 2,35g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
- Amplitude 0,025 bis 0,06 mm (in 10 Stufen)
- Harmonische Schwingungen
- Variation der Schwingungsdauer und des Energieeintragszeitpunktes

Die Spannvorrichtung dient dazu, den Tiegel oder die Sandform formschlüssig mit der Vibrationseinrichtung zu verbinden, um die harmonischen Schwingungen nicht durch Eigenbewegungen zu überlagern.

Diese Versuchseinrichtung erlaubt nur die Variation der Beschleunigungen bzw. Amplituden. Andere Parameter, wie zum Beispiel die Schwingungsrichtung oder die Frequenz können nicht verändert werden. Außerdem sind der Größe und der Masse der Probekörper und Versuchsobjekte enge Grenzen gesetzt. Aus diesen Gründen war dieser Vibrationstisch nur für erste Testzwecke verwendbar.

3.1.2.2. Vibrationstisch zur Durchführung kleintechnischer Versuche

Um auch andere Versuchsparameter variieren zu können, wurde für die weiteren Untersuchungen ein Vibrationstisch aufgebaut, der die Verwendung unterschiedlicher Vibratoren erlaubt. Diese können sowohl unten, wie im Bild 16 gezeigt, als auch seitlich angebracht werden. Dadurch werden die Realisierung verschiedener Schwingungsarten und die Veränderung der Schwingungsrichtung möglich.

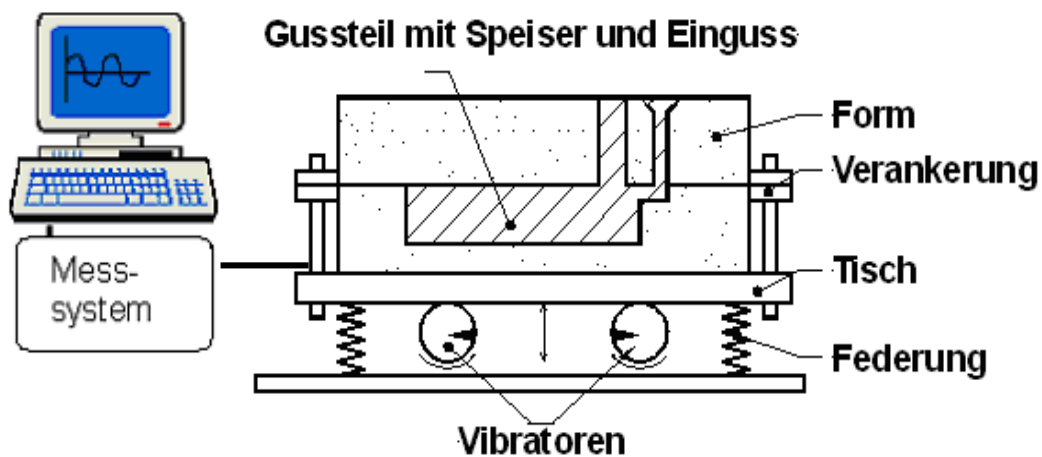


Bild 16: Vibrationstisch 2 mit Messeinrichtung

Die folgenden Versuchsparameter können durch diese Versuchseinrichtung variiert werden:

- Frequenz
- Amplitude
- Beschleunigung
- Schwingungsrichtung
- Schwingungsdauer
- Schwingungsart

Durch die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten bestand die Möglichkeit, die physikalische Schmelzebehandlung von Metallschmelzen durch Vibration umfassender zu untersuchen. Dabei waren aber die Variationsmöglichkeiten von den jeweiligen Vib-

ratoren abhängig. Außerdem konnte nur eine bestimmte Größe des schwingenden Systems verwendet werden, was zu Einschränkungen hinsichtlich des Versuchsprogramms führte.

3.1.2.3. Vibrationstisch für die Vorbereitung der industriellen Umsetzung

Um die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf betriebliche Größenordnungen testen zu können, machte sich die Verwendung größerer Formkästen und deshalb eines größeren Versuchstisches erforderlich. Damit konnten die Grenzen der Anwendbarkeit auf weitere reale Gussteile erweitert werden. Der Grundaufbau entspricht prinzipiell dem im Bild 16 dargestellten Vibrationstisch. Der Tisch ist mit 6 Magnetscheiben versehen, die bei Aktivierung die Arretierung der jeweiligen Form stark vereinfachen.

Bei diesem Vibrationstisch besteht außerdem durch Aufsetzen einer Kippvorrichtung die Möglichkeit, die Kombination von Kippguss und physikalischer Schmelzebehandlung durch Vibration zu untersuchen.

Beim Kippguss befindet sich die Form auf einer der Größe des Kastens entsprechenden Kippvorrichtung, die mit dem Vibrationstisch gekoppelt ist. Unmittelbar vor dem Gießen bringt man die Form durch Betätigung der Kippvorrichtung in die Gießstellung, indem sie dabei um etwa 30° bis 35° nach der Eingussseite geschwenkt wird. Nach dem Angießen wird die Form unter stetigem Vollhalten des Eingusstümpels wieder in die waagerechte Lage zurückgekippt.

Gleichzeitig wird der Energieeintrag durch die Vibration aktiviert. Nach Beendigung des Gießvorganges wird der Kipptisch je nach Art des Gussteils und der Legierung um 35° bis 60° nach hinten gekippt. Der Einguss liegt nun oberhalb des Gussstückes (Bild 17). Er kann damit gleichzeitig als Speiser wirken und ist in der Lage, infolge des erhöhten metallostatistischen Druckes, das Gussstück besser zu speisen.



Bild 17: Kippguss bei Gießbeginn



Kippguss nach Gießende

Bei diesem Vibrationstisch wurden die in 3.1.1 beschriebenen Elektrovibratoren mit Frequenzumrichter verwendet.

3.1.3. Messtechnik zur Ermittlung der Vibrationsparameter

Bei jedem Versuch wurden Schwingungskurven aufgezeichnet. Die Aufnahme der Schwingungsparameter erfolgte über Beschleunigungsaufnehmer, die an die jeweilige Versuchseinrichtung angekoppelt wurden. Um mit diesen Aufnehmern die Schwingungskurven aufzeichnen und auswerten zu können, ist ein entsprechendes Messwerterfassungssystem nötig. Dieses Messwerterfassungssystem enthält eine Multifunktionskarte mit 16 asymmetrischen bzw. 8 differentiellen Eingangskanälen, ein Thermoelement-Anschluss-Panel sowie einen portablen Computer und eine Messwerterfassungs- und Analysesoftware. Das Bild 18 zeigt ein Foto vom verwendeten Messplatz.

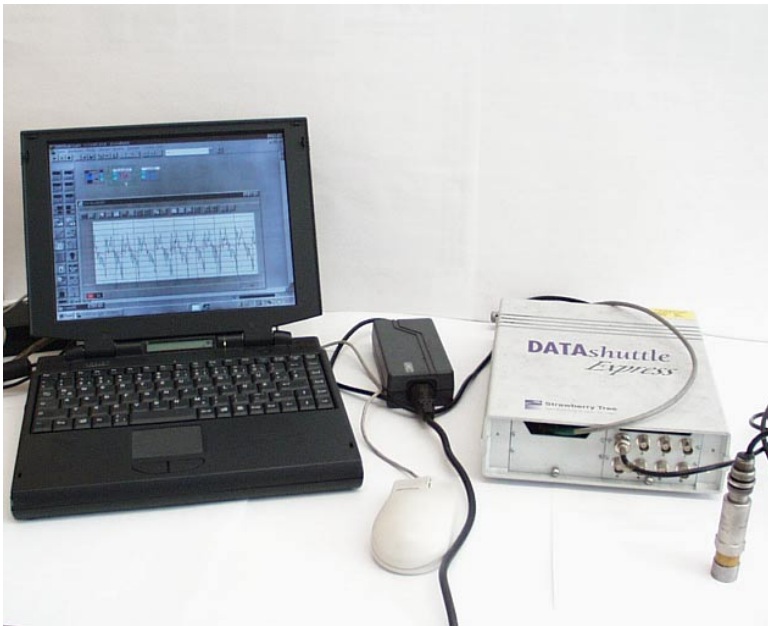


Bild 18: Messplatz zur Aufnahme von Schwingungskurven

Für die Aufnahme und Analyse der Daten stand die Software DasyLab zur Verfügung. Die Schwingungskurven erlauben das direkte Ablesen der Beschleunigung B und der Frequenz f . Die Amplitude A kann daraus über die Beziehung

$$B = A \omega^2 \quad (\omega = 2 \pi f) \quad (1)$$

berechnet werden. Eine beispielhafte Schwingungskurve ist im Bild 19 zu sehen.

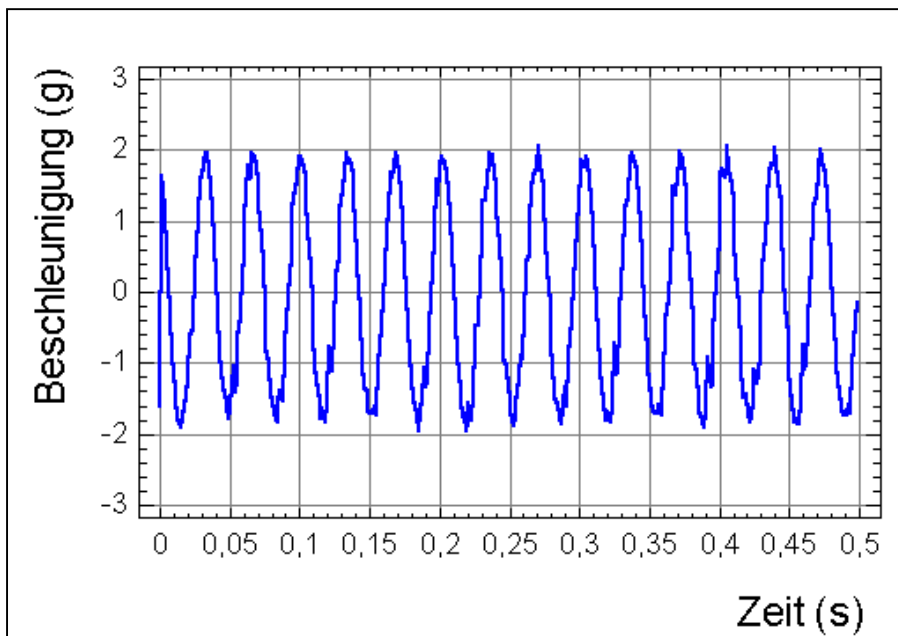


Bild 19: Schwingungskurve zur Ermittlung der Schwingungsparameter

Die Angabe der Vibrationsbeschleunigung erfolgt üblicherweise als Vielfaches der Erdbeschleunigung.

Der physikalische Zusammenhang zwischen Frequenz, Amplitude und Beschleunigung und dessen Auswirkungen auf die Vibrationsverdichtung von Formsand wurden in der Praxis bereits umfangreich untersucht und sind im Bild 20 dargestellt [76, 77].

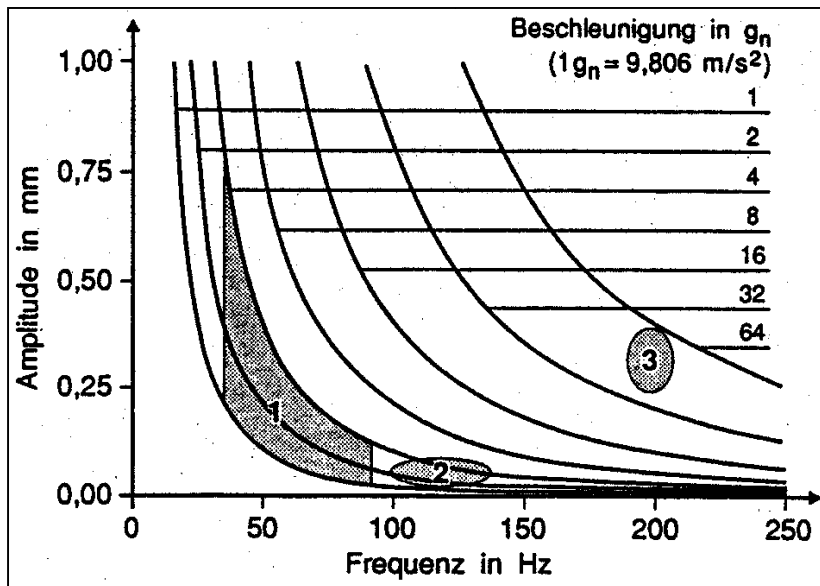


Bild 20: Bereiche der Vibrationsverdichtung von Formstoffen

3.2. Einfluss der Vibrationsparameter auf den Kristallisationsprozess

3.2.1. Versuche mit einer Modellflüssigkeit

Modellversuche dienen dazu, die in der Praxis auftretenden Erscheinungen besser zu erklären. Da die Erstarrung metallischer Schmelzen visuell nicht beobachtet werden kann, wurden zunächst Versuche mit einer durchsichtigen Modellsubstanz durchgeführt. Es handelte sich um eine übersättigte Lösung, die bei sinkenden Temperaturen dendritische Kristalle ausscheidet. Ohno [51] und McCay [78] berichten über entsprechende Untersuchungen mit Modellsubstanzen.

Für die Modellversuche wurde ein Gemisch aus Ammoniumchlorid und Wasser verwendet. Ammoniumchlorid weist bei Raumtemperatur eine kubisch-flächenzentrierte Struktur auf. Die maximale Löslichkeit des Ammoniumchlorid in Wasser beträgt

bei 20 °C 7 mol/l,

das entspricht:

37,4 g/100 ml.

Davon ausgehend wurde für die $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ -Modellflüssigkeit das Lösungsverhältnis

50 g NH_4Cl /100 ml dest. H_2O

verwendet.

Dieses Gemisch aus Ammoniumchlorid und destilliertem Wasser wurde in einem Becherglas so lange erhitzt, bis die Flüssigkeit vollständig klar war. Im Laufe des anschließenden Abkühlungsprozesses bildeten sich weiße Kristalle, deren dendritisches Wachstum man verfolgen konnte. Es war möglich, die Keimbildung und das Keimwachstum zu beeinflussen, indem Energie mittels Schwingungen in die erstarrende Substanz eingebracht wurde. Der für die Modellversuche verwendete Vibrationsstisch entspricht der im Bild 15 schematisch dargestellten Versuchseinrichtung. Die Parameter Amplitude, Beschleunigung, Dauer der Behandlung sowie Zeitpunkt des Energieeintrages konnten damit einfach variiert werden.

Zur Auswertung und Dokumentation wurden einige der gebildeten Dendriten aus der Lösung entfernt und unter dem Stereomikroskop betrachtet sowie fotografiert.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass es erst ab einer bestimmten Grenzbeschleunigung möglich wurde, den Kristallisationsprozess zu stören. Bei Beschleunigungen oberhalb 2g sind die eingebrachten Schwingungen in der Lage zu verhindern, dass sich große Dendriten ausbilden.

Bei Einstellung geringerer Beschleunigungen oder beim Abkühlen ohne Vibration beginnt die Kristallisation an einigen Stellen am Boden des Becherglases und an der Oberfläche der Flüssigkeit, also dort, wo die größte Wärmeabfuhr auftritt. Ausgehend von diesen Zentren wachsen die Dendriten in alle Richtungen, bilden Äste, bis sie sich schließlich vernetzen und den ganzen Boden bedecken. Die an der Oberfläche gewachsenen Dendriten wachsen in die Lösung hinein.

Wird die Flüssigkeit mit Beschleunigungen größer als $2g$ vibriert, beginnt die Kristallisation sofort auch im Inneren der Schmelze. Es bilden sich an vielen Stellen in der Lösung gleichzeitig kleine Kristalle, die schneeflockenartig herumwirbeln und nur wenig weiterwachsen. Im Bild 21 sind Aufnahmen vom Verhalten der Lösung ohne und mit Vibration zu sehen.



ohne Vibration



mit Vibration

Bild 21: Modellsubstanz $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ im Becherglas

Das Bild 22 zeigt einzelne Exemplare der unvibrierten und vibrierten Kristallverbände.



ohne Vibration



mit Vibration

(Maßstab 1:10)

Bild 22: Dendritenverbände, herausgelöst aus Modellsubstanz $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$

Erfolgt der Vibrationseintrag zu einem Zeitpunkt, wo die Kristallisation schon begonnen hat, so kann der weitere Kristallisationsverlauf zwar gestört werden, aber vorhandene große Kristallverbände bleiben bestehen. Es brechen lediglich einige der Dendritenäste ab.

Wenn man diese Aussagen auf das Erstarrungsverhalten von realen Schmelzen überträgt, so lässt sich vermuten, dass es notwendig und sinnvoll ist, die Energie einzuleiten, bevor die Erstarrung bereits begonnen hat.

Weitere Untersuchungen erfolgten mit einer durchsichtigen Barrenform aus Acrylmaterial, die den Bedingungen einer Gießform angenähert war. Mit Hilfe dieser Form sollte untersucht werden, inwieweit das in der Literatur beschriebene Vorhandensein einer freien Gussstückoberfläche Voraussetzung für eine erfolgreiche Schwingungsbehandlung ist.

Bei dieser nach oben geschlossenen Form traten die beschriebenen Effekte wesentlich geringer auf. Die sich vorwiegend am Boden der Form gebildeten Kristalle konnten nahezu unbeeinflusst von der eingebrachten Energie wachsen. Die Bewegung der Flüssigkeit reichte offenbar nicht aus, um die Kristallstrukturen zu zerstören oder das Kristallwachstum zu hemmen. Würde bei realen Schmelzen dieser Effekt ebenfalls auftreten, dann könnte die in [20] getroffene Aussage, dass der Effekt einer Vibrationsbehandlung von einer offenen Gussteiloberfläche abhängt, bestätigt werden. Allerdings ist dabei zu bemerken, dass durch die verwendete Versuchseinrichtung Grenzen hinsichtlich der Variation der Versuchsparameter gegeben waren. Inwieweit sich andere Frequenzen oder Beschleunigungen auf das Abkühlungsverhalten dieser Modellflüssigkeit auswirken, wurde nicht untersucht.

Diese Modellversuche dienten dem besseren Verständnis der bei der realen Erstarrung von Gussteilen ablaufenden Prozesse. Sie ermöglichten es, die Wirkungen eines Energieeintrages während der Erstarrung zu beobachten und Veränderungen durch Variation der Versuchsparameter zu erkennen.

Die Tatsache, dass die Kristalle unter der Einwirkung von Vibration im gesamten Volumen der Flüssigkeit gebildet wurden, lässt auf den von Buxmann in [21] beschriebenen Effekt der dynamischen Keimbildung als Ursache der Kornfeinung schließen. Es wird beschrieben, dass bei der dynamischen Keimbildung durch mechanischen

Einfluss Keime entstehen, ohne dass bereits früher erstarrte Substanz an dem Mechanismus beteiligt ist. Obwohl die Ursachen dieses Mechanismus noch nicht vollständig geklärt sind, liegt diese Annahme nach den erfolgten Beobachtungen näher als die ebenfalls von Buxmann aufgestellte Theorie der Keimmultiplikation.

Dass der gleiche Effekt bei den Versuchen mit der Barrenform deutlich weniger auftrat, ist möglicherweise auf eine unzureichende Beschleunigung zurückzuführen.

3.2.2. Einfluss der Vibrationsparameter auf den Erstarrungsablauf von Gusswerkstoffen

An zylindrischen Probekörpern wurden Untersuchungen zum Erstarrungsverhalten verschiedener Legierungen unter Vibrationsbehandlung durchgeführt. Das Ziel der Untersuchung bestand in der Ermittlung des Einflusses der Vibration bzw. der Vibrationsparameter auf den Erstarrungsablauf von Legierungen mit unterschiedlichem Erstarrungstyp.

Folgende Werkstoffe wurden für die Untersuchungsreihen ausgewählt:

Werkstoff	Abstichtemperatur
Al99,99	720°C
AlSi7Mg (untereutektisch)	700°C
AlSi12 (eutektisch)	650°C
AlSi20 (übereutektisch)	750°C
Zn	430°C
CuSn5Zn5Pb5 (Rotguss)	1180°C

Mit dieser Werkstoffpalette wurden sowohl Werkstoffe mit unterschiedlicher Erstarrungsstruktur als auch mit verschiedenem Gitteraufbau ausgewählt. Kupfer und Aluminium sind Vertreter des kubisch-flächenzentrierten Gitteraufbaus, Zn weist eine hexagonal dichtest gepackte Struktur auf.

Die variablen Versuchsparameter waren dabei Frequenz und Beschleunigung, die untersuchten Zielgrößen waren der Temperaturverlauf während der Erstarrung, ins-

besondere die Ermittlung von Unterkühlung und Rekaleszenz, sowie die Gefügeausbildung.

Aus je einer Schmelze erfolgte bei allen Versuchsvarianten der Abguss von jeweils einer unvibrierten und einer vibrierten Kokille gleicher Geometrie (Höhe = 170 mm; \varnothing = 38 mm). Eine Kokille stand fest verankert auf einem Vibrationstisch und wurde während der Erstarrung vibriert. Im Bild 23 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Im thermischen Zentrum der Kokillen wurde je ein Thermoelement installiert.

Nach Erkalten der Probestäbe wurden diese zertrennt und Makroschliffe angefertigt.

Es kamen folgende Ätzmittel zur Anwendung:

1: 75 ml HCl	2: 100 ml H ₂ O	3: 50 ml H ₂ O	4: 90 ml H ₂ O
25 ml HNO ₃	15 ml HNO ₃	50 ml HCl	40 ml HNO ₃
5 ml HF	15 ml HCl		
	3 ml HF		

Am Werkstoff AlSi7Mg3 wurde zusätzlich der Einfluss einer Überhitzung auf 750°C untersucht.

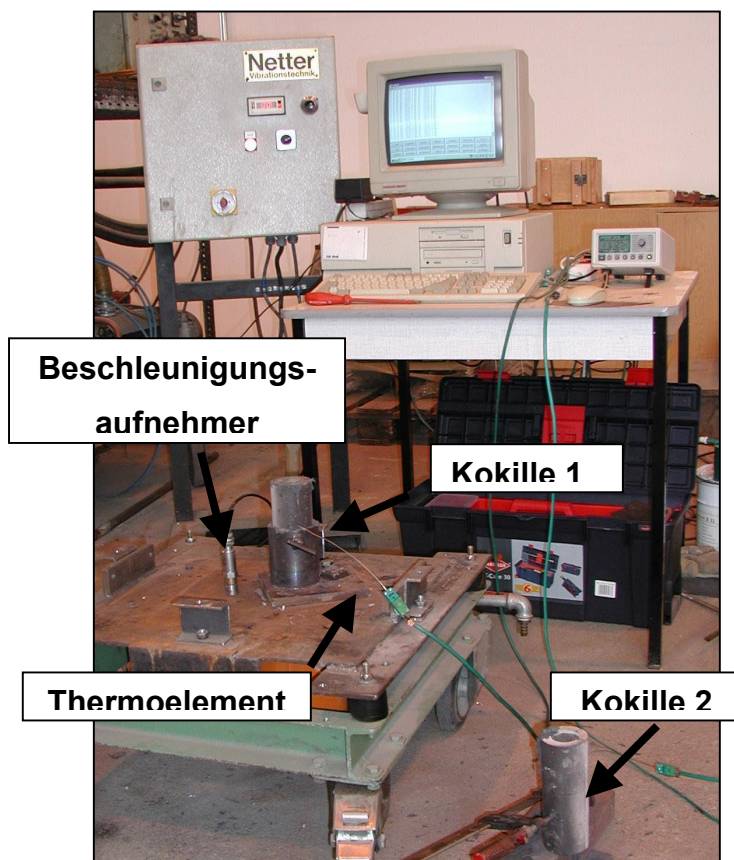


Bild 23: Versuchsaufbau Kokillenversuche

Die Variation der Vibrationsparameter erfolgte in Frequenzbereichen von 10 bis 40 Hertz. In der Tabelle 2 sind die Versuchsregime, die für alle Werkstoffe zur Anwendung kamen, aufgelistet.

Tabelle 2 : Versuchsdokumentation Kokillenversuche

Variante	Frequenz (Hz)	Beschleunigung (g)
1	10	0,9
2	20	1,8
3	30	2,8
4	40	6,0

Nach Auswertung der Temperaturkurven und Vergleich mit den Makroschliffen konnten folgende Aussagen getroffen werden:

Reines Aluminium und Zink zeigten keinerlei Unterschiede im Erstarrungsverhalten mit oder ohne Vibration. Die Veränderung der Vibrationsparameter hatte keinen Einfluss. Beim Aluminium wurden bei den vibrierten Proben die Erstarrung und Abkühlung beschleunigt. Es trat keine Unterkühlung auf (Bild 24). Beim Betrachten der Gefüge waren sowohl bei den unvibriert als auch bei den vibriert erstarrten Proben deutlich ausgeprägte Stengelkristalle in Wärmeabzugsrichtung erkennbar (Bild 25).

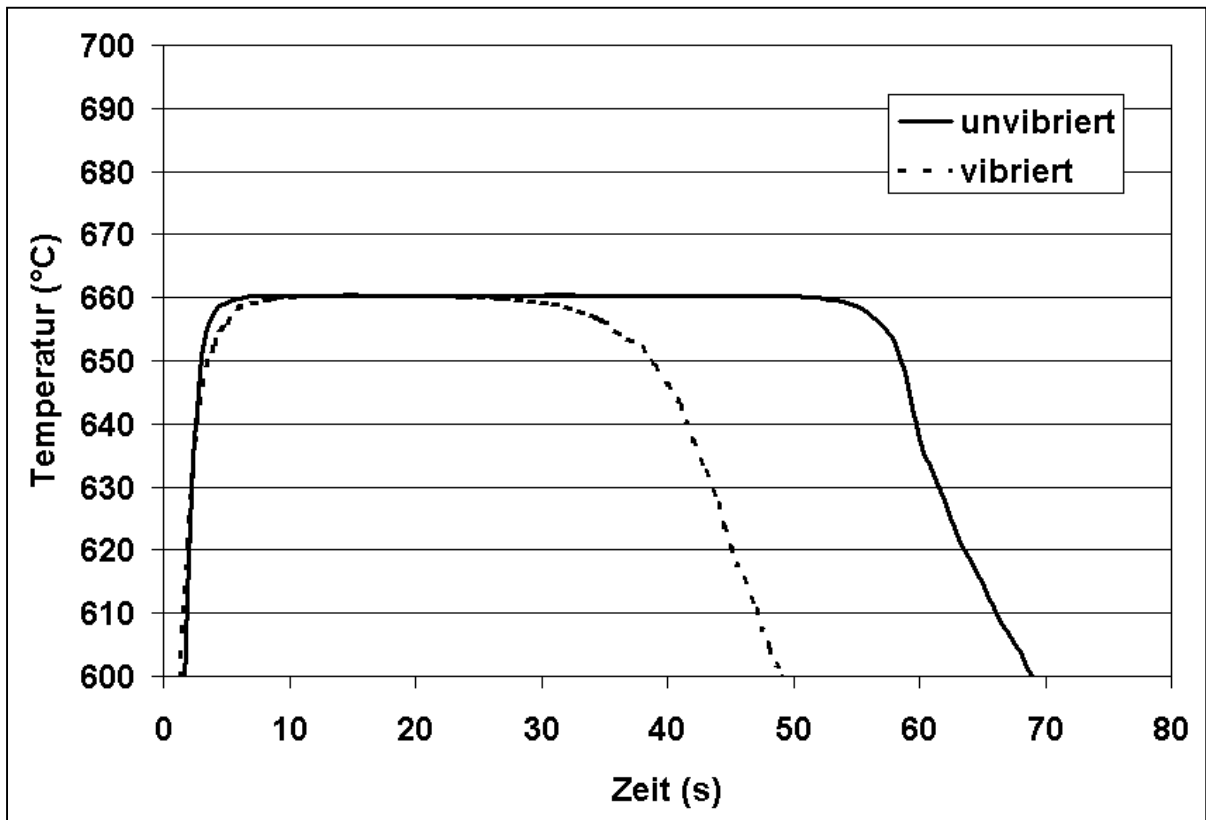
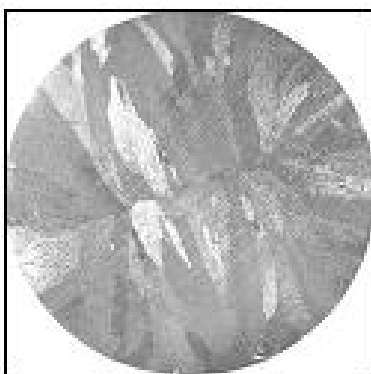
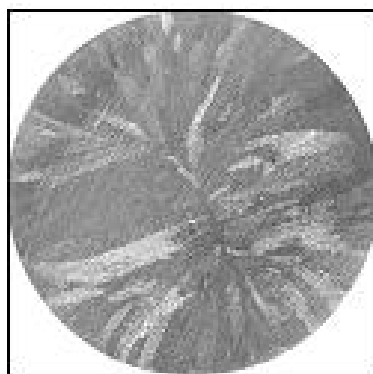


Bild 24: Temperaturkurven Al99,9; vibriert mit 20 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 720 \text{ }^{\circ}\text{C}$



unvibriert



vibriert

Bild 25: Al99,9; vibriert mit 20 Hz; geätzt mit 1

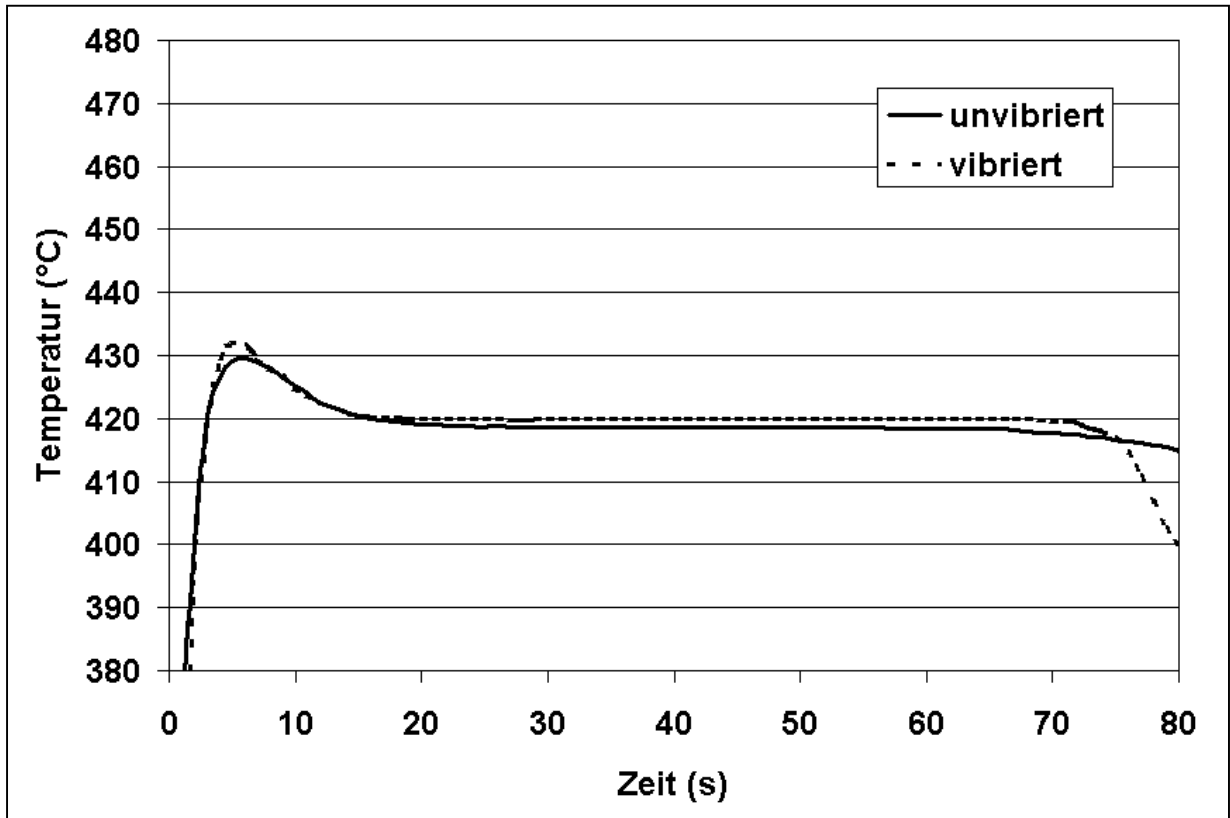
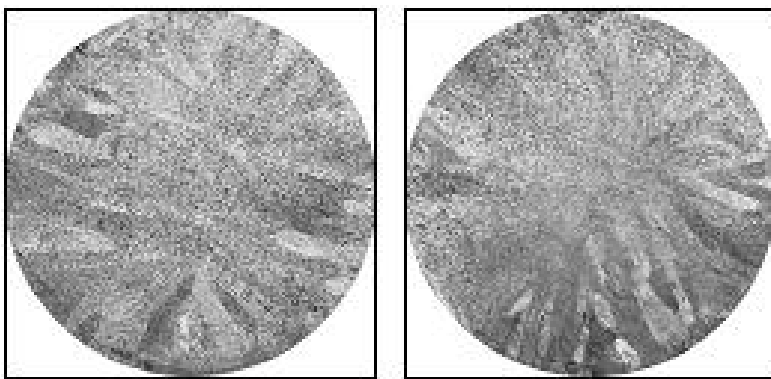


Bild 26: Temperaturkurven Zn, vibriert mit 20 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 440 \text{ }^{\circ}\text{C}$



unvibriert

vibriert

Bild 27: Zn; vibriert mit 20 Hz; geätzt mit 3

Die untereutektische Legierung AlSi7Mg ließ sowohl in der Abkühlungskurve als auch in der Gefügeausbildung Unterschiede zwischen der Erstarrung ohne und mit Vibration erkennen. Während die unvibrierte Probe eine geringe Unterkühlung aufwies, war an der vibrierten Probe keine Unterkühlung messbar. Bei den vibrierten Proben war die Erstarrung schneller beendet (Bild 28).

Im Unterschied zum Reinaluminium erstarrten die Proben aus AlSi7Mg globulitisch. Durch den Vibrationseintrag während der Erstarrung wurde bei Frequenzen über 20 Hz eine deutliche Steigerung der Feinkörnigkeit erreicht. Bei einem Eintrag von Energie bei der Erstarrung mit Frequenzen von 10 und 20 Hz waren dagegen keine Unterschiede in der Gefügeausbildung sichtbar.

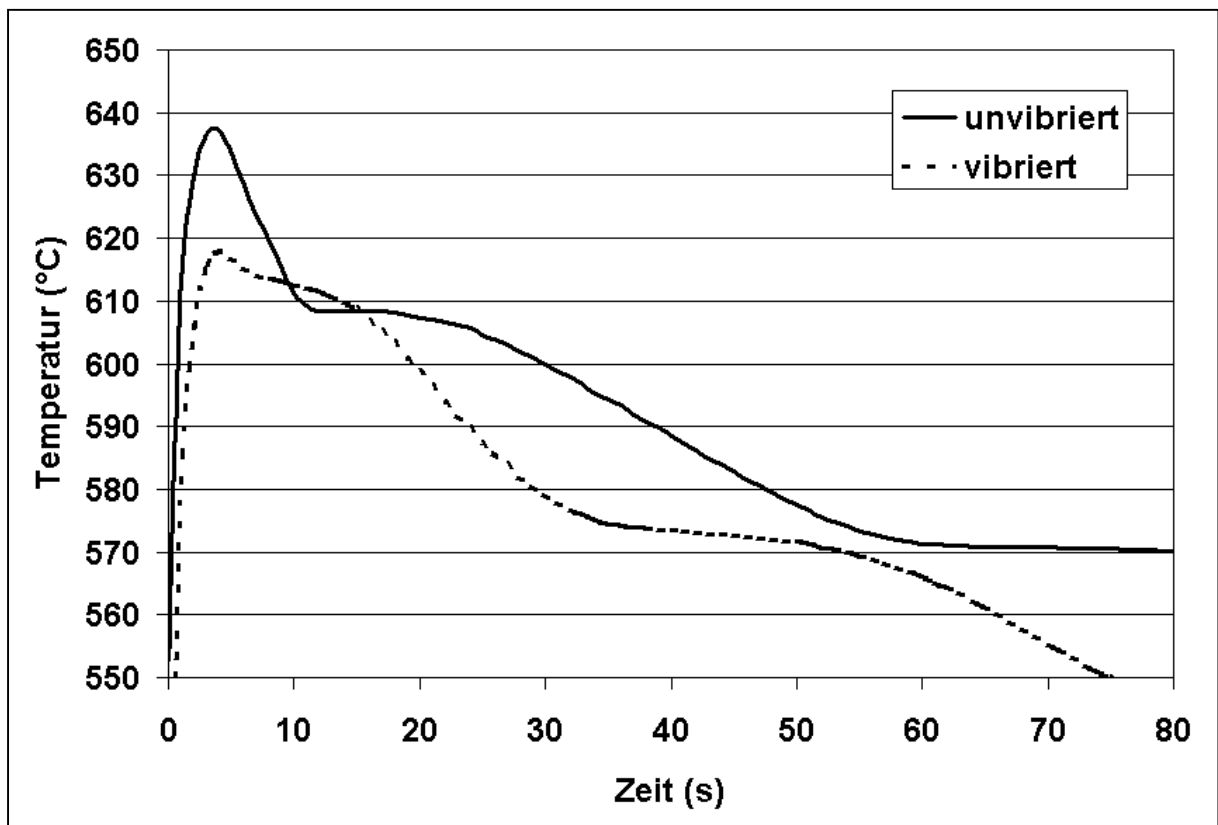


Bild 28: Temperaturkurve AlSi7Mg vibriert mit 30 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$

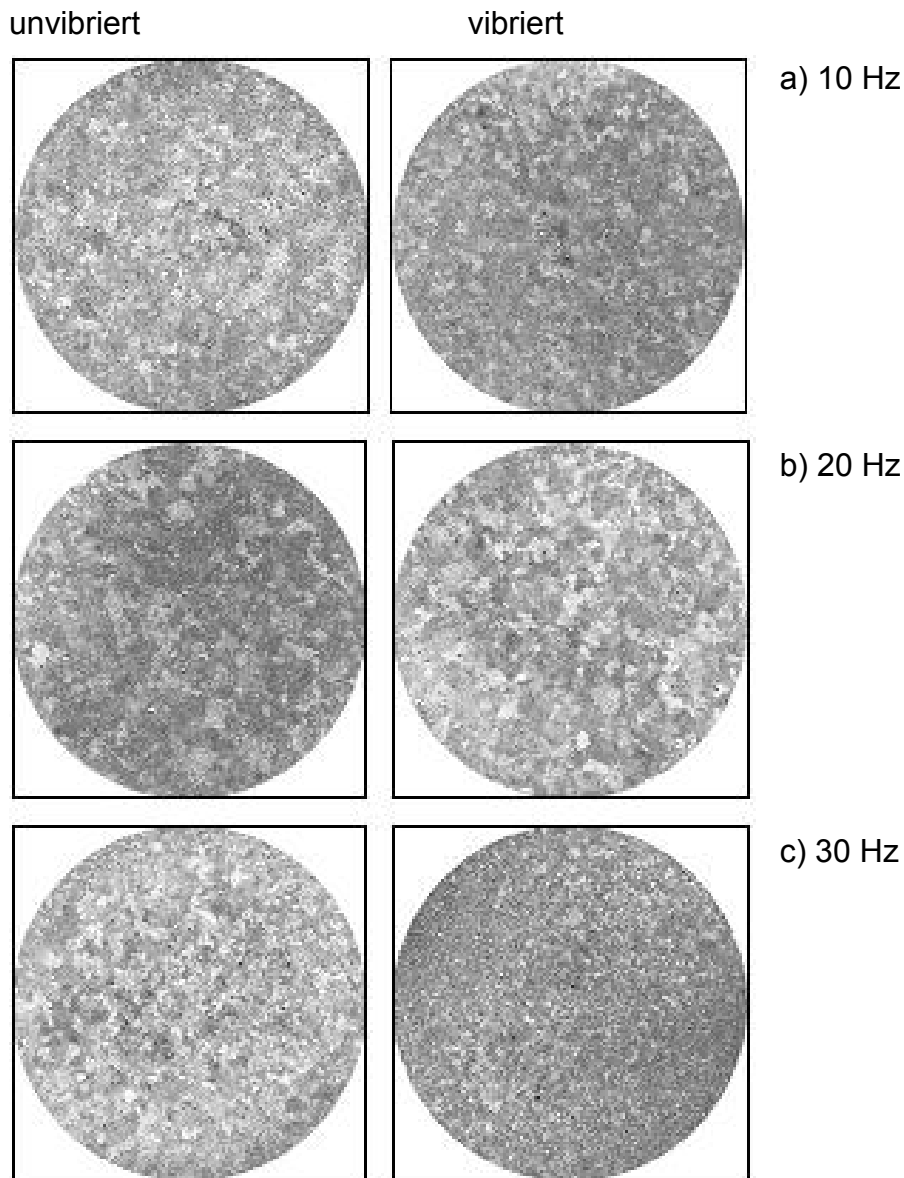


Bild 29: Gefüge AlSi7Mg, vibriert bei verschiedenen Frequenzen, $T_{\text{Abstich}} = 700^{\circ}\text{C}$; geätzt mit 1

Nach Überhitzung der AlSi7Mg - Schmelzen konnte kein Kornfeinungseffekt mehr erzielt werden. Dagegen wurde eine Kornfeinung durch Vibration erzielt, wenn die überhitzte Schmelze wieder auf eine Abstichtemperatur von 700°C abgekühlt wurde. Daraus ließ sich ableiten, dass nicht die Überhitzung an sich, sondern die Gießtemperatur für die Wirksamkeit des Kornfeinungseffektes durch Vibration von Bedeutung zu sein scheint.

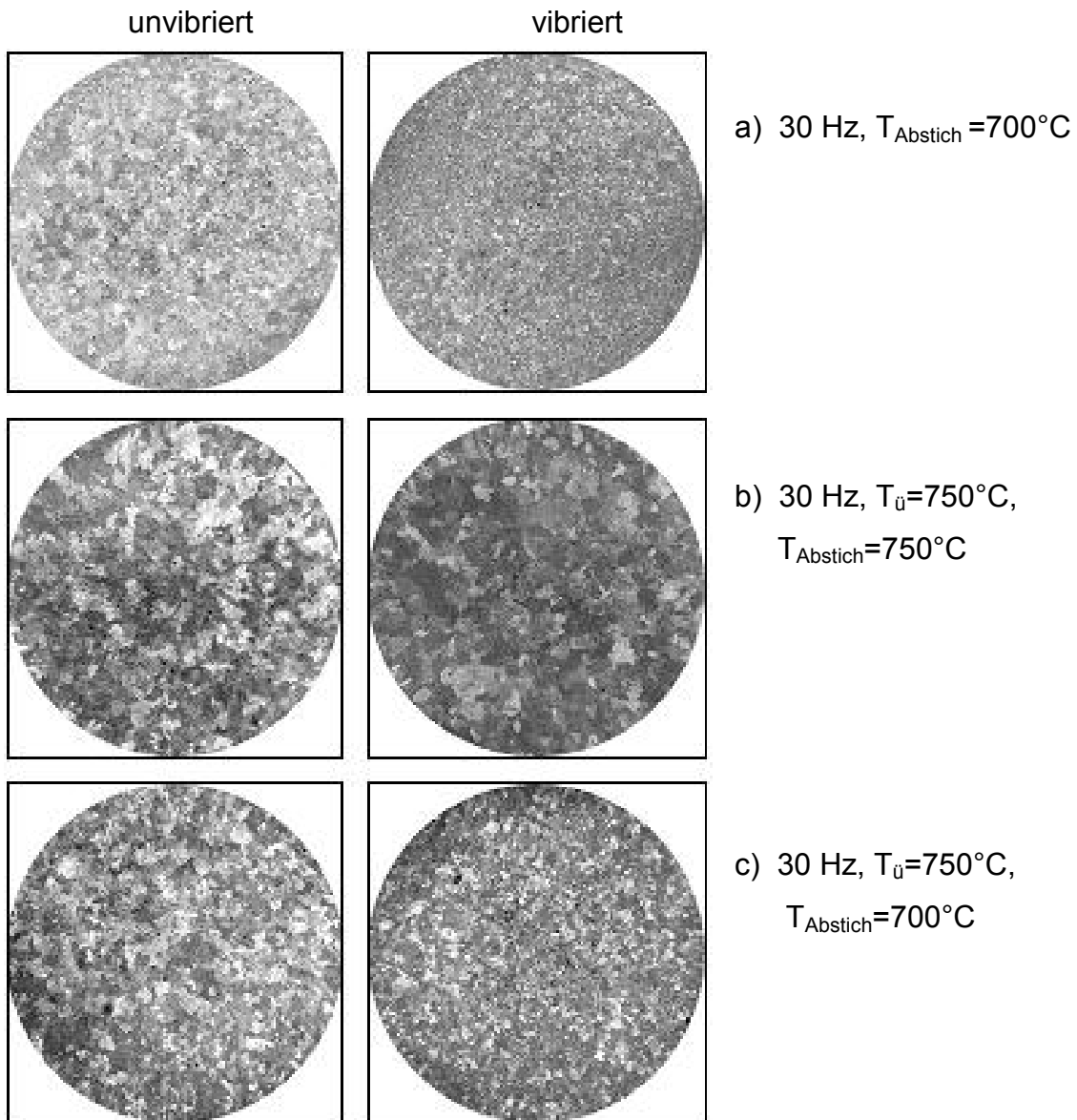


Bild 30: AlSi7Mg; geätzt mit 1

Die größten Unterschiede im Abkühlungsverlauf von unvibrierten und vibrierten Proben konnten an der eutektischen Legierung AlSi12 nachgewiesen werden. Während in der unvibrierten Probe eine Rekaleszenz von 7,8 K auftrat, erstarrte die mit 40 Hz vibrierte Probe vollständig ohne Rekaleszenz. Außerdem erfolgte die Erstarrung der vibrierten Probe deutlich schneller als die der unvibrierten Probe. Es konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht festgestellt werden, inwieweit durch die Vibration der Wärmeübergang an die Kokille verbessert werden konnte. Im Schliiffbild wurde sichtbar, dass durch die Vibration eine Feinung des Gefüges eintrat. Das unvibrierte Gefüge zeigt am Rand Stengelkristalle in Wärmeabzugsrichtung und Globuliten im inneren Bereich, das vibrierte weist ein einheitlich feinkörniges Gefüge auf.

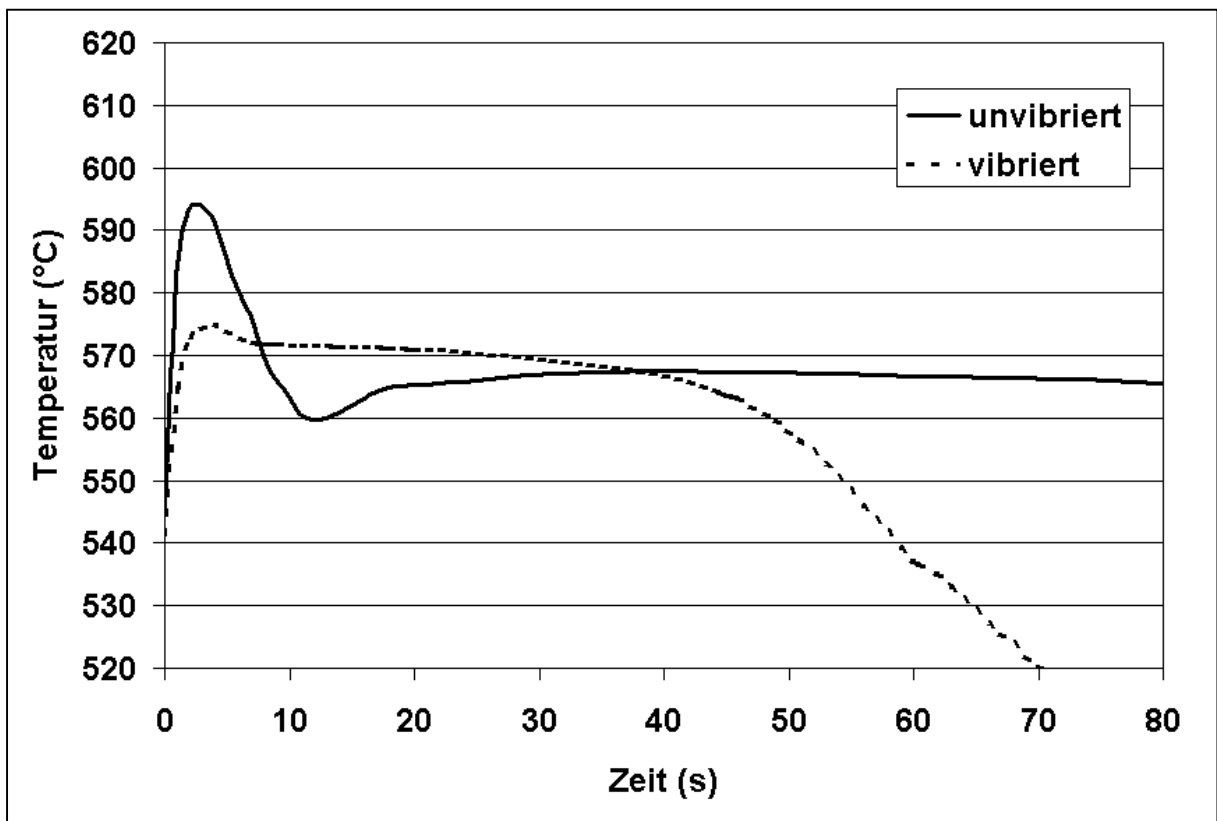
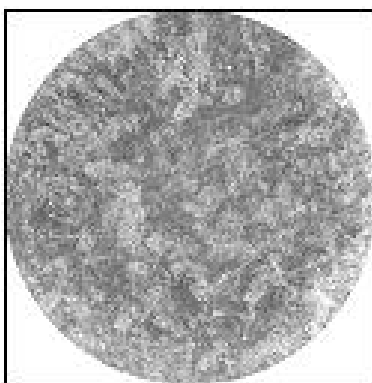
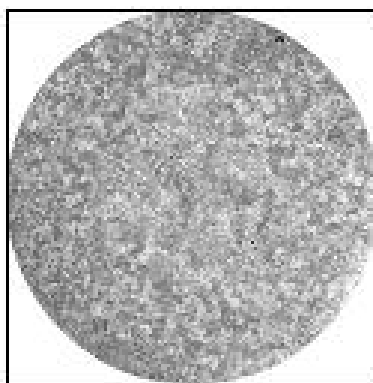


Bild 31: Temperaturkurve AISi12 vibriert mit 40 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 650 \text{ } ^\circ\text{C}$



unvibriert



vibriert

Bild 32: AISi12; 40 Hz; geätzt mit 2

Die übereutektische Legierung AlSi20 zeigte keine Unterschiede im prinzipiellen Verlauf der Abkühlungskurven, auch hier erstarrte die vibrierte Probe deutlich schneller (Bild 33). In den durchgeführten Versuchen trat ein feinkörniges Gefüge sowohl im unvibrierten als auch im vibrierten Zustand auf. Die Vibration während der Erstarrung führte zu keiner Verfeinerung des globulitischen Gefüges.

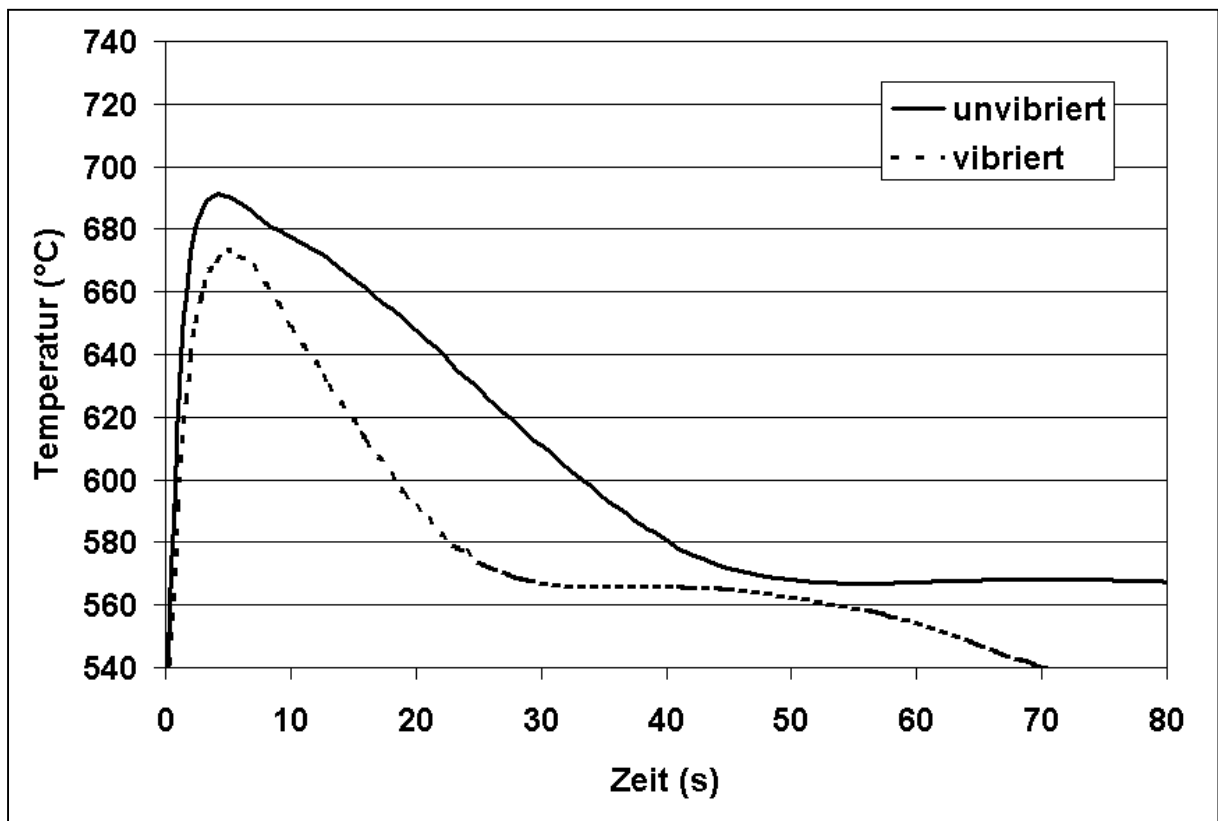


Bild 33: Temperaturkurve AlSi20 vibriert mit 40 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$

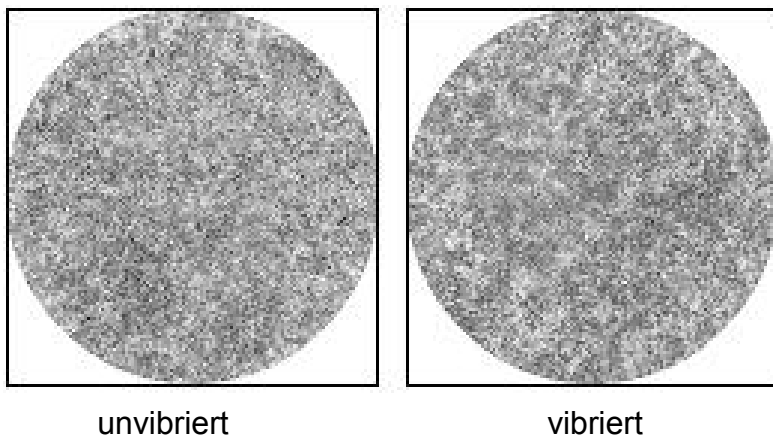


Bild 34: AlSi20; 40 Hz; geätzt mit 2

Die Rotgusslegierung CuSn5Zn5Pb5 ließ Unterschiede im Verlauf der Temperaturkurven erkennen. Während bei der unvibrierten Probe keine Rekaleszenz auftrat, war bei der vibrierten eine geringe Rekaleszenz erkennbar. Die dazugehörigen Makroschliffe zeigten unterschiedliche Gefügeausbildungen. Die unvibrierte Probe wies eine deutliche transkristalline Zone und in der Mitte globulare Kristalle auf, dagegen hatte sich bei der vibrierten Probe ein gleichmäßig feinkörniges Gefüge ausgebildet.

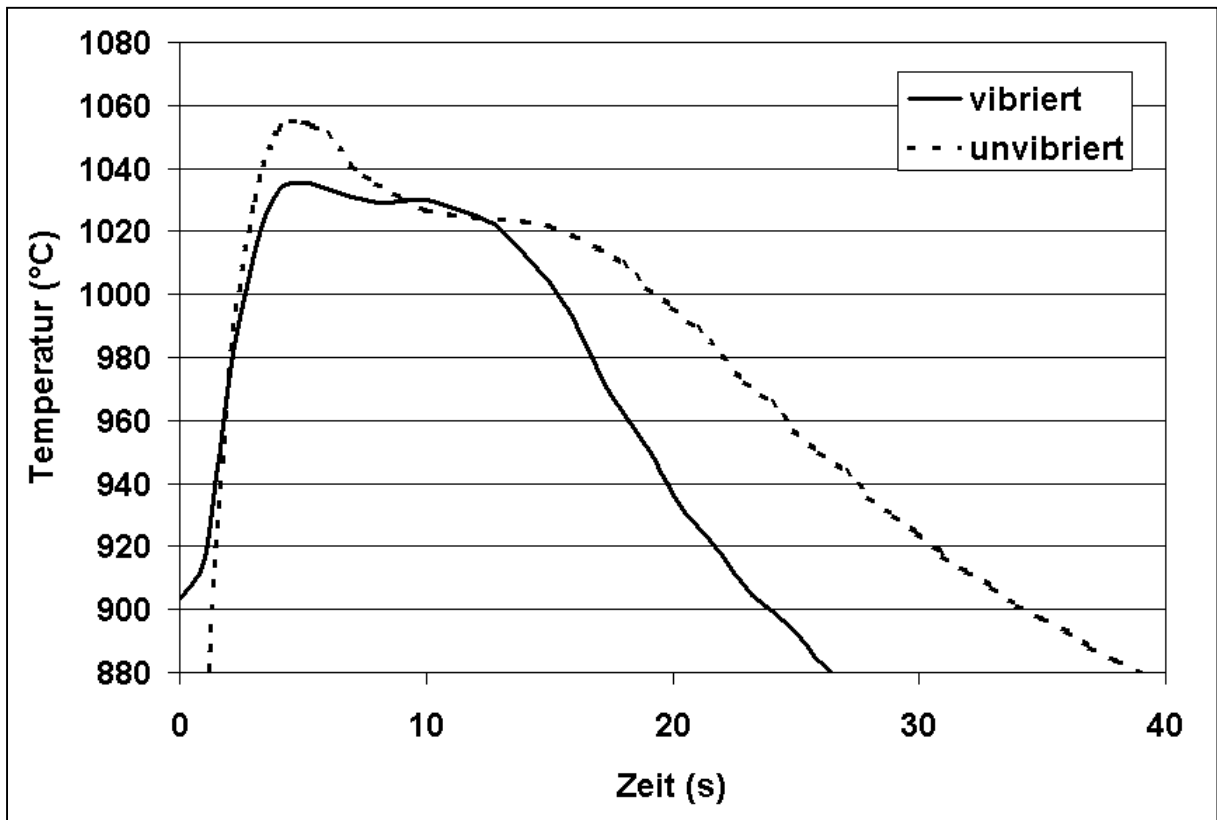


Bild 35: Temperaturkurve Rg5, vibriert mit 20 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 1180 \text{ °C}$



unvibriert

vibriert

Bild 36: Rg5; 20 Hz; geätzt mit 4

Die Untersuchungen ergaben, dass der Kornfeinungseffekt vom Erstarrungstyp abhängig ist. Die reinen Metalle (Aluminium, Zink) zeigten sowohl nach der unvibrierten als auch nach der vibrierten Erstarrung eine ausgeprägte Stengelkornstruktur. Die Abkühlungskurve wies keine messbare Rekaleszenz auf. Es konnte kein Einfluss einer Vibrationsbehandlung auf die Gefügebildung festgestellt werden. Aluminium und Zink sind Vertreter unterschiedlicher Gitterstrukturen, reagierten aber beide im gleichen Maße nicht auf eine Vibrationsbehandlung mit den angegebenen Parametern. Wenn man von der von Buxmann [21] beschriebenen Theorie der Keimmultiplikation als Ursache für den Effekt der Kornfeinung ausgeht, so kann man vermuten, dass die eingebrachte Energie nicht in der Lage war, von den Stengelkristallen einzelne Dendritenäste abzubrechen, damit sie als neue Kristallisationszentren wirken. In gleichem Maße konnten jedoch auch Prozesse, die der dynamischen Keimbildung zuzuordnen sind, nicht wirksam geworden sein.

Offenbar stimmen die Ergebnisse an reinen Metallen mit denen von Reif [17], sowie Seemann und Buxmann [74] überein, die feststellten, dass die Kornfeinung reiner Metalle durch eine Ultraschallbehandlung erst durch einen bestimmten Zusatz an fremder Substanz möglich ist. Sakwa u. a. berichten dagegen aber in [23] von einer erfolgreichen Kornfeinung von reinem Aluminium durch ein rotierendes Magnetfeld.

Legierungen mit breitem Erstarrungsintervall (untereutektische Al-Si-Legierungen, Rotguss) erstarrten globulitisch, in der Abkühlkurve konnte eine geringe Rekaleszenz nachgewiesen werden. Die Vibrationsbehandlung der Schmelze ergab teilweise eine Verringerung der Rekaleszenz und eine Kornfeinung des Gefüges. Bei der übereutektischen Legierung AlSi20 konnte dagegen keine weitere Kornfeinung erzielt werden.

Eutektische Legierungen erstarrten mit erheblicher Rekaleszenz, durch die Vibrationsbehandlung der erstarrenden Schmelze wurde diese nahezu vollständig unterdrückt. Die Unterschiede in der Rekaleszenz betragen je nach Behandlung zwischen 3,5 und 7,8 K. Eine deutliche Feinung des Gefüges trat bei der Behandlung mit 40 Hz auf, die Temperaturkurve wies keine messbare Unterkühlung mehr auf.

Aus den gewonnenen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass durch die Vibrationsbehandlung der Keimbildungsprozess unterstützt wird. Die deutliche Senkung von Unterkühlung und der Rekaleszenz bestätigen diese Annahme. Es könnte sein, dass die Energie, die durch die Vibration in die Schmelze gelangt, beim Kristallisationsprozess genutzt werden kann und somit die zur Keimbildung nötige Unterkühlung verringert. Inwieweit die Verbesserung des Keimhaushaltes auf die von Buxmann in [17] beschriebenen Theorien zurückzuführen sind, konnte nicht nachgewiesen werden. Es ist anzunehmen, dass beide Varianten (Keimmultiplikation und dynamische Keimbildung) für die ablaufenden Prozesse verantwortlich sind.

Es wurde nur ein begrenzter Bereich innerhalb der Versuchsparameter untersucht, sodass an dieser Stelle keine abschließenden Aussagen getroffen werden können. Deswegen kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei reinen Metallen mit anderen Versuchsparametern eine Veränderung der Gefügeausbildung möglich ist.

3.3. Einfluss der Vibration auf die Gefügeausbildung und Eigenschaften einer Rotgusslegierung

Die praxisrelevante Anwendung der Vibrationsbehandlung von Schmelzen setzt positive Effekte während des Gieß- und Erstarrungsprozesses sowie bei der Ausbildung der Werkstoffeigenschaften voraus. Zur Bewertung dieser Effekte ist die Wirkung der Vibrationsbehandlung auf die Gefügeausbildung sowie die mechanischen Eigenschaften weiter zu quantifizieren.

3.3.1. Werkstoffcharakteristik

Neben reinen Zinnbronzen wird in Schwermetallgießereien eine Gruppe von Mehrstoff-Zinnbronzen verarbeitet. Sie enthalten als Legierungselemente neben dem Zinn noch Zink und Blei. Die Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Legierungen stellen eine der bedeutendsten und am meisten verwendete Werkstoffgruppe der Kupfergusslegierungen dar. Diese Legierungen sind auch unter der Bezeichnung "Rotguss" bekannt.

Aus technischer Sicht handelt es sich bei diesen Werkstoffgruppen um Vierstofflegierungen. Da Blei aber nahezu vollständig unlöslich in den festen Legierungen ist, übt es wenig oder keinen Einfluss auf die Gefügephasen im System Kupfer-Zinn-Zink aus. Deshalb kann man die Werkstoffe dieser Gruppe als ternäre Kupfer-Zinn-Zink-Legierung ansehen.

Die in allen gebräuchlichen Kupfer-Zinn-Zink-Legierungen vorkommende Hauptphase ist der α -Mischkristall, in dem Zinn und Zink gelöst sind. Durch das breite Erstarrungsintervall dieser Legierungen kommt es zu einer Gefügeausbildung im Gusszustand, bei der die α -Mischkristall-Grundmasse zu Kristallseigerungen neigt.

Das Zinn ist ein starker Mischkristallhärter und führt zu einer noch größeren Festigkeitssteigerung als Zink. Zinn verbessert im Gegensatz zum Zink auch die Korrosionsbeständigkeit. Wenn das Zinn in Gehalten bis 10 % zugesetzt wird, erfolgen eine drastische Senkung der Liquidustemperatur und eine Verbreiterung des Erstarrungsintervalls.

Die zweite, in bleihaltigen Legierungen auftretende Phase ist das Blei. Die Menge und Verteilung des Bleis hängen vom Bleigehalt der Legierung, vom Erstarrungsintervall und von der Erstarrungsgeschwindigkeit ab. Durch das Blei werden im Wesentlichen drei Effekte bewirkt. Es erhöht die Gefügehomoogenität, gewährleistet in Lagerwerkstoffen ausreichende Notlaufeigenschaften und verbessert in Konstruktionswerkstoffen die Druckdichtheit von Gussstücken. Dieser zuletzt genannte Effekt ergibt sich dadurch, weil das Blei als niedrigschmelzende und unlösliche Komponente in der Lage ist, mikroskopische Schwindungshohlräume auszufüllen [79, 80, 81, 82, 83].

Die Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Legierungen gehören zur Gruppe der brei- oder schwammartig erstarrenden Legierungen mit breitem Erstarrungsintervall [8, 84].

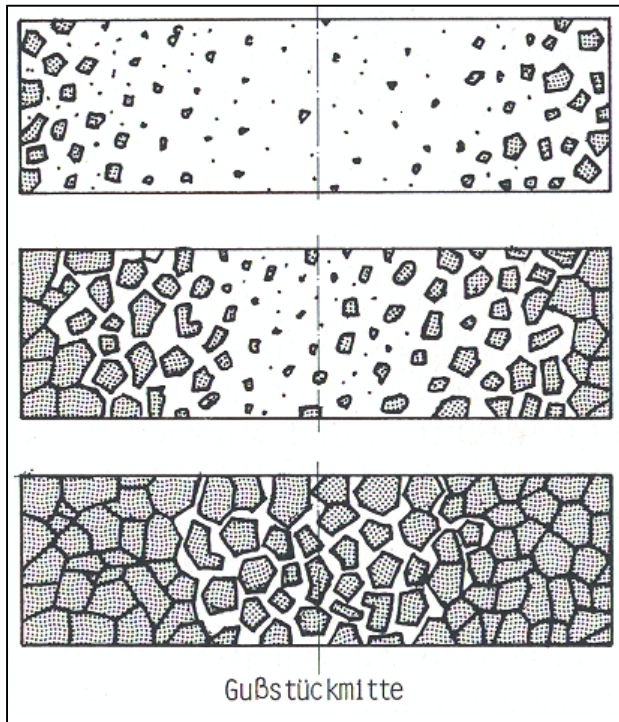


Bild 37: Breiartiger Erstarrungsablauf von Kupferlegierungen [79]

Bei breiartigem Verhalten beginnt die Erstarrung beim Unterschreiten der Liquidustemperatur mit dem Ausscheiden von Kristallen. Die mit deren Wachstum verbundene Volumenkontraktion kann durch eigene Nachspeisung ausgeglichen werden, da das Metall noch flüssig ist. Der Atmosphärendruck, der auf die Gussstückwände wirkt und die Bildung von Lunkerhohlräumen begrenzt unterbindet, unterstützt den Selbstspeisungsprozess. Wenn etwa 70 % der Legierung vollständig erstarrt sind, ist die Selbstspeisung beendet, da dann die gewachsenen Kristalle so groß sind, dass ein Materialtransport nicht mehr möglich ist. Die Selbstspeisung erstreckt sich auf etwa zwei Drittel der Erstarrungsschwindung der Legierung.

Die Restschmelze verteilt sich auf viele kleine, im gesamten Gussstück verstreute Bereiche. Da jeder Schmelzerest nach dem vollständigen Erstarren einen kleinen Mikrolunker hinterlässt, entsteht eine feinverteilte Mikroporosität (Bild 38).

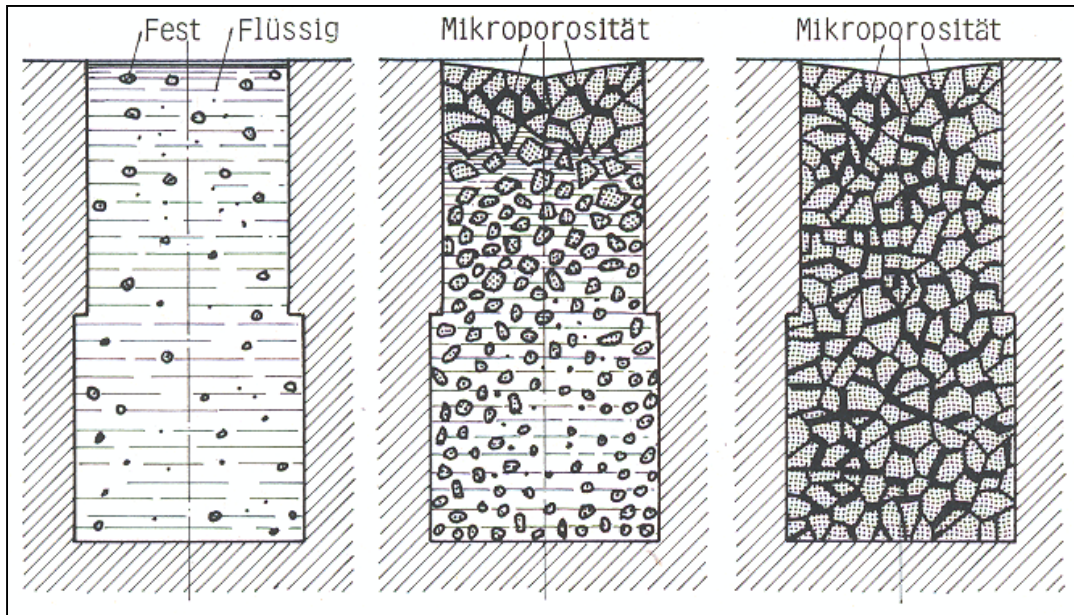


Bild 38: Selbstspeisung in Kupferlegierungen mit breitem Erstarrungsintervall [79]

Die Mikroporosität führt zu Problemen bei der Gussteilherstellung. Gerade bei Teilen, an die hohe Anforderungen hinsichtlich einer ausreichenden Druckdichtheit gestellt werden, spielen diese Probleme eine große Rolle.

Die Erzielung eines fehlerfreien Gefüges wird durch eine hohe Erstarrungsgeschwindigkeit begünstigt. Das ist durch kleine Wanddicken, eine niedrige Gießtemperatur und die gleichmäßige Verteilung der Wärme mittels Anwendung geeigneter Gießtechnik möglich. In [85] wird festgestellt, dass das Problem der Mikroporosität von der chemischen Zusammensetzung, der Gefügeausbildung, der Gießtemperatur und der Gießzeit abhängt.

Werden relativ dünnwandige Gussstücke (<10 mm) in Sandformen oder Kokillen vergossen, erstarren sie schnell genug, um eine dichte, porenfreie Gusshaut oder Oberflächenschicht zu bilden. Der Effekt der Selbstspeisung und des Atmosphärendruckes kann im Anfangsstadium der Erstarrung genutzt werden. Die inneren Bereiche erstarren langsamer und weisen oft die oben erwähnte Mikroporosität auf. Diese Mikroporosität ist aber im Gussstück so fein verteilt, dass sie nur mikroskopisch sichtbar wird. Werden solche Teile mechanisch nicht bearbeitet und damit die dichte

Gusshaut nicht zerstört, können sie trotz des ungünstigen Erstarrungsverhaltens druckdicht sein.

Wenn von dickwandigen Gussstücken Druckdichtheit und die Begrenzung der Lunkerporosität auf nicht sichtbare Defekte verlangt werden, ist das speisungstechnisch sehr schwer realisierbar. Alle Legierungen der breiartig erstarrenden Kupferwerkstoffe weisen differenzierte Grade von Undichtheit auf, wenn sie mit Geschwindigkeiten erstarren, die denen des Sandgusses entsprechen.

Untersuchungen haben ergeben, dass dickwandige Platten oder Stangen aus Rotguss nicht dichtgespeist werden konnten, egal, wie groß der oder die Speiser bemessen waren. Nur durch den Einsatz von Kühlkokillen war es möglich, ausreichend dichte Gussstücke zu erhalten. Thermodynamische Untersuchungen ergaben, dass Temperaturgradienten von mindestens 13 K/cm bei der Erstarrung notwendig waren, um eine Erstarrungsfront zu erzielen, bei der sich Speiser als nützlich erwiesen und zur Dichtspeisung beitrugen [82, 83].

Obwohl die Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Legierung CuSn5Zn5Pb5 durch ihr breites Erstarrungsintervall speisungstechnische Probleme mit sich bringt, hat ihr die günstige Kombination von Gießbarkeit, Bearbeitbarkeit und allgemeiner Anwendbarkeit zu einem breiten Einsatzspektrum verholfen. Gussteile aus diesen Legierungen weisen außerdem eine gute Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit auf. Sie werden unter anderem für Ventile, Wasserpumpenteile, qualitativ hochwertige Armaturen oder kleinere Zahnräder verwendet [85].

Die Untersuchungen zum Erstarrungsverhalten unter Vibration wurden an einer Rotgusslegierung mit folgender chemischer Zusammensetzung durchgeführt:

Sn	4 – 6 %	Ni	1 – 2 %
Zn	4 – 6 %	P	< 0,05 %
Pb	4 – 6 %	Fe	< 0,3 %
Cu	84 – 86 %		

3.3.2. Einfluss der Vibration auf die Gefügeausbildung

Rotgusslegierungen neigen in Abhängigkeit von der Kinetik des Wärmeentzuges stark zur dendritischen Erstarrung mit der bekannten Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Während die Wirkung der chemischen Kornfeinungsmethoden bei diesem Werkstoff umstritten ist, konnte in vorgenannten Versuchen (3.2.2) ein deutlicher Effekt der mechanischen Kornfeinung nachgewiesen werden. Im Folgenden wird der Einfluss der Vibration auf die Gefügeausbildung untersucht.

Die Bewertung des Vibrationseffektes erfolgte durch Bestimmung der Kornquerschnittsfläche im Gefüge. Die dafür erforderlichen metallografischen Untersuchungen der Rotgusslegierungen beinhalten das Präparieren der Proben und die Gefügeauswertung. Mit Hilfe von Makroschliffen wurden Aussagen über Korngrößen im Vergleich zu unbehandelt erstarrten Proben getroffen. Bereits bei visueller Betrachtung konnten die Korngrößen verglichen und Aussagen zum Erfolg einer Schwingungsbehandlung gemacht werden. Um die Korngrößen auch quantitativ beschreiben zu können, wurden sie mit Hilfe des Kreisverfahrens gemessen.

Bei diesem Verfahren wird ein Kreis mit bekanntem Flächeninhalt über ein Makroschliffbild bekannter Vergrößerung gelegt und die Anzahl der im Kreis befindlichen Körner und die Anzahl der von der Kreislinie geschnittenen Körner ausgezählt. Durch einfache Berechnungen kann man danach die mittlere Kreisfläche bestimmen.

$$F_m = \frac{F_k \cdot 10^6}{(0,67n + z) \cdot V} \quad F_k = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2)$$

F_m - Kornquerschnittsfläche

F_k - Kreisfläche

d - Kreisdurchmesser

n - Anzahl der von der Kreislinie geschnittenen Körner

z - Anzahl der von der Kreislinie eingeschlossenen Körner

V - Abbildungsmaßstab

Die so ermittelten Kornquerschnittsflächen konnten miteinander verglichen und in Hinblick auf ihre Abhängigkeit von der eingebrachten Vibrationsbeschleunigung analysiert werden.

3.3.2.1. Gefügeausbildung bei der Erstarrung im Schmelztiegel

Das Ziel der ersten Versuche unter Laborbedingungen bestand zunächst darin nachzuweisen, ob und in welchem Maße ein Vibrationseintrag in die erstarrende Rotgusschmelze einen Einfluss auf das Erstarrungsverhalten ausübt.

Für diese Untersuchungen wurde der Labor-Vibrationstisch verwendet. Das jeweilige Einsatzmaterial (2,5 kg) wurde in einem getrockneten, vorgewärmten Schmelztiegel im Doppelkammerofen erschmolzen. Nach Erreichen der gewünschten Temperatur (1100°C) erfolgte die Herausnahme des Tiegels aus dem Ofen sowie die Positionierung und Verankerung auf dem Vibrationstisch. Nach diesen Arbeitsschritten konnte die Vibration gestartet werden. In 5 Stufen wurden die Vibrationsparameter variiert (Tabelle 3). Es war nicht möglich, die Frequenz zu verändern. Zum Vergleich diente ein in Ruhe erstarrter Probekörper.

Tabelle 3: Versuchsparameter mit Labor-Vibrationstisch

Variante	Frequenz [Hz]	Beschleunigung [g]	Amplitude [mm]
1	100	0,95	0,024
2	100	1,2	0,030
3	100	1,4	0,035
4	100	1,85	0,046
5	100	2,35	0,060

Die sowohl in Ruhe als auch unter Vibration erstarrten Gusskörper wurden zertrennt und ausgewertet. An den polierten und geätzten Proben konnte man erkennen, dass die Proben, die mit Beschleunigungen von ca. 2g vibriert wurden, ein feinkörniges und über den Querschnitt gleichmäßiges Gefüge aufweisen. Alle anderen Proben haben ein grobkörniges Gefüge und zeigen keine Unterschiede zwischen unvibrierter und vibrierter Erstarrung, wobei die Korngröße vom jeweiligen Erstarrungsort abhängt.

Diese Beobachtungen decken sich mit den durchgeführten Modellversuchen. Man kann schlussfolgern, dass mit der beschriebenen Versuchseinrichtung beim Einsatz von Beschleunigungen, die kleiner als 1,5g sind, keine Effekte erzielt werden können. Dagegen führt die Verwendung der mit diesem Versuchstisch möglichen höchsten Stufen (Beschleunigungen 1,85g und 2,3g) zu einer deutlichen Verringerung der Korngröße.

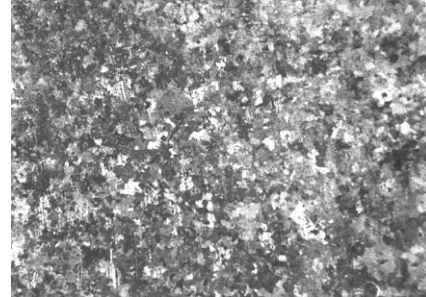


Bild 39: Unvibrierte Probe

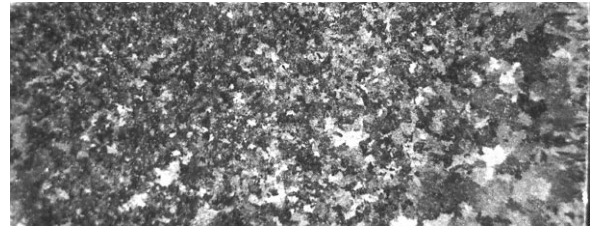
Vibrierte Probe

In der Literatur wird vielfach die Aussage getroffen, dass die Vibration der gesamten Sandform mit Vibration zu ihrer Zerstörung führt und das Verfahren deswegen in Frage gestellt wird [20, 22]. In ersten Voruntersuchungen mit einer tongebundenen Sandform wurde überprüft, inwieweit diese Befürchtungen zutreffen. Ein kleiner Formkasten mit den Abmessungen 150 x 150 x 140 mm wurde deshalb vorerst ohne Schmelze mit allen Stufen vibriert, ohne dass Schäden der Form festzustellen waren. Danach wurden zylindrische Probekörper in entsprechenden Formen abgegossen.

Auch bei diesen Probeteilen konnte bei Einstellung der vorgenannten Beschleunigungswerte (Tabelle 3) eine deutliche Gefügebeeinflussung festgestellt werden. Die unvibrierten Probekörper weisen ein grobkörniges Gefüge auf, während in den vibrierten eine deutliche Kornfeinung und ein über den Querschnitt gleichmäßig verteiltes Gefüge auftritt (Bild 40).



Bild 40: Unvibrierte Probe



Vibrierte Probe

(Sandform)

Die Mittelwerte von Kornquerschnittsflächen untersuchter Proben (Sandform) sind im Bild 41 gegenübergestellt.

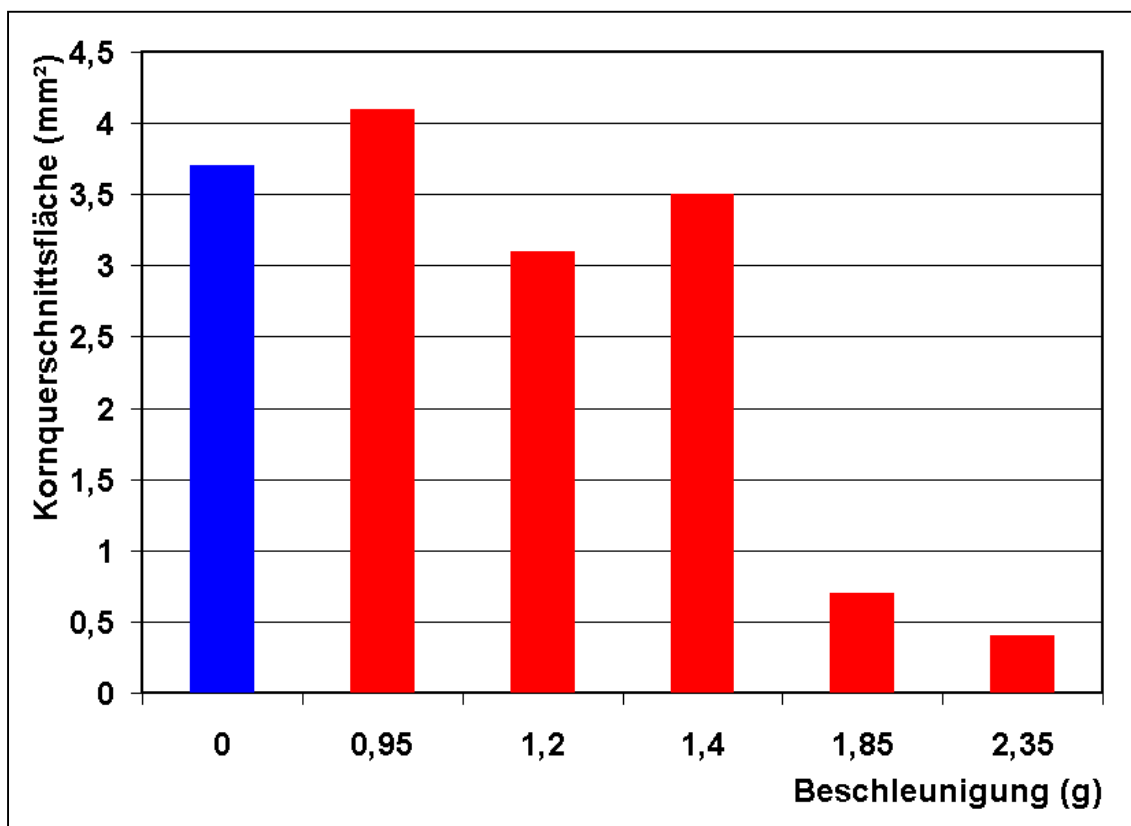


Bild 41: Kornquerschnittsflächen unvibrierter und vibrierter Probekörper, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5

Nachdem bei diesen ersten Vorversuchen sowohl im Schmelztiegel als auch in Sandformen ein deutlicher Einfluss einer Vibrationsbehandlung auf das Erstarrungsverhalten nachgewiesen und keine Beschädigungen der Sandformen zu verzeichnen waren, wurde mit Untersuchungen an technologischen Probegussteilen begonnen.

3.3.2.2. Gefügeausbildung am Barrenmodell

In der Literatur wird vielfach die Auffassung vertreten, dass eine Voraussetzung für den Erfolg einer Schwingungsbehandlung im erstarrenden Gussteil das Vorhandensein einer freien Gussstückoberfläche ist. Um diese Aussage zu überprüfen, wurde der Barren (Bild 42) sowohl ohne als auch mit einem nach oben offenen Speiser abgegossen. Weiterhin sollte an diesem Gussteil untersucht werden, bei welchen Parametern eine optimale Beeinflussung der Gefügeausbildung erfolgt. Dabei galt es, diese Ergebnisse anhand von Korngrößenvergleichen, der Ermittlung der Zugfestigkeiten sowie durch Dichteuntersuchungen zu untermauern.

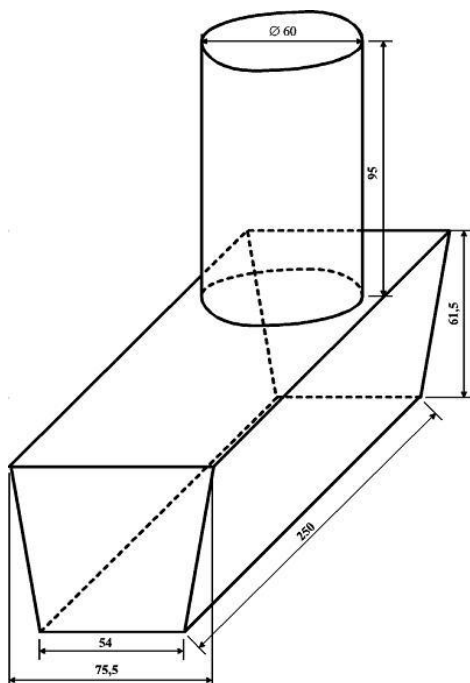


Bild 42: Gussteil Barren mit Speiser

In der Tabelle 4 sind die wichtigsten Versuchsparameter zusammengefasst. Diese Versuche wurden ausschließlich mit den in 3.1.1 beschriebenen Kolbenvibratoren durchgeführt. Auf vorangegangene Versuche mit Druckluft-Rollenvibratoren wird dabei nicht eingegangen, obwohl mit diesen ebenfalls kornfeinende Effekte zu verzeichnen waren. Da aber mit solchen Vibratoren keine harmonischen Schwingungen erzeugt werden können, war die Angabe von Parametern und damit die Reproduzierbarkeit nicht möglich.

Tabelle 4: Versuchsdokumentation Barren

Nr	Speiser		Druckluft (bar)	Frequenz (Hz)	Beschleunigung (g)	Amplitude (mm)
	ja	nein				
1	X		0	0	0	0
2	X		0,75	24	0,9	0,43
3	X		1,0	28	1,5	0,48
4	X		1,5	30	1,9	0,52
5	X		2,0	31	2,4	0,6
6		X	0	0	0	0
7		X	0,75	24	0,9	0,43
8		X	1,0	28	1,5	0,48
9		X	1,5	30	1,9	0,52
10		X	2,0	31	2,4	0,6

Für die Korngrößenvergleiche wurden Proben aus dem Randbereich und aus dem Bereich unter dem Speiser herausgetrennt und untersucht. Die Werte wurden gemittelt und im Bild 43 gegenübergestellt.

Es konnte festgestellt werden, dass beim Abguss sowohl ohne als auch mit Speiser eine Gefügebeeinflussung durch den Vibrationseintrag während der Erstarrung erfolgte. Dieses Ergebnis widerlegt damit die in der Literatur angegebene These, wonach eine nach oben offene Oberfläche für den Erfolg einer Schwingungsbehandlung ausschlaggebend ist. Es widerspricht aber den Beobachtungen bei den Modellversuchen. Das ist damit zu erklären, dass auch im Barrenmodell ohne Speiser im Ergebnis der Flüssigschwindung eine freie Oberfläche entsteht.

Die durch die Abkühlungskinetik bedingten Unterschiede in der Gefügebildung zwischen Rand und Speiserbereich des Gussteils durch die verschiedenen Abkühlungsbedingungen konnten durch den Vibrationseintrag minimiert werden, es bildete sich ein über den Querschnitt homogenes, feinkörniges Gefüge aus.

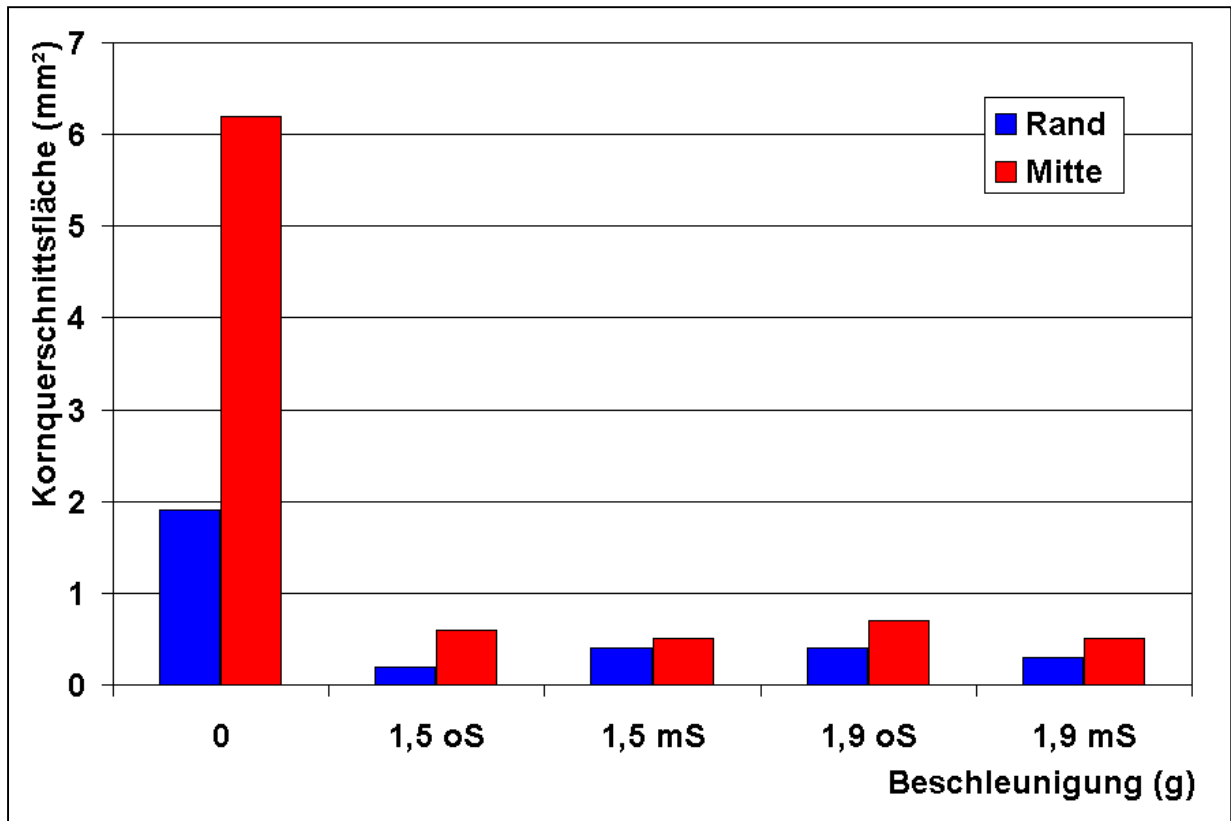


Bild 43: Kornquerschnittsflächen beim Barren, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5 (oS – ohne Speiser; mS – mit Speiser)

3.3.2.3. Wanddickeneinfluss am Stufenkeil

Die Einstellung des Gussgefüges bei der Erstarrung ist abhängig von der Kinetik des Wärmeentzuges und damit von der jeweiligen Wanddicke. Große Wanddickenunterschiede in einem Gussteil können durch die verschiedenen Erstarrungsbedingungen zu Problemen führen. Um den Einfluss einer Schwingungsbehandlung auf die Wanddickenabhängigkeit untersuchen zu können, wurde als weiteres Testgussteil ein Stufenkeil ausgewählt (Bild 44). Die 5 Stufen repräsentieren dabei Wanddicken von 4 bis 40 mm. Dadurch ist eine gute Aussage zum Einfluss einer Vibrationsbehandlung auf das Gefüge bei bestehenden Wanddickenunterschieden möglich.

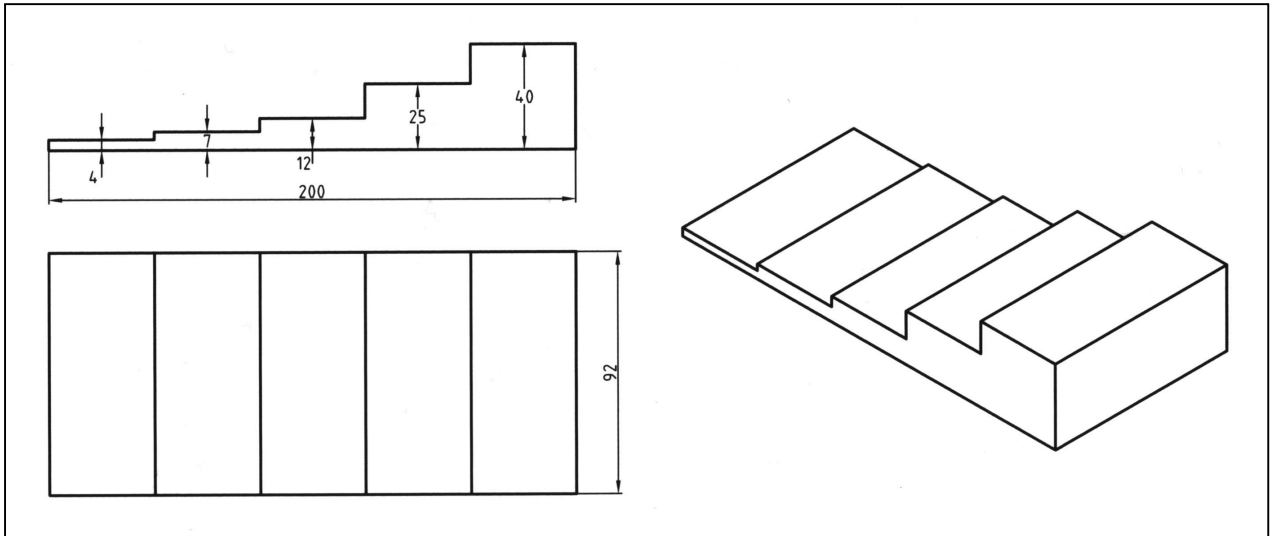


Bild 44: Gussteil Stufenkeil zur Untersuchung von Wanddickenunterschieden

Zur Formherstellung wurde wie beim Barren tongebundener Formsand verwendet. Die Stufenkeile dienten vorrangig dazu, Auswirkungen von Prozessparametervariationen hinsichtlich der Gefügeausbildung in Abhängigkeit von der jeweiligen Wanddicke zu untersuchen. Die Prozessparameter wurden in Anlehnung an die Ergebnisse beim Barren variiert und sind in Tabelle 5 dargestellt. Zusätzlich erfolgten zur Untersuchung des Einflusses der Schwingungsrichtung Versuchsreihen mit seitlich angebrachten Vibratoren.

Tabelle 5: Versuchsdokumentation Stufenkeil

Nr	Druckluft (bar)	Frequenz (Hz)	Beschleunigung (g)	Amplitude (mm)	Vibrationsbeginn nach Formfüllung
1	0	0	0	0	sofort
2	0,75	24	0,9	0,43	sofort
3	1,0	28	1,5	0,48	sofort
4	1,5	30	1,9	0,52	sofort
5	2,0	31	2,4	0,6	sofort
6	1,0	28	1,5	0,48	nach 10 s
7	1,0	28	1,5	0,48	nach 20 s
8	1,0	28	1,5	0,48	nach 30 s
9	1,0	28	1,5	0,48	nach 40 s

Mit zunehmender Vibrationsbeschleunigung können deutliche Kornfeinungen erzielt werden. Bei unvibriert erstarrten Gussteilen kommt es am Rand zur typischen Stengelkristallbildung, es tritt eine gerichtete Erstarrung auf. Die Gefügeausbildung ist abhängig von der jeweiligen Wanddicke im Gussteil. Dagegen weisen die unter Vibration erstarrten Teile ein über den gesamten Gussstückquerschnitt gleichmäßiges Gefüge auf. Die nach dem Kreisverfahren ermittelten Kornquerschnittsgrößen bestätigen die ermittelten Abhängigkeiten.

Beim Betrachten der Korngrößen in Abhängigkeit von der Vibrationsbeschleunigung lässt sich weiterhin feststellen, dass nach Überschreitung bestimmter Parameter (1,5g) das weitere Erhöhen der eingebrachten Energie zu keiner wesentlichen Veränderung der Korngröße führt. Dagegen steigt die Gefahr der Zerstörung bzw. Beschädigung der Form.

In den Bildern 45 und 46 sind die Gefüge von zwei unterschiedlich erstarrten Stufenkeilen sowie die Korngrößen in zwei Wanddicken (40 und 8 mm) gegenübergestellt.

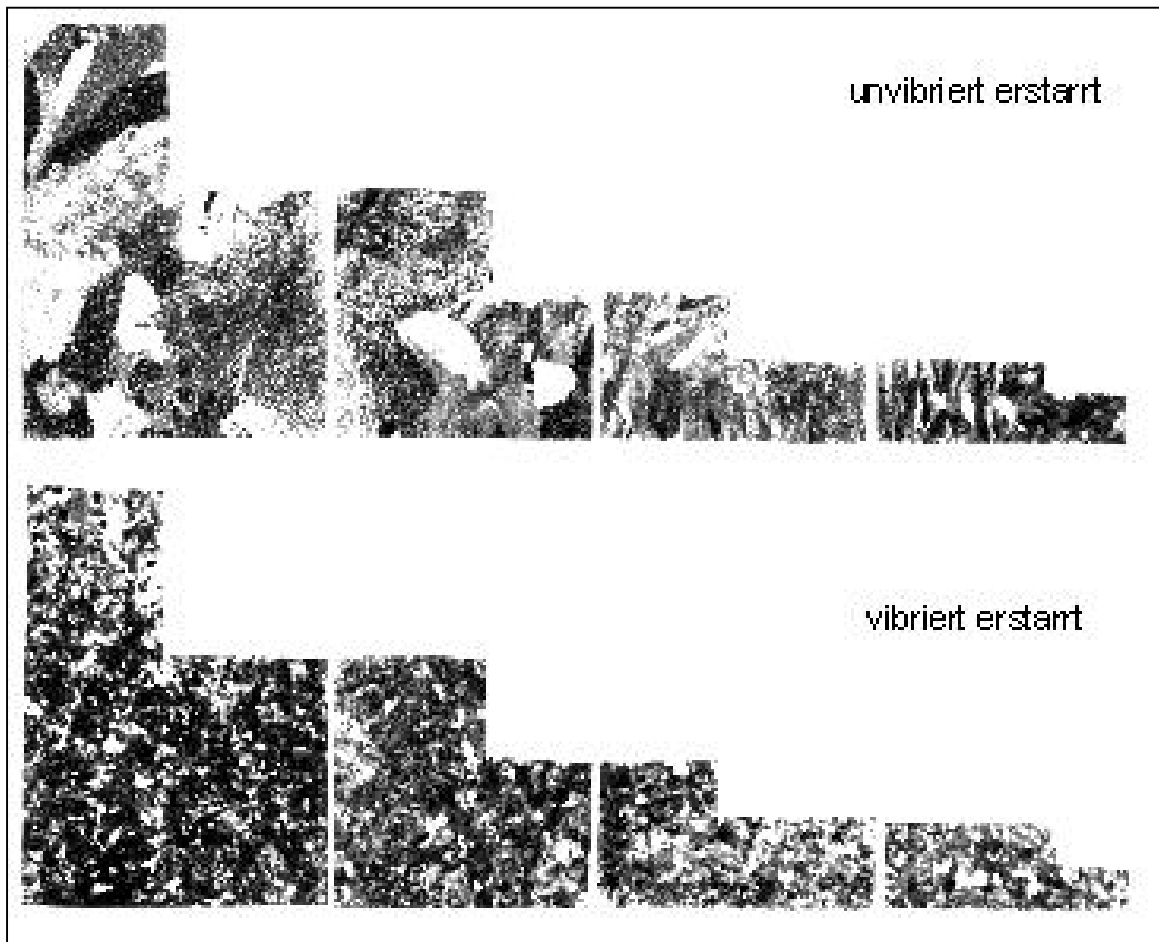


Bild 45: Makrogefüge Stufenkeil, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz

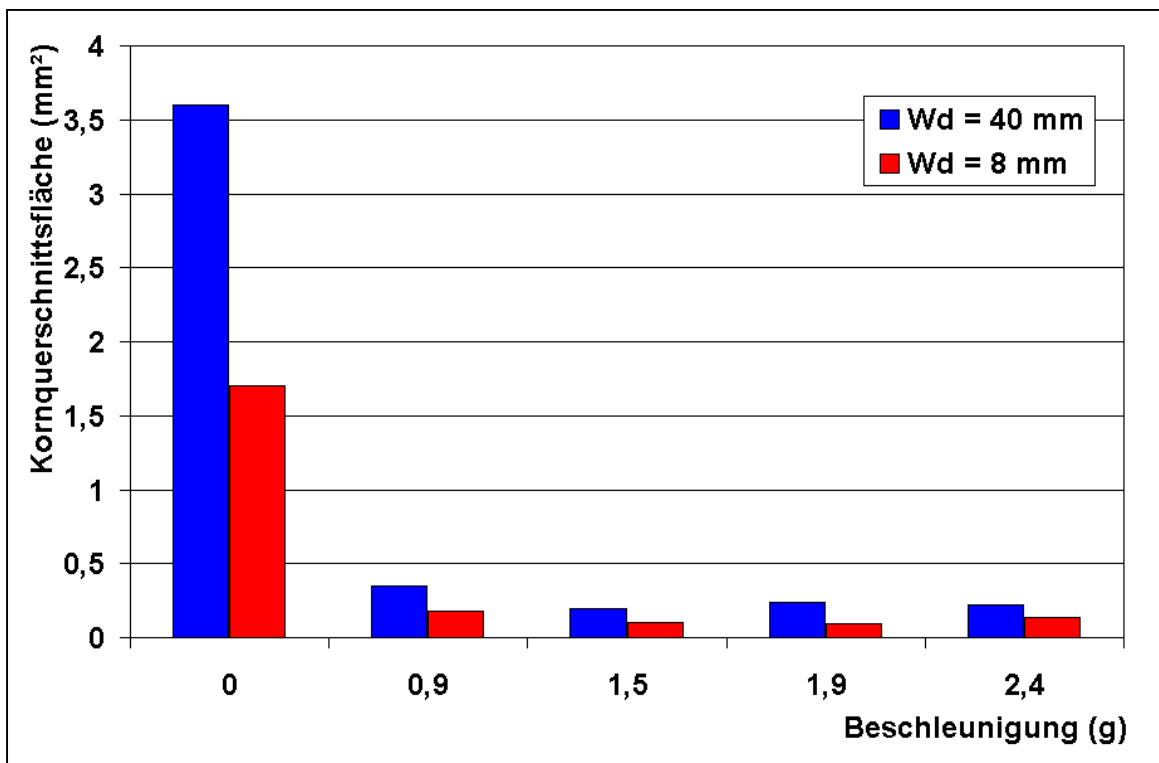


Bild 46: Kornquerschnittsflächen beim Stufenkeil

Ein Einfluss der Schwingungsrichtung (horizontal oder vertikal) konnte nicht festgestellt werden. Aus versuchstechnischen Gründen wurde der vertikale Schwingungseintrag favorisiert.

Weiterhin erfolgten Untersuchungen zur Ermittlung des optimalen Energieeintragzeitpunktes in Hinblick auf die Gefügeausbildung (Tabelle 5). Es wurden Stufenkeile abgegossen und die Vibration zu verschiedenen Zeitpunkten gestartet. Die Vibrationsparameter wurden dabei konstant gehalten.

Tabelle 6: Untersuchungen zum Zeitpunkt des Vibrationseintrages

Beschleunigung (g)	Zeitpunkt des Energieeintrages	Effekte
1,5	vor Beginn des Gießvorganges	Kornfeinungseffekt vorhanden, aber sehr schlechte Gusstückoberfläche durch turbulente Formfüllung unter Vibration, dadurch Auftreten von Penetrationserscheinungen
1,5	sofort nach Formfüllung	Kornfeinungseffekt deutlich in allen Wanddicken ausgeprägt
1,5	10 Sekunden nach beendeter Formfüllung	Kornfeinungseffekt deutlich in allen Wanddicken ausgeprägt
1,5	25 Sekunden nach beendeter Formfüllung	Kornfeinungseffekt nur noch in der dicksten Stufe ($W_d = 40 \text{ mm}$) aufgetreten
1,5	40 Sekunden nach beendeter Formfüllung	Keine Effekte erkennbar, Gefügeausbildung wie bei Erstarrung ohne Vibration

Wird die Vibration erst nach einer Zeit von etwa 25 Sekunden nach vollendeter Formfüllung gestartet, ist die Erstarrung offenbar bereits soweit fortgeschritten, dass kaum noch Effekte zu verzeichnen sind. Dagegen führt ein Vibrationseintrag vor Beginn der

Formfüllung zu einer deutlichen Verschlechterung der Gussteiloberfläche, damit ist diese Variante für den praktischen Einsatz ungeeignet.

Nach diesen Untersuchungen wurde festgelegt, mit dem Vibrieren der Schmelze sofort nach beendeter Formfüllung zu beginnen.

3.3.3. Einfluss der Vibration auf die Ausbildung der mechanischen Eigenschaften

Die kausale Beziehung zwischen Gefügeausbildung und mechanischen Eigenschaften ist hinreichend bekannt und in 1.2 beschrieben. Über diese Beziehung hinaus werden die mechanischen Eigenschaften durch weitere erstarrungsbedingte Merkmale wie

- Waddickeneinfluss
- Porosität

geprägt. Deshalb wurden aus den vorgenannten Versuchen außer der Gefügeausbildung auch die mechanischen Eigenschaften bestimmt und teilweise die Dichtewerte ermittelt.

3.3.3.1. Mechanische Eigenschaften am Barren

Aus den Barren wurden DIN-gerechte Zugstäbe (Form B: Rundproben mit Gewindeköpfen) [86] herausgearbeitet und auf einer Prüfmaschine bis zum Bruch belastet. Aus den aufgezeichneten Spannungs-Dehnungs-Diagrammen und der Auswertung der Zugstäbe konnten Streckgrenze und Zugfestigkeit ermittelt werden. Die ermittelten Kennwerte lassen einen deutlichen Einfluss der eingebrachten Vibrationsbeschleunigung auf die mechanischen Eigenschaften erkennen (Bild 47).

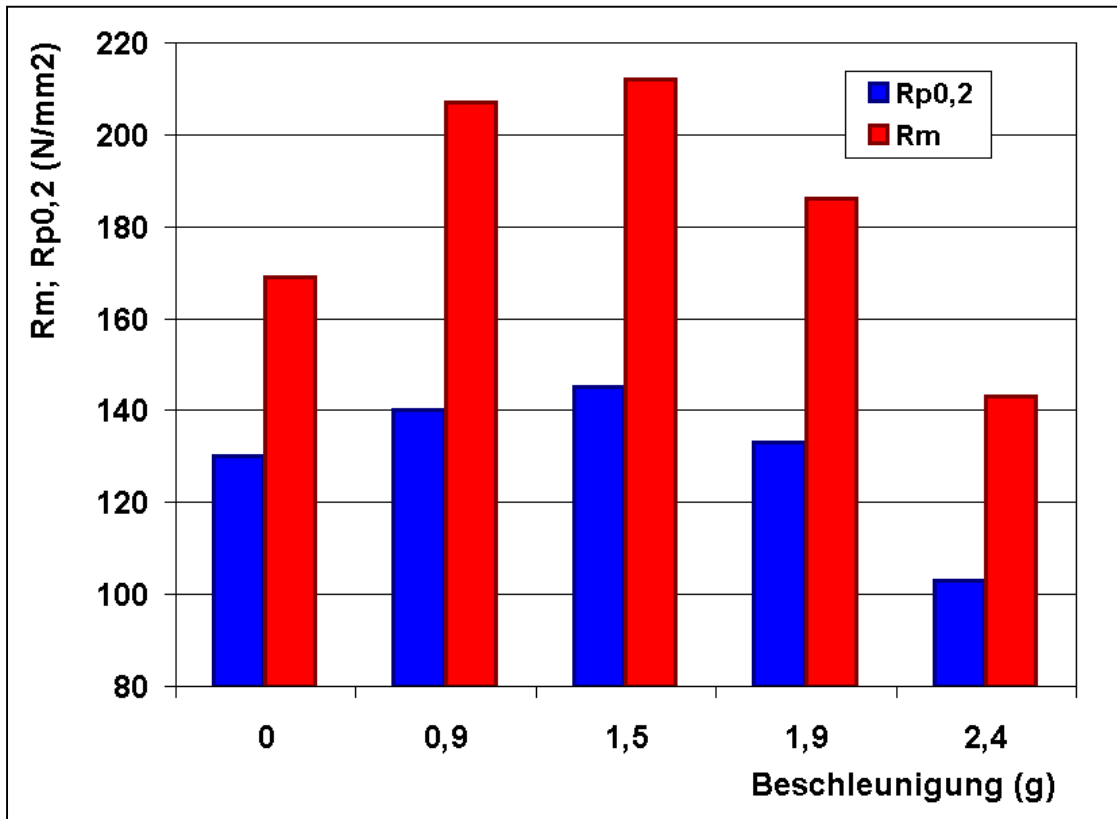


Bild 47: Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Vibrationsbeschleunigung, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5

Es ist erkennbar, dass offenbar eine optimale Gefügebeeinflussung bei Beschleunigungen von ca. 1,5g eintritt. Bei Erhöhung der eingebrachten Energie mit Beschleunigungen von Werten oberhalb 2g erfolgt ein deutlicher Abfall der mechanischen Kennwerte. Zugfestigkeit und Streckgrenze erreichen dabei Werte, die sogar niedriger als die an den unvibrierten Barren ermittelten Werten sind. Eine Vergrößerung des Gefüges, die den Abfall der mechanischen Eigenschaften verursachen könnte, war nicht festzustellen (vgl. Bild 43).

Zur weiteren Charakterisierung des Werkstoffverhaltens unter dem Einfluss der Vibration während der Erstarrung wurden Dichteuntersuchungen durchgeführt. Die Masse des Probekörpers wurde an Luft und unter Wasser bestimmt. Daraus errechnet sich die Dichte wie folgt:

$$\rho = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{Luft}} - m_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Auch für diese

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	- Dichte des Wassers
m_{Luft}	- Masse an Luft
$m_{\text{H}_2\text{O}}$	- Masse unter Wasser

Untersuchungen wurden wieder mindestens 5 Werte pro Variante bestimmt und die Durchschnittswerte ermittelt. Im Bild 48 sind die Ergebnisse zu sehen.

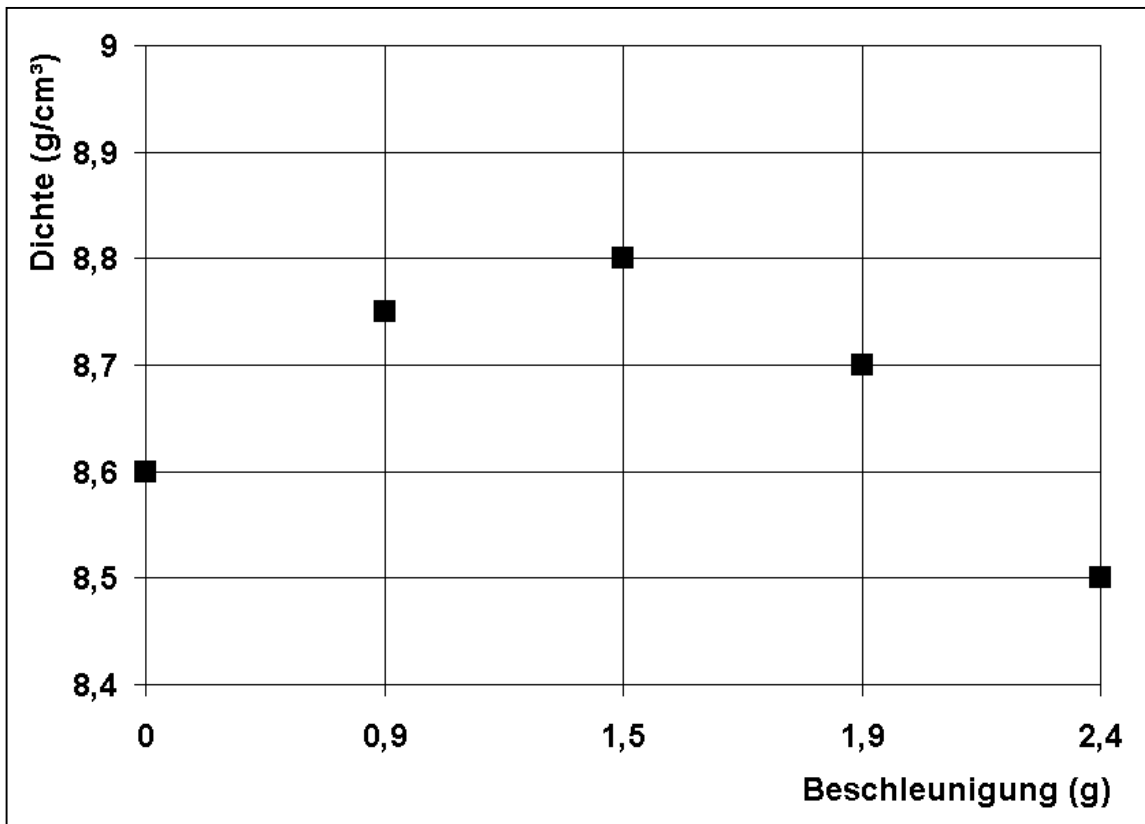


Bild 48: Dichte in Abhängigkeit von der Vibrationsbeschleunigung, ermittelt am Barren, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5

Ein Dichtemaximum ist bei einer Beschleunigung von 1,5g erkennbar. Im Abfallen der Dichtewerte und der damit verbundenen Erhöhung der Mikroporosität ist die Ursache für die Reduzierung der Festigkeitswerte bei Erhöhung der Beschleunigung zu erklären.

Nach Abschluss der umfangreichen Versuchsreihen an Barren und Stufenkeil konnte ein Optimum für die Vibrationsbehandlung festgelegt werden. Bei der Behandlung mit den Parametern:

- Frequenz ca. 30 Hz
- Beschleunigung ca. 1,5 bis 2,0 g
- Amplitude ca. 0,5 mm

ist es bei diesem Werkstoff möglich, die Erstarrungsmorphologie so zu beeinflussen, dass sich ein feinkörniges Gefüge ausbildet und bessere Eigenschaften erzielt werden können.

Aus diesem Grund wurden die nachfolgenden Untersuchungen überwiegend in diesen Parameterbereichen durchgeführt und es kann auf eine detaillierte Auflistung der Versuchsdokumentation verzichtet werden.

3.3.3.2. Mechanische Eigenschaften und Wanddickeneinfluss an Rundstäben

Um die mechanischen Eigenschaften von unvibrierten und vibrierten Probestäben vergleichen zu können, wurde eine neue Modellplatte aufgebaut. Auf dieser befinden sich 3 Rundstäbe mit unterschiedlichen Durchmessern (25; 35; 50 mm) und ein Stab, der die 3 Wanddicken stufenförmig vereint (Bild 49). Damit war es möglich, den Wanddickeneinfluss auf die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Energieeintrag während der Erstarrung zu untersuchen.



Bild 49: Modellplatte zur Herstellung von Rundstäben verschiedener Wanddicken (Ø25; 35; 50 mm)

Es wurden sowohl vibrierte als auch unvibrierte Stäbe mit einer Schmelze abgegossen, aus denen Zugprobestäbe herausgearbeitet wurden. Erfahrungsgemäß erwies es sich als vorteilhaft, diese Teile im Kippgussverfahren herzustellen, um eine bessere Speisung zu gewährleisten. Aus dem Grund wurden diese Versuche mit der in 3.1.2.3 beschriebenen Vibrationseinrichtung durchgeführt.

Im Bild 50 sind die ermittelten Kornquerschnittsflächen dargestellt. Das Bild 51 zeigt die Mittelwerte der Zugfestigkeiten in Abhängigkeit vom Stabdurchmesser. Durch das Vibrieren der Stäbe während der Erstarrung konnten Steigerungen der Zugfestigkeitswerte zwischen 7 und 17% erreicht werden. Bei den unvibriert erstarrten Probestäben ist ein Abfall der Zugfestigkeit mit steigendem Probestabdurchmesser erkennbar. Dieses Ergebnis resultiert aus der Gefügeausbildung in Bezug auf die jeweilige Wanddicke. Die Grobkörnigkeit in den dickeren, unvibrierten Stäben führt zu diesem Abfall der Festigkeiten. Diese Abhängigkeit tritt bei den vibrierten Proben nicht auf, was auf das gleichmäßige und feinkörnige Gefüge in allen 3 Querschnitten zurückzuführen ist.

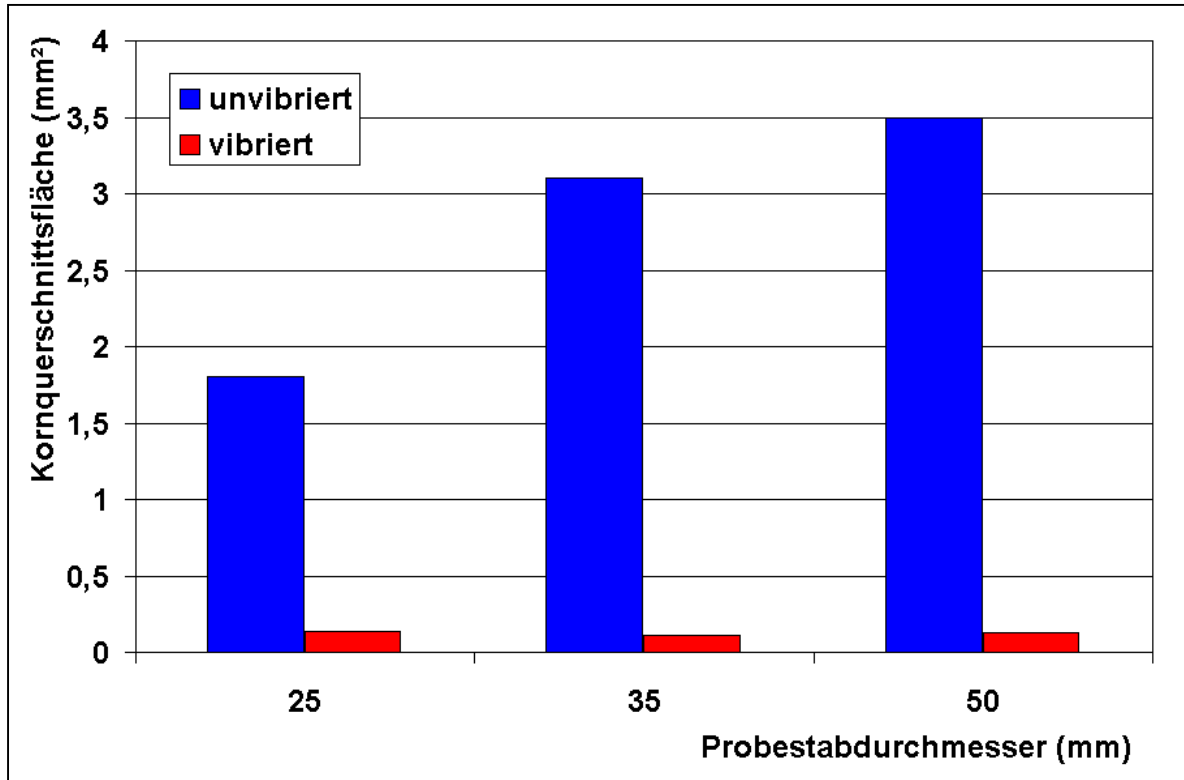


Bild 50: Abhängigkeit der Kornquerschnittsfläche vom Stabdurchmesser, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz und 1,5g

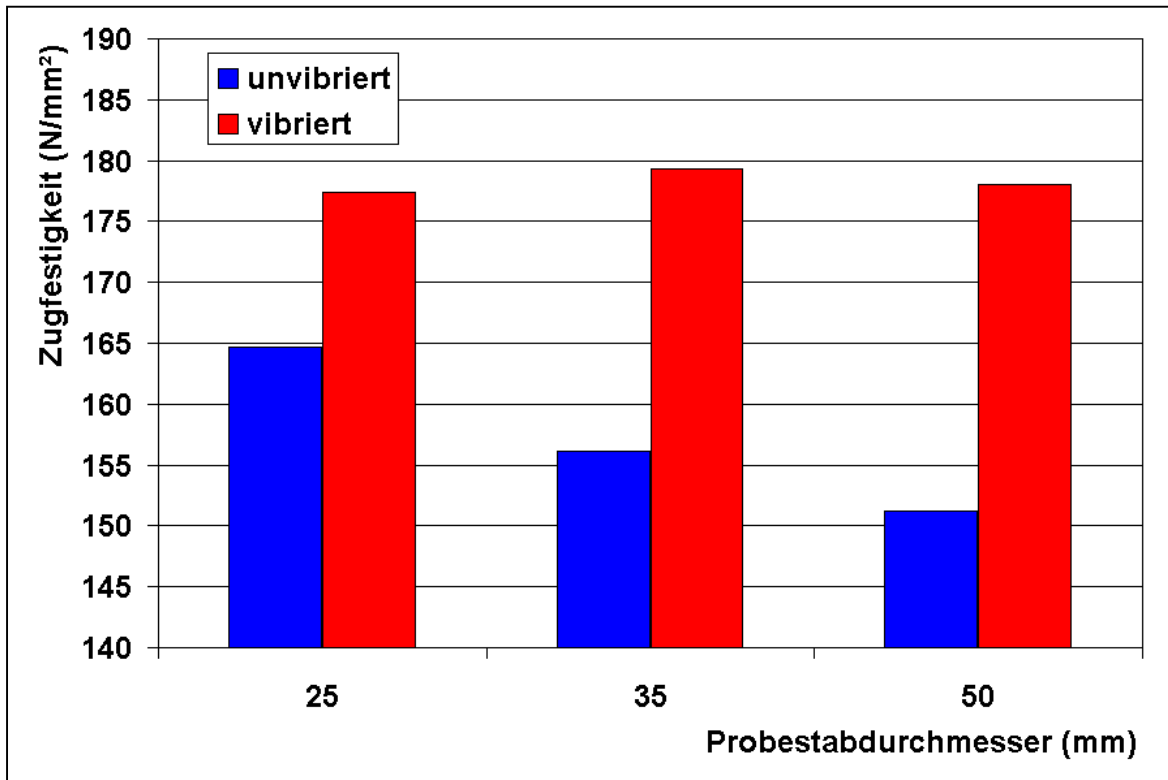


Bild 51: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Stabdurchmesser, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz und 1,5g

Stellt man die Gefügeauswertungen und die Zugfestigkeitswerte gegenüber, so lässt sich die direkte Beziehung der Kausalkette Gefüge-Eigenschaften deutlich ablesen. Mit steigender Korngröße wird die Zugfestigkeit geringer (Bild 52).

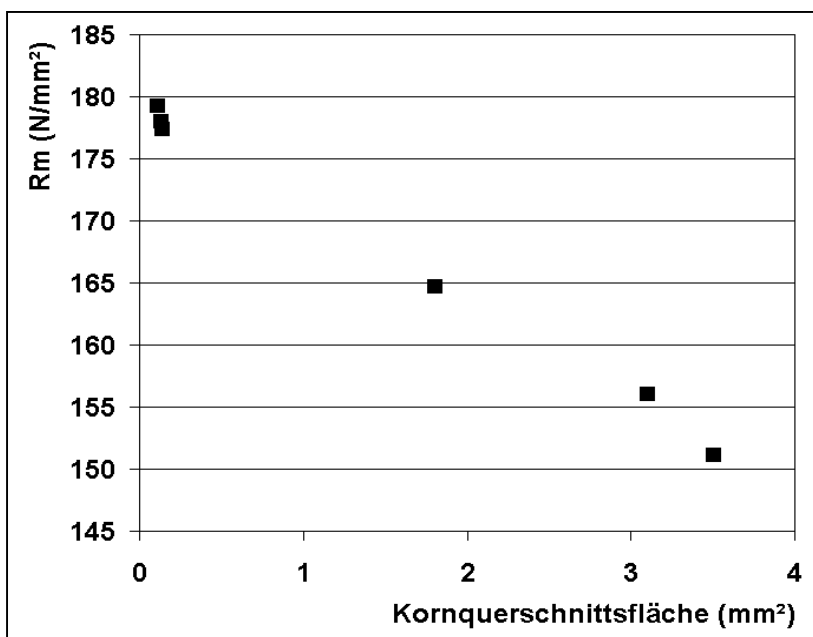


Bild 52: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Gefüge

An diesen Rundstäben wurde weiterhin der Einfluss der Vibrationszeit auf die Gefügebildung und daraus abgeleitet auf die Zugfestigkeiten untersucht. Diese Versuchsreihen erfolgten in Hinblick auf die geplante praktische Umsetzung des Verfahrens und die damit verbundene Integration der Vibrationsbehandlung in die Gießstrecke und Beeinflussung der Taktzeiten.

Die Vibration wurde wie bei den anderen Versuchsreihen nach Abschluss der Formfüllung gestartet und nach verschiedenen Zeiten (0,5; 2; 5 min) beendet. Im Bild 53 sind die ermittelten Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Wandstärke und der Vibrationszeit zu sehen. Um die Festigkeitswerte deuten zu können, wurden Gefügebilder vom 35 mm Probestab aufgenommen, die im Bild 54 gegenübergestellt sind.

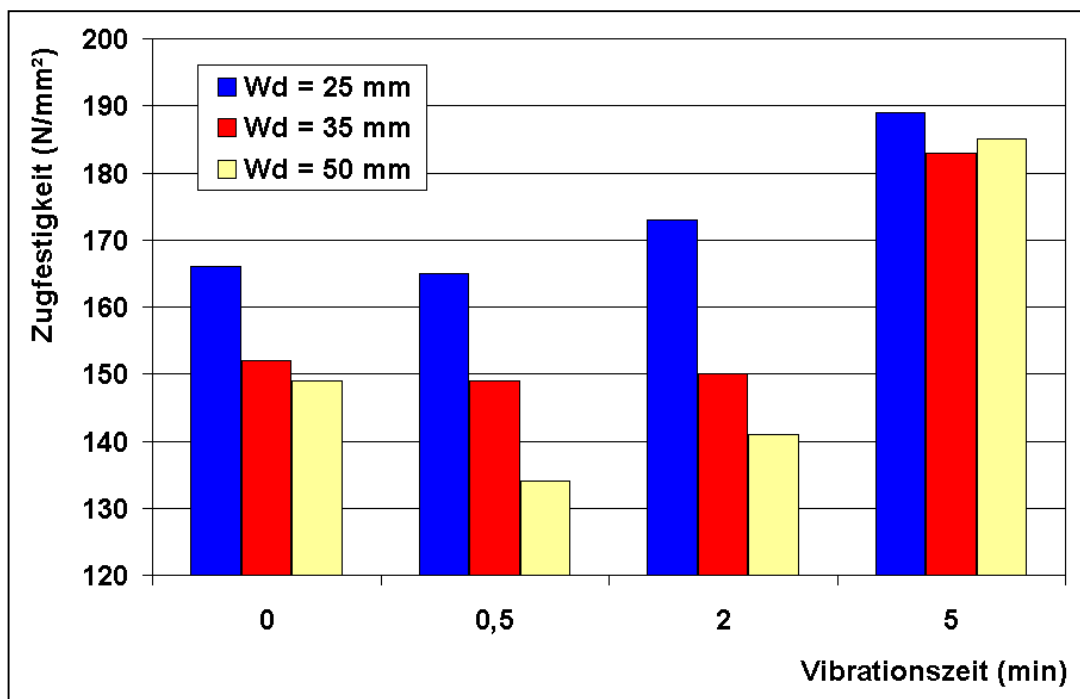


Bild 53: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Vibrationszeit

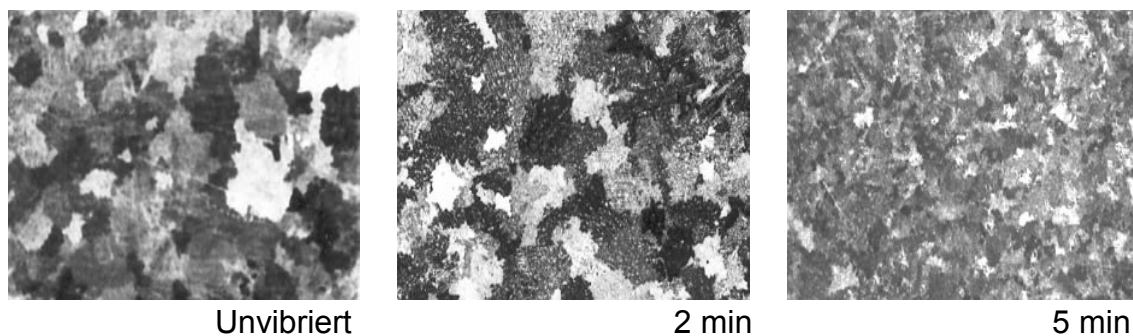


Bild 54 : Gefügebildung im 35 mm Probestab nach unterschiedlichen Vibrationszeiten

Interessant ist, dass eine kurzzeitige Vibration, die aber nicht bis zum Ende der Erstarrung anhält, offenbar keinen Einfluss auf die Gefügebildung und die sich daraus ergebenden Festigkeitswerte hat. Wird also der Energieeintrag zu einem Zeitpunkt unterbrochen, bei dem die Erstarrung noch nicht beendet ist, so können die vorhandenen Keime danach unbeeinflusst wachsen und der Kornfeinungseffekt geht verloren. Es ist anzunehmen, dass sich ein Teil der gebildeten Keime wieder auflöst. Bei einer Vibrationszeit von 5 Minuten lassen die Festigkeitswerte keine Wanddickenabhängigkeit mehr erkennen, was auf das gleichmäßig feinkörnige Gefüge in allen Bereichen zurückzuführen ist. Bei allen anderen Vibrationszeiten dagegen sind die Wanddickenabhängigkeiten noch deutlich erkennbar.

3.4. Schlussfolgerungen aus den grundlegenden Untersuchungen zum Energieeintrag in erstarrende Metallschmelzen durch Vibration

Ausgehend von der Aufgabenstellung galt es, in Grundlagenuntersuchungen die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Werkstoffen und den Vibrationsparametern zu testen. Das Ziel bestand darin, die Wirkungen eines Energieeintrages während der Erstarrung in Bezug auf die Gefügebildung und daraus resultierend auf die Eigenschaften zu untersuchen.

In Modellversuchen mit einer dendritisch kristallisierenden Ammoniumchloridlösung ($\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$) konnte der Einfluss der Vibration auf den Erstarrungsablauf zum besseren Verständnis der ablaufenden Prozesse anschaulich dargestellt werden. Während in der unvibrierten Schmelze ausgehend vom Ort des stärksten Wärmeentzuges große Dendriten entstanden, wurde in der vibrierten Schmelze das gleichzeitige Wachsen kleiner Dendriten im gesamten Volumen der Schmelze beobachtet. Aus der Tatsache, dass die Keimbildung in der vibrierten Schmelze gleichzeitig am Rand und in der Schmelze einsetzte, kann man schlussfolgern, dass bei diesen Versuchen der Keimbildungsprozess vorzugsweise durch eine dynamische Keimbildung beeinflusst wurde.

An Versuchen mit in Kokille vergossenen, zylindrischen Probekörpern wurde festgestellt, dass der Kornfeinungseffekt vom Erstarrungstyp abhängig ist. Reine Metalle

(Aluminium, Zink) zeigten nach der Erstarrung der unvibrierten Probe eine ausgeprägte Stengelkornstruktur. Die Abkühlungskurve wies keine messbare Rekaleszenz auf. Es konnte kein Einfluss einer Vibrationsbehandlung auf die Gefügebildung festgestellt werden. Legierungen mit breitem Erstarrungsintervall (untereutektische und übereutektische Al-Legierungen, Rotguss) erstarrten dagegen globulitisch, in der Abkühlkurve konnte eine geringe Rekaleszenz nachgewiesen werden. Die Vibrationsbehandlung der Schmelze ergab eine Verringerung der Rekaleszenz und eine Kornfeinung des globulitischen Gefüges. Eutektische Legierungen erstarrten mit erheblicher Rekaleszenz, durch die Vibrationsbehandlung der erstarrenden Schmelze wurde diese nahezu vollständig unterdrückt.

Aus den genannten Ergebnissen ließ sich ableiten, dass durch die Vibrationsbehandlung der Keimbildungsprozess unterstützt wird. Die deutliche Senkung von Unterkühlung und Rekaleszenz bestätigten diese Annahme.

Mit der Rotgusslegierung CuSn5Zn5Pb wurden unter Variation der Versuchsparameter umfangreiche Versuchsreihen mit verschiedenen Testgussteilen durchgeführt. Unter den variierten Versuchsparametern konnte die Vibrationsbeschleunigung als Haupteinflussgröße ermittelt werden. Ausgehend vom gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen Frequenz, Amplitude und Beschleunigung wurden einzelne Bereiche erfasst, bei denen eine positive Gefügebeförderung und verbesserte Gussteileigenschaften durch einen Vibrationseintrag während der Erstarrung erzielt werden konnten. Im Bild 55 sind diese experimentell ermittelten Parameterbereiche dargestellt. Für die Erzielung des feinkörnigen Gefüges ist es also offenbar unwesentlich, ob die jeweilige Beschleunigung durch eine hohe Frequenz und niedrige Amplitude oder umgekehrt eingestellt wird.

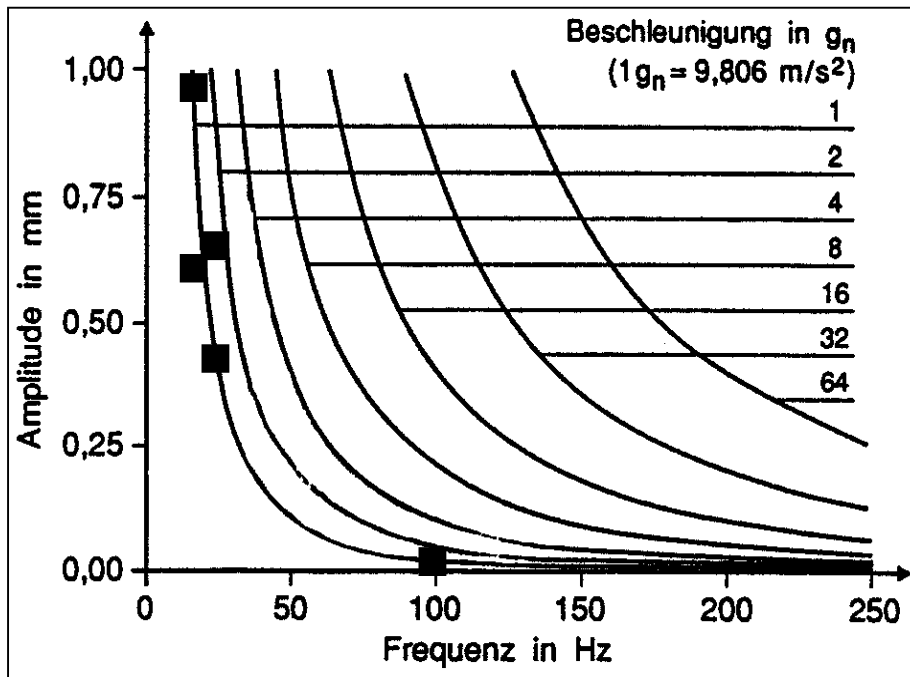


Bild 55: Experimentell ermittelte Bereiche zur Vibrationsbehandlung von CuSn5Zn5Pb5

Das Gefüge wurde durch eine Vibrationsbehandlung deutlich gefeint. Versuche an einem Barrenmodell mit und ohne freier Speiseroberfläche ergaben, dass der Kornfeinungseffekt nicht an eine freie Gussteiloberfläche gebunden ist.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigten eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch die Vibrationsbehandlung. Es konnte ein Festigkeitsoptimum bei einer Vibrationsbeschleunigung von 1,5g festgestellt werden.

Unter den gleichen Bedingungen wurde ein Maximum in der Dichte der Probekörper erzielt. Damit war die Reduzierung der Festigkeitswerte bei höheren Beschleunigungswerten einer höheren Mikroporosität bei entsprechendem Dichteabfall zuzuordnen.

In Untersuchungen am Stufenkeil konnte festgestellt werden, dass es durch eine Vibrationsbehandlung der erstarrenden Schmelze möglich ist, den Wanddickeneinfluss auf die Gefügeausbildung nahezu vollständig auszuschalten. Außerdem wurde der Einfluss des Zeitpunktes des Schwingungseintrages auf das entstehende Gussgefüge untersucht. Der Energieeintrag sollte sofort nach beendeter Formfüllung beginnen und bis zum Ende der Erstarrung andauern.

An Rundstäben verschiedener Durchmesser (25; 35; 50 mm) wurden der Einfluss der Wanddicke auf Gefüge und Eigenschaften in Abhängigkeit von den Erstarrungsbedingungen sowie der Einfluss der Vibrationszeit untersucht. Bei den unvibrierten Stäben erfolgte ein Abfall der Zugfestigkeit mit steigender Wanddicke. Durch eine Vibrationsbehandlung konnte unabhängig von der Stabdicke eine Steigerung der Zugfestigkeit um bis zu 17% erzielt werden.

In weiteren Verlauf der Arbeit galt es, praxisorientierte Untersuchungen im Anschluss an diese Grundlagenversuche durchzuführen.

4. Die Anwendung der Vibration bei der Herstellung gegossener Bauteile

4.1. Die Herstellung von Bauteilen aus der Rotgusslegierung Rg 5

Der Einsatz dieser Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Legierungen (Armaturen- und Elektroindustrie, Maschinenbau) bringt hohe Qualitätsanforderungen hinsichtlich Dichte und mechanischer Eigenschaften mit sich. Die bereits in 3.3.1 beschriebenen Erstarrungsprobleme können einerseits zu einer unverträglich hohen Ausschussquote führen und andererseits dazu, dass durch verstärkten Speisereinsatz ein schlechteres Ausbringen in Kauf genommen werden muss. Durch die guten Einsatzmöglichkeiten dieser Legierungen und dem daraus resultierenden hohen Bedarf entstehen für die Gießereien ein Mehraufwand an Energie und hohe Kosten durch die mechanische Bearbeitung. Trotz aller Bemühungen und Kompromisse kann ein bestimmter Bedarf nicht befriedigt werden, das Erstarrungsverhalten einiger Legierungen führt zu Grenzen in der Anwendbarkeit. Umfassende Lösungen wurden bisher nicht angeboten. Auch die Anwendung einer chemischen Kornfeinungsbehandlung brachte nicht den gewünschten Erfolg.

Aus diesen Gründen und den bereits erzielten positiven Ergebnissen in kleintechnischen Untersuchungen ergaben sich Überlegungen, die Anwendung eines physikalischen Schmelzebehandlungsverfahrens mittels Vibration auch an ausgewählten Praxisteilen zu überprüfen.

Die Betriebsversuche wurden in einer Schwermetallgießerei durchgeführt. In Hinblick auf die geplante Umsetzung des Verfahrens in die betriebliche Praxis erschien es sinnvoll, die Untersuchungen vor Ort vorzunehmen. Damit konnte die Verfahrenstechnologie bereits unter Praxisbedingungen getestet werden.

4.1.1. Armaturenteil

Eine wichtige technologische Gebrauchseigenschaft gegossener Bauteile ist die Druckdichtheit. Für eine Reihe von Gussteilen, die auf Grund ihrer Eigenschaften z. B. für Ventile oder Armaturen verwendet werden sollen, bedeutet die Druckdichtheit eine der Hauptanforderungen. Aufgrund des Erstarrungsverhaltens und der daraus resultierenden Mikrolunkerneigung der Rotgusslegierungen gestaltet sich die Erfüllung dieses Qualitätsmerkmals bei bestimmten Teilen problematisch.

An dem im Bild 56 dargestellten Armaturenteil sollte untersucht werden, in welchem Maße durch eine Vibration während der Erstarrung und die sich daraus ergebenden Gefügeveränderungen die Ausschussquote in Bezug auf die Druckdichtheit reduziert werden kann.



Bild 56 : Armaturenteil aus Rotguss CuSn5Zn5Pb5

Für die Versuche kam der Vibrationstisch 3 zur Anwendung. Aus einer Schmelze wurden jeweils eine unvibrierte und eine während der Erstarrung vibrierte Form abgegossen. Die Variation der Prozessparameter erfolgte in Anlehnung an die Ergebnisse der kleintechnischen Versuche in folgenden Bereichen:

- Frequenz 25-50 Hz
- Beschleunigung 1-2g
- Amplitude 0,3-0,6 mm

An einer im Unternehmen zur Verfügung stehenden Versuchsanlage konnten die Teile auf Druckdichtheit geprüft werden. Die einzelnen Gussteile wurden dabei auf

dem Prüfstand so angebracht, dass alle Öffnungen luftdicht verschlossen waren. Das Teil wurde danach in ein Wasserbad abgesenkt. Durch einen Dichtungsgummi erfolgte die Zufuhr von Druckluft. Konnten Luftblasen entweichen, die zur Badoberfläche aufstiegen, so war das Teil fehlerbehaftet und wies keine ausreichende Druckdichtheit auf.

Bei einigen unvibrierten Teilen wurden Fehler erkennbar, während die unter Vibration erstarrten Teile vollständig druckdicht waren.

4.1.2. Kegel

Bei diesem Realteil galt es herauszufinden, inwieweit die Gefügeausbildung verschiedener Teile einer Gusstraube aufgrund der Temperaturunterschiede variiert und ob durch den Einsatz von Vibration während der Erstarrung auf die Verwendung von Kühlleisen verzichtet werden könnte. Die Modellplatte für die Herstellung dieser Teile ist im Bild 57 zu sehen.

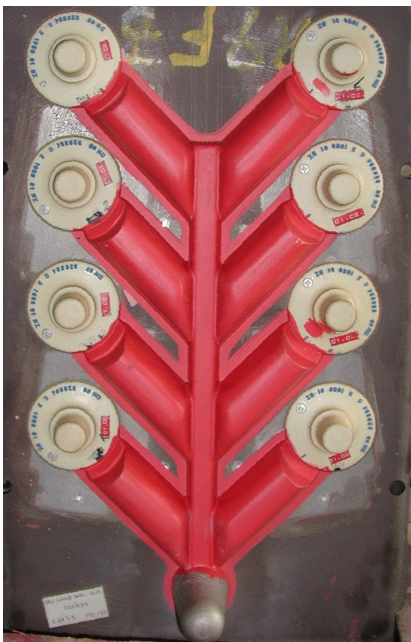


Bild 57: Modellplatte für die Herstellung von Gussteilen aus Rotguss

Auch bei diesen Untersuchungen wurden die Parameter in den in 4.1.1 angegebenen Grenzen variiert. Nach Erkalten der Gussteile wurden die einzelnen Teile markiert, getrennt und metallographisch untersucht. Folgende Feststellungen konnten dabei gemacht werden:

- **mit Kühleisen unvibriert und vibriert:** Bei den Teilen, die mit Kühleisen abgegossen wurden, treten nur geringe Gefügeunterschiede zwischen vibriert und unvibriert erstarrten Teilen auf. Die Gefüge der an einer Gusstraube befindlichen Teile sind relativ gleichmäßig und feinkörnig.
- **unvibriert ohne Kühleisen:** Die Teile einer Form weisen sehr unterschiedliche Gefüge auf. Beim Gießvorgang strömt die Schmelze zuerst in die hintersten Teile, sie erstarren dadurch auch am schnellsten. Das Gefüge ist relativ feinkörnig. Je näher sich die Teile am Einguss befinden, desto größer ist das sich ausbildende Gussgefüge. Daraus folgt, dass innerhalb eines Formkastens Teile mit unterschiedlicher Gefügeausbildung und daraus resultierend mit verschiedenen Eigenschaften abgegossen werden (Bild 58).
- **vibriert ohne Kühleisen:** Alle 8 Teile einer Gusstraube weisen unabhängig von der jeweiligen Lage im Formkasten ein sehr gleichmäßiges, feinkörniges Gefüge auf (Bild 58).

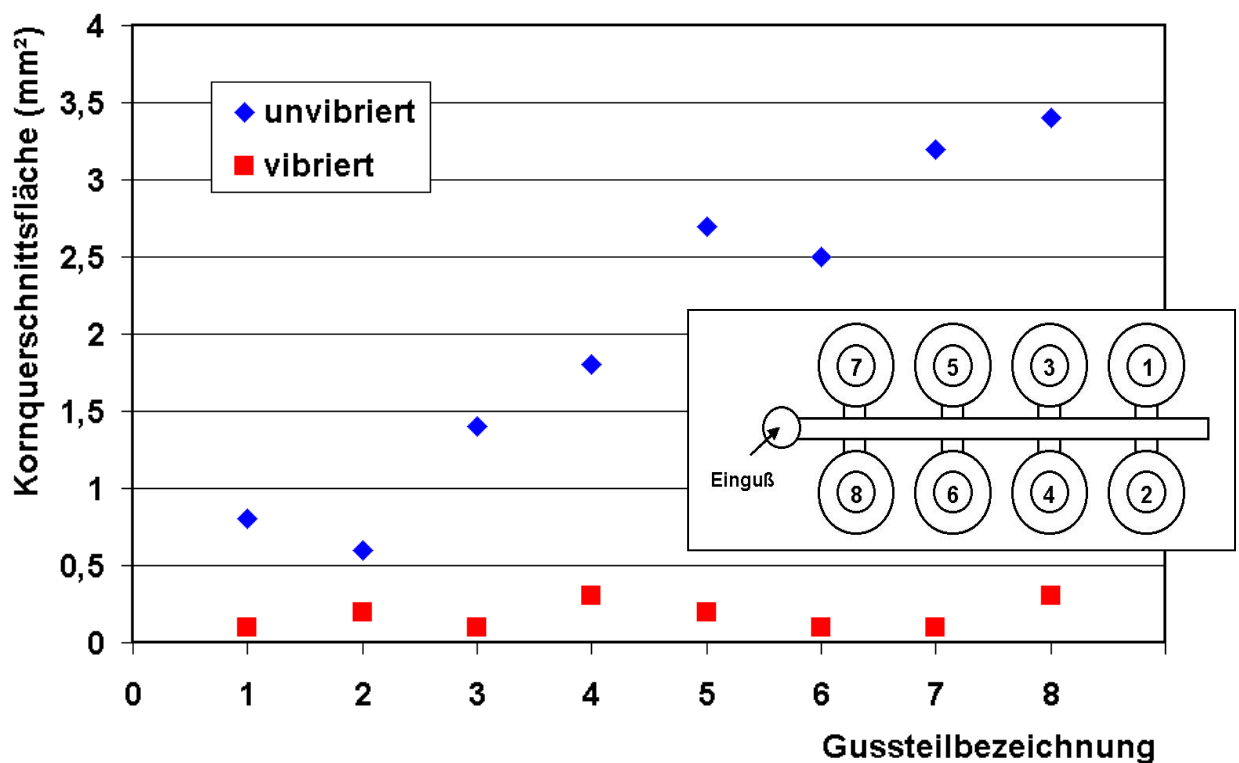


Bild 58: Kornquerschnittsflächen in Abhängigkeit von der Lage des Gussteils im Formkasten, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz und 1,5g

Es ist also bei bestimmten Gussteilen möglich, durch das Einbringen von Energie durch eine Vibrationsbehandlung während der Erstarrung auf den Einsatz von Kühleisen zu verzichten, um eine gute und gleichmäßige Qualität der Gussteile zu erreichen. Das führt zur Reduzierung eines Arbeitsschrittes bei der Formherstellung und damit zur Zeitersparnis.

4.1.3. Schleifring

Der Schleifring aus Rotguss wird im Elektromotorenbau verwendet. An diesem Teil wurde untersucht, inwieweit sich eine Vibrationsbehandlung auf die Gefügeausbildung und auf das Auftreten von Mikrolunkern auswirkt.

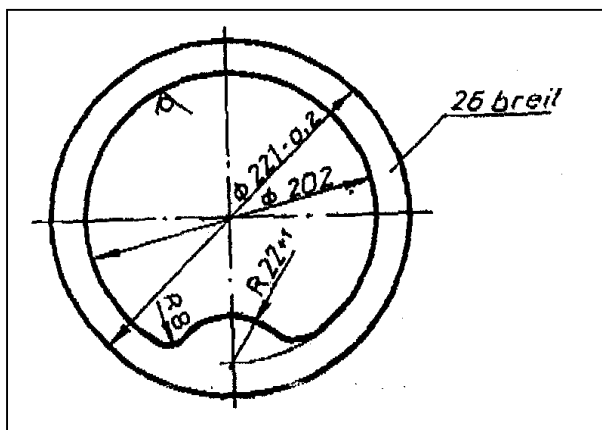


Bild 59: Skizze, Schleifring aus Rotguss
CuSn5Zn5Pb5

Die Schleifringe wurden ebenso wie die anderen Praxisteile mit den in 4.1.1 erwähnten Versuchsparametern vibriert.

Mit Hilfe des Farbeindringverfahrens wurde der Erfolg der Vibrationsbehandlung überprüft. Bei diesem zerstörungsfreien Prüfverfahren wird nach gründlicher Reinigung des Gussteils ein Prüfmittel aufgesprüht, welches in vorhandene Oberflächenfehler eindiffundiert. Nach der Reinigung der Oberfläche erfolgt danach das Aufsprühen eines Kontrastmittels anderer Farbe. Das aus den Fehlstellen herausdiffundierende Prüfmittel bewirkt eine Einfärbung des Kontrastmittels, sodass die Fehler gut erkennbar sind.

Im Bild 60 sind zwei nach diesem Verfahren untersuchte Ringe dargestellt. Man kann deutlich erkennen, dass die sichtbare Mikrolunkerung bei dem vibrierten Teil geringer

ist. Zur Gegenüberstellung der Gefügeausbildung wurden auch von diesem Gussteil Makroschliffe angefertigt. Es wurden Proben an der Verdickung des Ringes herausgetrennt, um die Auswirkungen der Wanddickenunterschiede auf das Gefüge zu untersuchen. Wie im Bild 61 erkennbar ist, führt auch bei diesem Praxisteil die Vibration während der Erstarrung zu einem von der Wanddicke unabhängigen, feinkörnigen Gefüge.

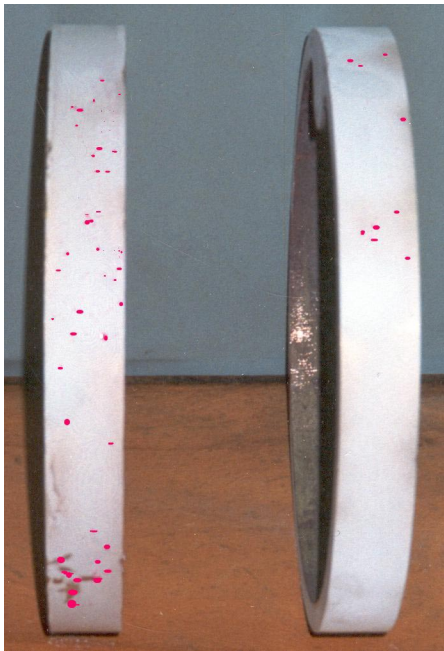


Bild 60: Schleifring, Farbeindringverfahren

unvibriert

vibriert



Bild 61: Gefüge Schleifring; CuSn5Zn5Pb5 ; rechts vibriert mit 30 Hz; 1,5g

4.2. Die Herstellung von Hydraulikteilen aus Gusseisen mit Lamellengrafit

Das Verhalten von Gusseisenlegierungen unter Vibration wurde an dickwandigen Hydraulikteilen getestet. Gusseisenlegierungen stellen eine spezielle Werkstoffgruppe in Bezug auf die Gefügeausbildung und das Erstarrungs- und Lunkerverhalten dar. Dickwandige Teile aus Gusseisen mit Lamellengrafit weisen eine unterschiedliche Gefügeausbildung über den Querschnitt auf. Diese Unterschiede sind auf die Abkühlungsbedingungen in den jeweiligen Gussstückbereichen zurückzuführen. In den mittleren Zonen bilden sich große Graphitlamellen aus, die Randbereiche sind deutlich feiner ausgebildet. Das führt bei dickwandigen Hydraulikteilen zu Problemen. Bei der mechanischen Bearbeitung solcher Teile werden große Lamellen herausgelöst, die in der Folge zu undichten Stellen werden können. Da die Eigenschaften der Gusseisenwerkstoffe zum einen von der Form, der Verteilung und der Menge des eingelagerten Graphits und zum anderen von der metallischen Matrix bestimmt werden, ist der Eingriff in den Erstarrungsablauf zur Feinung der Lamellen und des Grundgefüges ein interessanter Aspekt.

In der Literatur wird über einzelne Untersuchungen zur physikalischen Schmelzebehandlung berichtet, bei denen es gelang, die Grafitausbildung und die Größe der eutektischen Zellen durch den Eintrag von Energie während der Erstarrung zu verändern [25, 54, 64, 64].

Für die Untersuchungen wurde der Werkstoff EN-GJL 300 mit einem Sättigungsgrad von 0,84 verwendet. Die chemische Analyse wurde wie folgt eingestellt:

C:	3,0-3,1 %	P:	0,05-0,08 %
Si:	2,3-2,5 %	S:	< 0,01 %
Mn:	0,5-0,7 %		

Die Impfung der Schmelze erfolgte mit 0,3 % FeSi75.

Die Schmelzen wurden in geschlichtete und vorgewärmte Kokillen (ca. 150-200 °C) mit den Abmessungen 150×150×180mm vergossen. Aus einer Schmelze wurden jeweils zwei Kokillen gefüllt, wobei eine nach Beendigung der Formfüllung unter Vibration und die andere in Ruhe erstarrte.

Für die Untersuchungen kamen die in 3.1.1 beschriebenen Elektrovibratoren mit Frequenzumrichter zur Anwendung, die eine stufenlose Regelung der Frequenz zulassen. Durch die Einstellung der Unwucht der Vibratoren können die Erregerkräfte verändert und die Versuchsparameter in weiten Bereichen variiert werden.

- Frequenz 25 bis 75 Hz
- Beschleunigung 0,5 bis 3,5 g
- Amplitude 0,1 bis 0,9 mm

Die Parameter ausgewählter Versuche sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Versuchsparameter Gusseisenversuche

Nr	T _{gieß} (°C)	S _c	Frequenz (Hz)	Beschleunigung (g)	Amplitude (mm)
1	1350	0,84	0	0	0
2	1350	0,84	30	1,8	0,5
3	1350	0,85	0	0	0
4	1350	0,85	40	0,8	0,12
5	1350	0,84	0	0	0
6	1350	0,84	75	2,5	0,11

Aus der Barrenmitte wurde nach Erkalten der Teile jeweils eine Scheibe herausgetrennt und Metallographieproben herausgearbeitet. Die Gefügeauswertung erfolgte mittels computerunterstützter Bildanalyse, die Beurteilung der Graphitausbildung nach DIN EN ISO 945.

Die Auswertung der Schliffbilder ergab, dass es prinzipiell möglich ist, die Gefügeausbildung auch bei Gusseisenlegierungen durch einen Energieeintrag zu beeinflussen. Es gelang, die Zahl der eutektischen Zellen deutlich zu erhöhen. Mittelt man alle Werte der gemessenen eutektischen Zellen über dem Querschnitt, so ergibt sich bei der vibrierten Probe 4 eine Erhöhung um 36 % gegenüber der unvibrierten Probe 3. Außerdem konnte die Grafitausbildung so beeinflusst werden, dass sich kleinere und feinverteiltere Grafitlamellen ausschieden. Die besten Ergebnisse wurden dabei bei den Proben 4 und 6 erzielt. Bei Probe 2 erhöhte sich die Anzahl der eutektischen

Zellen nur geringfügig gegenüber der unvibrierten Probe, die Größe der Lamellen verringerte sich ebenfalls nur unwesentlich. Im Bild 62 und Bild 63 sind die Ergebnisse der Proben 3 und 4 gegenübergestellt.

Bei der Auswertung der Versuche musste festgestellt werden, dass die Vibrationsparameter, die bei der Rotgusslegierung zu einer positiven Gefügebeeinflussung und Verbesserung der Eigenschaften geführt hatten, für die Anwendung bei Gusseisen mit Lamellengraphit nicht zum gewünschten Effekt führen. Die Ergebnisse der Probe 2 bestätigen dies. Die Ursache dafür ist sicherlich im unterschiedlichen Erstarrungsverhalten der Werkstoffe zu suchen. Ein wichtiger Unterschied in der Versuchsdurchführung besteht außerdem darin, dass die Versuche mit Rotguss in Sandformen durchgeführt wurden, die Gusseisenschmelzen dagegen in oben offenen Kokillen.

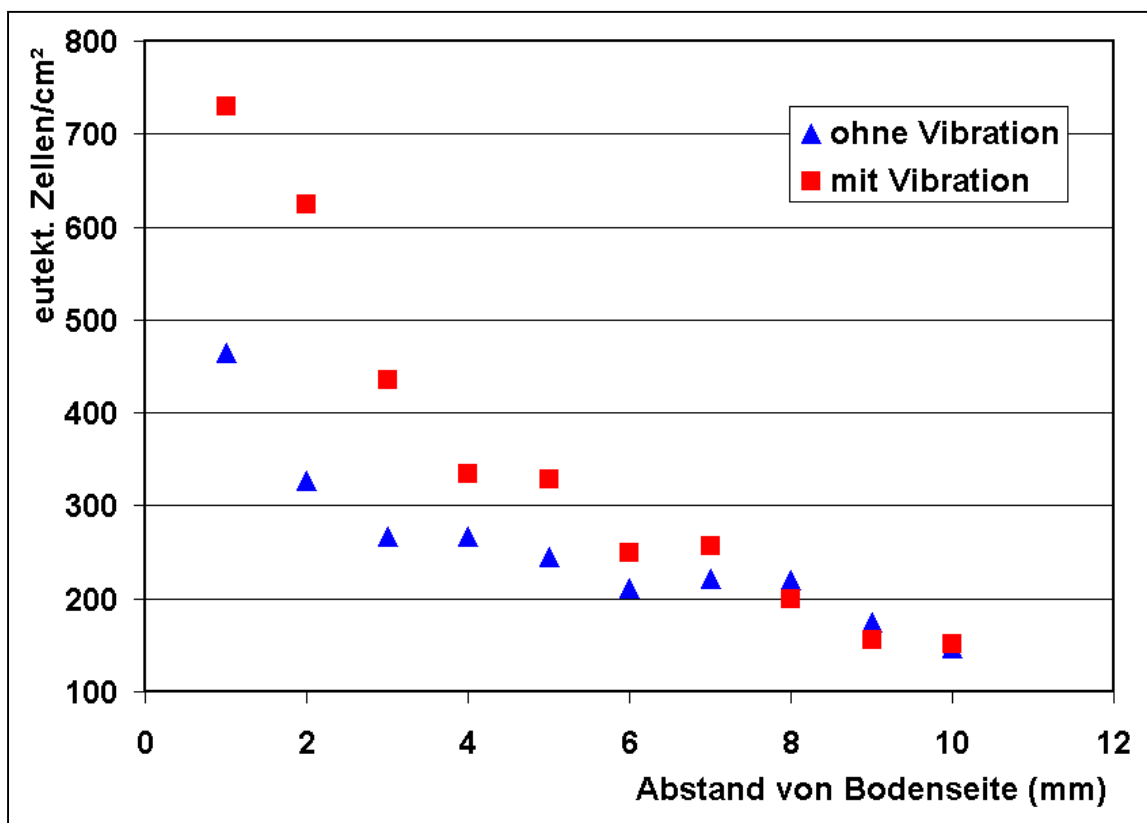


Bild 62: Anzahl der eutektischen Zellen (Proben 3/4) in Abhängigkeit von der Lage im Gussblock, Werkstoff EN-GJL300, Vibration mit 40 Hz und 0,8g

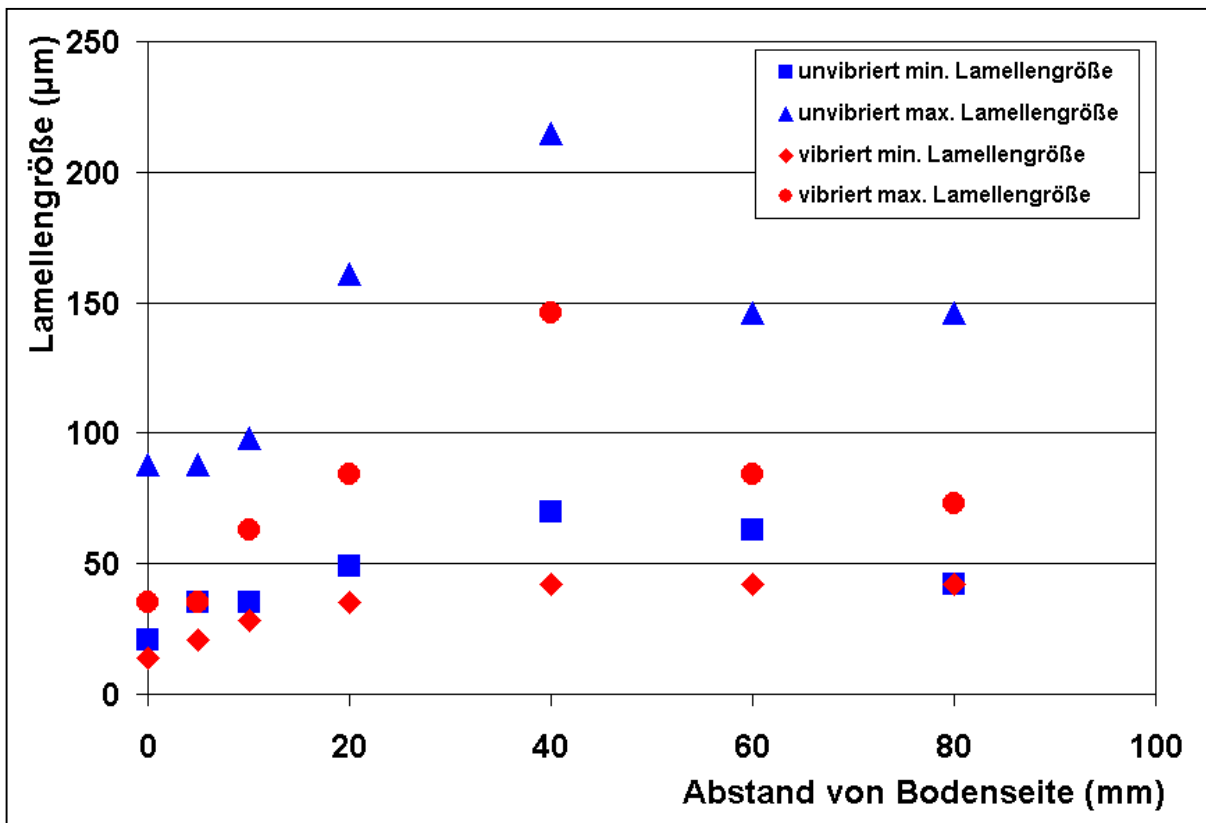


Bild 63: Minimale und maximale Lamellengröße (Proben 3/4) in Abhängigkeit von der Lage im Gussblock, Werkstoff EN-GJL300, Vibration mit 40 Hz und 0,8g

Diese ersten Ergebnisse zeigen eine positive Tendenz hinsichtlich der Beeinflussung von Gusseisenschmelzen durch Vibration während der Erstarrung.

Die Größe der Graphitlamellen variiert bei den unvibrierten Proben je nach Lage im Gussblock zwischen 21 und 215 µm, bei den vibrierten Proben dagegen nur zwischen 14 und 146 µm. Das ist bei den Maximalwerten eine Verringerung der Lamellengröße um 32 %. Die Zahl der eutektischen Zellen liegt je nach Ort im Gussblock zwischen 147 und 465 bei den unvibrierten Proben, durch den Vibrationseintrag werden zwischen 151 und 730 eutektische Zellen pro cm² erreicht, was eine deutliche Kornverfeinerung darstellt. Bei diesen Maximalwerten kann sogar eine Erhöhung der Zellenzahl um 57 % erzielt werden.

Es wird deutlich, dass es möglich ist, durch einen Energieeintrag die Grafitausbildung und die Anzahl der eutektischen Zellen zu verändern. Es ist notwendig, mit weiteren Versuchsreihen diese Aussagen zu untermauern und die Wirkungen der Vibrationsbehandlung hinsichtlich der gesamten Gussteileigenschaften zu untersuchen.

4.3. Die Herstellung von Zinkanoden

Zink kristallisiert hexagonal und hat nur die Basisebene der Elementarzelle als Gleitebenen. Daraus resultieren stark richtungsabhängige Eigenschaften bei texturbehaftetem Material. Umgeformtes Zink rekristallisiert bereits bei niedrigen Temperaturen, sodass mit der Kornneubildung die ausgeprägten dendritischen Strukturen zerstört werden. Reinzink ist für den Formguss völlig bedeutungslos.

Die Herstellung von Anoden aus Reinzink stellt dagegen eine spezielle Technologie dar. Die mechanischen Anforderungen an die Zinkanoden umfassen eine Zugfestigkeit von >65 MPa und eine Bruchdehnung von $>2,6$ %. Diese Werte müssen in der Anodenlängsrichtung gewährleistet werden. Dazu wird es notwendig, die Ausbildung von Stengelkorn quer zur Anodenlängsrichtung zu unterdrücken und ein feinglobulitisches Gefüge einzustellen. Die Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften erfordert zur Verhinderung der dendritischen Erstarrung eine entsprechende Kornfeinung. Neben Aluminium sind besonders Kadmium, Titan und Magnesium für die Kornfeinung geeignet [87, 88]. Diese chemische Kornfeinungsbehandlung ist nicht ganz unproblematisch, da sich die Modifizierungselemente im Sumpf des Elektrolyts sammeln und zu Verunreinigungen führen. Es galt zu untersuchen, inwieweit die Kornfeinung durch andere Verfahren eingestellt werden können.

Einen Hinweis zur Kornfeinung von Zink findet man in der japanischen Literatur [89]. Es wird beschrieben, dass Gussstücke aus Zink mit einer Reinheit von 99,9 % mit einem Aluminium-Oszillator unter Vibration erstarrten. Die Schwingungsamplitude betrug 4, 8 und 16 mm und die Frequenz 2,5; 5,0 und 7,5 Hz. Es wurde festgestellt, dass bei den höheren Frequenzen und großer Amplitude die Fläche der Stengelkörner verkleinert und die der globulitischen Körner vergrößert werden. Darüber hinaus wurde ein Einfluss der Gießtemperatur ermittelt, wonach bei niedrigen Temperaturen die Stengelkristalle gefeint, ihr Flächenanteil jedoch vergrößert wird.

Als Alternative zur chemischen Kornfeinung wurde das Vibrieren der erstarrenden Zinkschmelze untersucht, obwohl in den Grundlagenuntersuchungen in 3.2.2 keine Gefügebeeinflussung durch einen Vibrationseintrag nachgewiesen werden konnte.

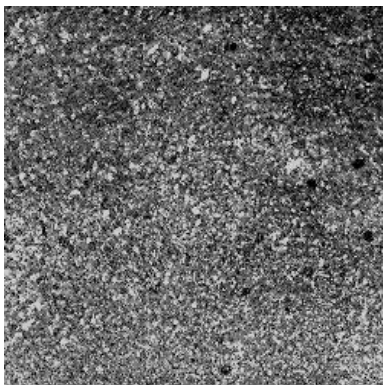
Eine zusätzliche Fragestellung bestand darin, inwieweit eventuell die Menge des Kornfeinungsmittels Aluminium durch die Kombination mit der Vibration verringert werden kann. Die Untersuchungen erfolgten an Barrenmaterial mit einem Querschnitt von 80 x 100 mm² und einer Höhe von 240 mm, das in Kokillen aus Gusseisen gegossen wurde. Über eingebrachte Kühlmittelkanäle wurde die Temperatur der Kokille eingestellt.

Die Kokille wurde auf dem in (3.1.2.2) beschriebenen Vibrationstisch fest verspannt, sodass es möglich wurde, die Schmelze während des gesamten Erstarrungsvorganges zu vibrieren.

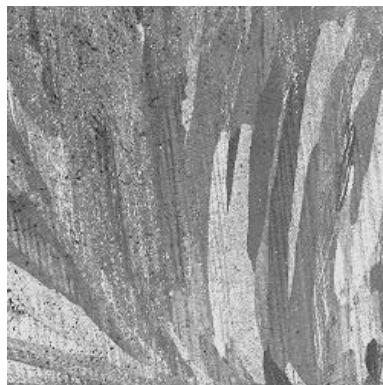
Als Parameter wurden variiert:

Gießtemperatur (Abstichtemperatur)	430 ... 490 °C
Kokillentemperatur	65 ... 310 °C
Vibrationsfrequenz	5 ... 50 Hz
Vibrationsbeschleunigung	0,2 ... 2,9g
Aluminiumgehalt in der Schmelze	0 ... 0,06 %

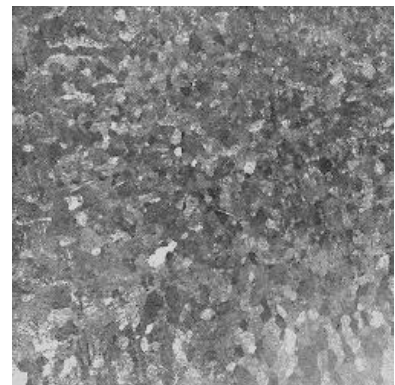
Im Bild 64 sind repräsentative Gefügebilder einzelner Versuche dargestellt.



0,2 % Al,
ohne Vibration



0 % Al,
Vibration mit 10 Hz; 0,4



0,06 % Al,
Vibration mit 10 Hz; 0,4g

Bild 64: Gefügebilder Zinkversuche

Die Vibration während der Erstarrung hat bei diesem Werkstoff zu keiner befriedigenden Kornfeinung geführt. Lediglich bei einem Aluminiumgehalt von 0,06 % ist eine spürbare Veränderung in Richtung globulitischer Gefügeausbildung erkennbar. Trotz umfangreicher Variation der Versuchsparameter gelang es nicht, die Kornfeinung durch eingebrachte Energie während der Erstarrung zu erreichen. Durch die Kombination mit der Vibrationsbehandlung konnte aber die zur Kornfeinung nötige Menge an Aluminium deutlich reduziert werden (von 0,2 % auf 0,06 %).

Mit den Untersuchungen wurde die Aussage in von Reif in [17] bestätigt, dass reine Metalle durch eine Schwingungsbehandlung während der Erstarrung nicht korngfeint werden können. In dieser Arbeit wurde weiterhin festgestellt, dass erst dann ein feinkörniges Gefüge einstellbar ist, wenn die Schmelze geeignete Zusätze in entsprechender Konzentration enthält. Auch diese Aussage kann mit den Untersuchungsergebnissen bestätigt werden, da eine Gefügebeeinflussung erst ab Aluminiumgehalten von 0,06 % zu verzeichnen war.

5. Erarbeitung eines Projektes zur Anwendung der Vibration bei der Herstellung von Gussteilen

Ausgehend von den positiven Ergebnissen, die mit der Rotgusslegierung Rg5 durch eine Vibrationsbehandlung während der Erstarrung erzielt werden konnten, galt es, ein Projekt zur Anwendung dieses Verfahrens in einem Unternehmen zu erarbeiten.

Das Unternehmen ist eine mittelständische Schwermetallgießerei. Sie stellt vorrangig Gussteile aus Kupferlegierungen wie Rotguss, Bronze oder Messing im Sand-Strang- und Schleuderguss her. Um den steigenden Anforderungen der Gussteilabnehmer gerecht zu werden, ist es auch in dieser Gießerei erforderlich, die Qualität der Gussstücke durch technologische Weiterentwicklungen zu erhöhen und zu sichern. Die Verbesserung des Gussgefüges spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe machte sich eine Untersuchung der betrieblichen Voraussetzungen im Unternehmen erforderlich. Dabei mussten neben dem Zusammentragen von allgemeinen Informationen vor allem jene Möglichkeiten erfasst werden, welche bei der Realisierung genutzt werden können.

Es galt, Vorschläge für die praktische Umsetzung einer Vibrationseinrichtung zu erarbeiten. Diese Entwürfe werden vor allem daran gemessen, wie gut sie sich zum einen in die bestehende maschinentechnische Situation einbinden lassen und zum anderen die Einleitung von Vibrationsschwingungen in das erstarrende Gussstück entsprechend den Erfordernissen ermöglichen.

Da festgestellt wurde, dass mit der Kombination von Kippguss und Vibrationsbehandlung optimale Effekte erzielt werden können, wurde diese Möglichkeit favorisiert. Eine Erweiterung des Kippgusses ist das Durvill-Verfahren. Hierbei ist die Gießform mit einem speziellen Gießtümpel versehen, in welches die gesamte für einen Abguss benötigte Schmelze gefüllt wird. Dazu wird die Form um 90° nach vorn gekippt. Nach Füllung des Eingussbeckens wird die Form langsam zurückgekippt, sodass die Schmelze einströmen kann [90, 91]. Dieses Verfahren sollte ebenfalls in die technische Realisierbarkeit des Projektes mit einbezogen werden.

Die Projektaufgabe bestand also demzufolge vordergründig in folgenden Aufgaben:

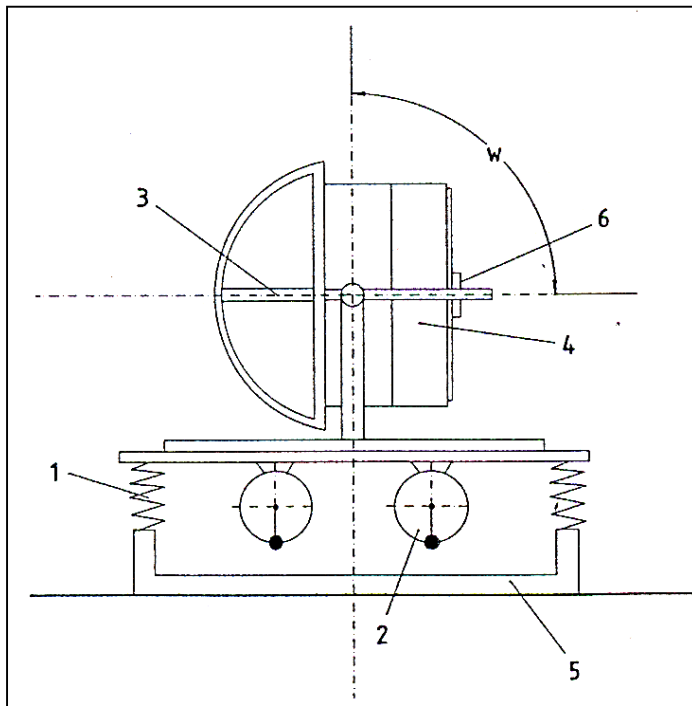
1. Die Gießstrecke muss sich für die beschriebenen Kippgussvarianten sowie die Vibrationsbehandlung und deren Kombination eignen.
2. Die Flexibilität der vorhandenen Gießstrecke darf nicht beeinträchtigt werden.
3. Einfache Bedienung und schnelle Umrüstung auf das jeweils erforderliche Verfahren müssen garantiert sein.
4. Die Arbeitssicherheit ist zu gewährleisten.
5. Die Umbaukosten sollen minimal sein.

Unter Nutzung der technologischen Kenngrößen und Beachtung der genannten Bedingungen galt es, konstruktive Unterlagen für den Umbau der Gießstrecke zu erarbeiten. Dafür war es erforderlich, die betrieblichen Gegebenheiten in ihrer Gesamtheit zu analysieren, um die nötigen Berechnungen für die Anpassung der Vibrationsparameter realisieren zu können.

5.1. Erläuterung des Vibrationsprozesses anhand eines schwingungstechnischen Modells

Zur Vibrationsbehandlung muss die Form in ein Schwingssystem mit Erreger, Feder und Dämpfungselement integriert werden. Dabei sollte die zu vibrierende Gesamtmasse möglichst klein bleiben, um die Kräfte, welche zur Erregung erforderlich sind, zu begrenzen. Um eine effektive Vibration zu realisieren, ist eine schwingungstechnische Abkopplung (Isolation) von Restmassen unbedingt notwendig. Außerdem ist das Auftreten von Resonanzfällen durch eine entsprechende Abstimmung der Bauelemente bezüglich ihrer Eigenfrequenzen auf die Vibrationsparameter zu vermeiden.

Ein Wagen der vorhandenen Gießstrecke wurde als Versuchseinrichtung im Unternehmen umgebaut, im Bild 65 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt.



- 1 Feder-, Dämpfungselemente
- 2 Schwingungserreger
- 3 Kippeinrichtung
- 4 Gießform
- 5 Untergestell
- 6 Verspanneinrichtung
- w Kippwinkel

Bild 65: Prinzipdarstellung der Versuchseinrichtung

Vereinfachend lässt sich für die Versuchseinrichtung das schwingungstechnische Berechnungsmodell beschrieben (Bild 66).

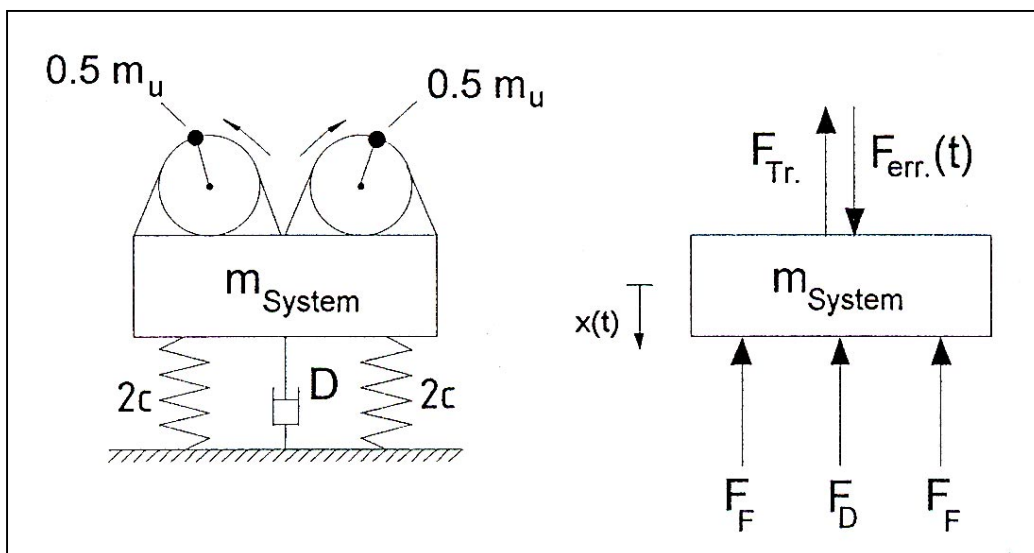


Bild 66: Berechnungsmodell der Vibrationseinrichtung

In diesem Modell werden alle zu erregenden Massen (Tisch, Gießform mit Inhalt, Verspanneinrichtung, Vibratoren, Federelemente) unter dem Begriff Masse des Systems zusammengefasst.

Die angreifenden Kräfte sind:

$F_{Tr} = m_{System} x''$	Trägheitskraft
$F_{Err}(t)$	Erregerkraft (zeitabhängig)
$F_F = 2 c x$	Federkraft
$F_D = D x'$	Dämpfungskraft

Dabei bedeuten:

m_u	Unwuchtmasse
r_u	Abstand der Unwuchtmasse vom Drehpunkt
c	Federkonstante
m_{System}	Masse aller in Schwingung befindlichen Baugruppen
D	Dämpfungskonstante
$x(t)$	zurückgelegter Weg in Abhängigkeit von der Zeit
x	Weg
x'	Geschwindigkeit
x''	Beschleunigung
Ω	Erregerkreisfrequenz

Die Erregerkraft $F_{Err}(t)$ ist wie folgt definiert:

$$F_{Err}(t) = m_u r_u \Omega^2 \sin \Omega t \quad (3)$$

Für das im

Bild 66 dargestellte Berechnungsmodell lässt sich die folgende Bewegungsdifferentialgleichung aufstellen, die für den stationären bzw. eingeschwungenen Zustand gilt.

$$m_{System} \cdot x'' + D \cdot x' + 4cx = F_{Err}(t) \quad | : m_{System}$$

$$x'' + \frac{D}{m_{\text{System}}} x' + 4 \frac{c}{m_{\text{System}}} x = \frac{m_u}{m_{\text{System}}} r_u \Omega^2 \sin \Omega t \quad (4)$$

Folgende Größen werden zusammengefasst :

$$\frac{D}{m_{\text{System}}} = 2\delta \quad ; \quad \frac{4c}{m_{\text{System}}} = \omega_0^2 \quad (5)$$

δ - Abklingkonstante, ω_0 - Eigenkreisfrequenz

In Gleichung 4 eingesetzt, erhält man die Differentialgleichung der Form:

$$x'' + 2\delta \cdot x' + \omega_0^2 x = \frac{m_u}{m_{\text{System}}} r_u \Omega^2 \sin \Omega t \quad (6)$$

Gleichung 6 wird als Bewegungsdifferentialgleichung der erzwungenen, gedämpften Schwingung bezeichnet.

Die Lösung dieser Differentialgleichung ergibt die stationäre Bewegungsgleichung (Schwingungsamplitude in Abhängigkeit von der Zeit) gemäß Gleichung 7.

$$x(t) = \frac{m_u r_u}{m_{\text{System}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\vartheta^2 \eta^2}} \cdot \eta^2 \sin(\Omega t - \varphi) \quad (7)$$

Dabei wurden in Gleichung 7 folgende Größen ersetzt:

$$\vartheta = \frac{\delta}{\omega_0} \quad ; \quad \eta = \frac{\Omega}{\omega_0} \quad ; \quad \tan \varphi = \frac{2\vartheta \eta}{1-\eta^2}$$

ϑ - LEHRsches Dämpfungsmaß oder Dämpfungsgrad

η - Abstimmungsverhältnis

$\tan \varphi$ - Phasenfrequenzgang

[92, 93, 94, 95, 96].

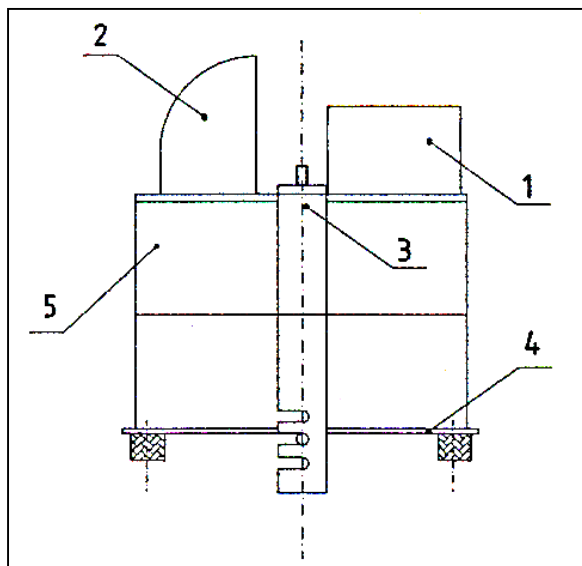
5.2. Konstruktive Auslegung der Vibratoren

Die experimentellen Untersuchungen im kleintechnischen Maßstab haben ergeben, dass die Apparatur für eine optimale Gefügeausbildung folgende Parameter einhalten sollte:

Frequenz	25 bis 50 Hz
Beschleunigung	1 bis 2g
Schwingungsamplitude	$\leq 0,8$ mm (möglichst 1 mm nie überschreiten, da sonst die Form zerstört werden kann)

Ziel der schwingungstechnischen Dimensionierung ist es, die Baugruppen der Vibrationseinrichtung so zu wählen, dass diese Bedingungen erfüllt werden.

Um die Vibrationsmotoren auswählen zu können, ist die notwendige Erregerkraft zu ermitteln. Dafür muss die Masse aller schwingenden Teile bestimmt werden (Bild 67).



- 1 Vibrationsmotor
- 2 Gießtümpel
- 3 Verspanneinrichtung
- 4 obere Platte
- 5 Gießform (Formstoff, Metall, Ober- und Unterkasten)

Bild 67: Darstellung der schwingenden Teile

Die Gesamtmasse ergibt sich aus der Summe aller Einzelmassen und beträgt ca. 450 kg.

In Gleichung 7 werden die Beziehungen

$$c_{\text{gesamt}} = 4c = \omega_o^2 \cdot m_{\text{System}} ; F_{\text{Err.}}(t) = m_u r_u \Omega^2 \sin \Omega t$$

eingesetzt. Für die Amplitude ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$x(t) = \frac{F_{\text{Err.}}(t)}{c_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\vartheta^2\eta^2}} \quad (8)$$

Die maximale Amplitude errechnet sich dann aus:

$$x_{\text{Max.}} = \frac{F_{\text{Err.Max.}}}{c_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\vartheta^2\eta^2}} \quad (9)$$

Wird die Gleichung nach der Erregerkraft umgestellt, dann erhält man:

$$F_{\text{Err.Max}} = x_{\text{Max}} \cdot c_{\text{gesamt}} \cdot \sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\vartheta^2\eta^2} \quad (10)$$

Um das Abstimmungsverhältnis η berechnen zu können, benötigt man die Erregerkreisfrequenz und die Eigenkreisfrequenz des Schwingungssystems.

Die Erregerkreisfrequenz Ω wird aus der Erregerfrequenz f berechnet.

$$\Omega = 2\pi \cdot f \quad (11)$$

Die Eigenkreisfrequenz bestimmt man nach Gleichung 5.

Weiterhin wird das LEHRsche Dämpfungsmaß ϑ zur Berechnung der maximalen Erregerkraft $F_{\text{Err.Max}}$ benötigt. Zu diesem Zweck ist durch einen Versuch für das vorliegende System die Ausschwingkurve zu ermitteln (Bild 68).

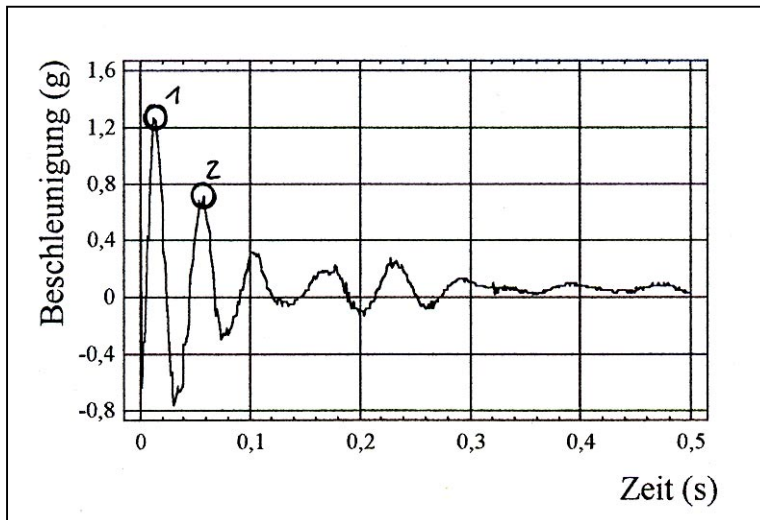


Bild 68: Experimentell ermittelte Ausschwingkurve [92]

Aus dieser Kurve werden zwei Messpunkte entnommen und in die folgenden Gleichungen eingesetzt :

$$\vartheta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \quad ; \quad \Lambda = \frac{1}{n} \cdot \ln \left| \frac{q(t_0)}{q(t_0 + nT)} \right| \quad (12)$$

Λ - Logarithmisches Dekrement,

T - Periodendauer,

n - Anzahl der Perioden,

t_0 - Zeitpunkt, bei dem die Ausschwingkurve ein Extremum aufweist

q - Ordinatenwert in der Ausschwingkurve (Beschleunigung)

Für die Ermittlung der maximalen Erregerkraft müssen weitere Berechnungen, wie der Federsteifigkeit, des LEHRschen Dämpfungsmaßes und der Gesamtfederkonstante erfolgen, die einzelnen Berechnungsschritte sind in [92 und 93] ausführlich beschrieben. Nach Bestimmung aller nötigen Werte kann die Erregerkraft nach Gleichung 10 bestimmt werden.

Die berechnete maximale Erregerkraft von 8146,5 N gilt für die Vibrationsbehandlung von Formen, welche die maximal möglichen Kastenabmessungen aufweisen sowie die maximale Metallmasse von 60 kg beinhalten. Die für die Vibrationsbehandlung

benötigte Erregerkraft ist abhängig vom tatsächlichen Gewicht der verwendeten Gießform.

Ausgehend von diesen Berechnungen können die Vibrationsmotoren ausgewählt werden. Damit eine lineare Schwingungsbewegung erzeugt wird, sind zwei Vibrationsmotoren notwendig, die mit entgegengesetzter Drehrichtung laufen.

Da die Erregerkraft maximal 8146,5 N betragen soll, darf demzufolge die Zentrifugalkraft jedes Motors 4073 N nicht überschreiten.

Gewählt wurden: Netter Dreiphasen Elektrovibratoren

Typ NEG 500502

maximale Zentrifugalkraft: 4922 N (bei 50 Hz Netzfrequenz)

Bei diesen Vibratoren kann die Zentrifugalkraft eingestellt werden, indem die Lage einzelner Unwuchtscheiben zueinander verändert wird.

Die Zentrifugalkraft der Vibratoren kann weiterhin mit Hilfe eines Frequenzumrichters (z. B. Netter Vibrotron-Frequenzumrichter SRF 2-015/4) in Abhängigkeit von der Drehzahl verstellt werden. Durch diese Verstellmöglichkeit lässt sich die oben genannte Forderung nach der vorgegebenen maximalen Erregerkraft erfüllen.

5.3. Erarbeitung und Bewertung von Varianten zur technischen Realisierung einer kombinierten Schmelzebehandlungseinrichtung

5.3.1. Realisierungsvorschläge für das Kippgussverfahren

Im ersten Arbeitsschritt des Projektes wurden Untersuchungen zur technischen Realisierung der Kippeinrichtung für die Formkästen durchgeführt. Dabei war zu beachten, dass bisher mögliche Verfahrensschritte im Gießprozess nicht beeinträchtigt werden. Dazu gehört auch, dass der herkömmliche Kippguss und der neu geplante Extremkippguss anwendbar sind. Das Bild 69 zeigt die für das Durvill-Verfahren notwendigen Winkelstellung der Formkästen.

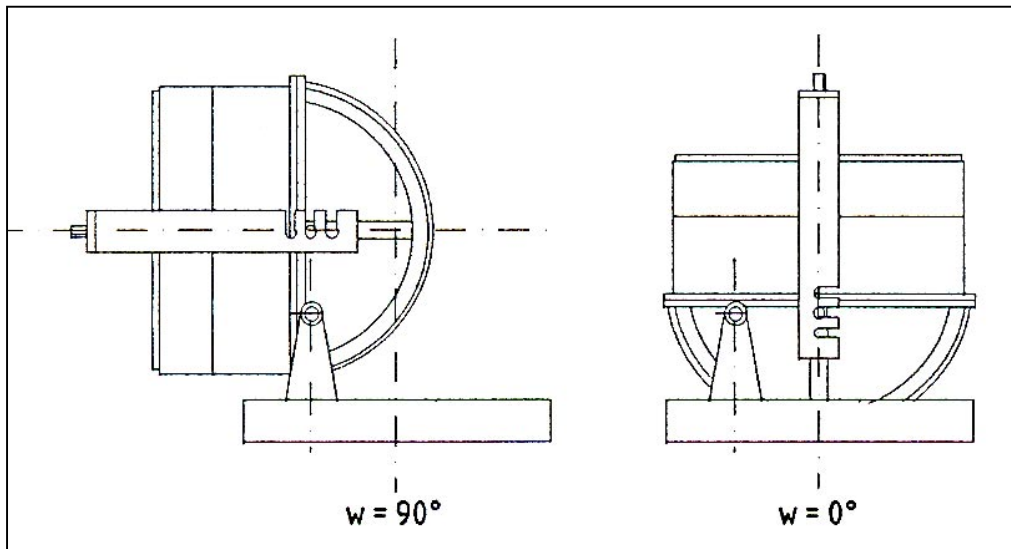


Bild 69: Notwendige Winkelstellungen w für den Extremkippguss

Bei der vorhandenen Ausführung des Formenwagens sind die notwendigen Winkelstellungen von bis zu 90° nicht mehr realisierbar, da es zu einer Kollision der Formkastenauflage mit dem Untergestell des Wagens kommen würde. Man benötigt einen Drehpunkt, der diese geforderten Bewegungen zulässt. Die im Bild 69 dargestellte Lösung ist für das Kippen des Formkastens um 90° besser geeignet, jedoch wird bei dieser Variante der bisherige Kippguss eingeschränkt. Dort war nach dem Abguss ein Zurückkippen bis zu 40° vorgesehen, um den metallostatischen Druck der Schmelze im Eingusssystem zur Dichtspeisung des Gussteiles mit auszunutzen. Eine andere Möglichkeit ist die im Bild 70 gezeigte Ausführung, bei der man die bisherige Konstruktion belässt und zusätzlich eine Platte anbringt. Diese wird drehbar am Ende der unteren Platte befestigt.

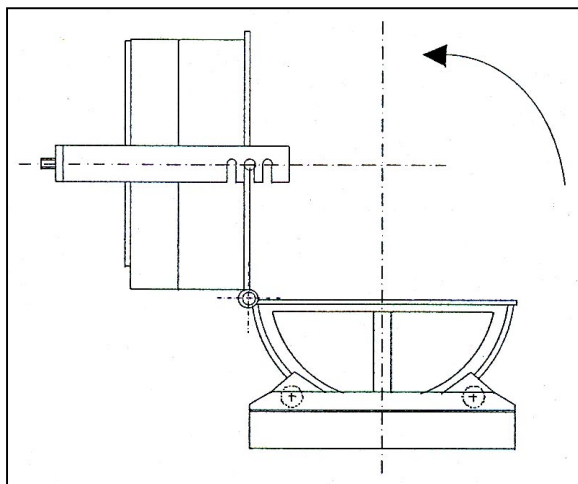
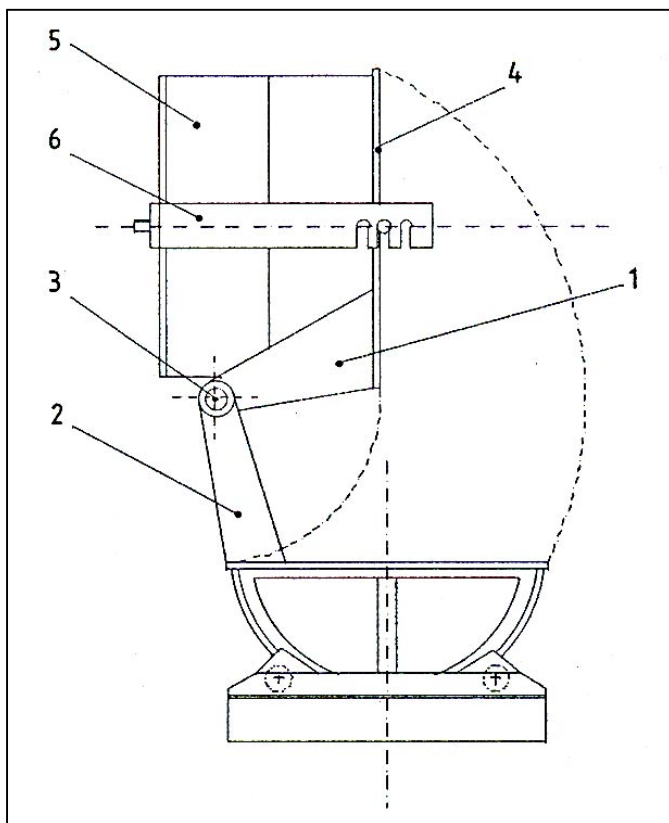


Bild 70: Drehpunkt am äußeren Ende der unteren Platte

Es ist in diesem Bild zu sehen, dass beide Kippgussarten möglich sind. Bei um 90° gekipptem Formkasten ist jedoch zu erkennen, dass der Schwerpunkt der gesamten Kippvorrichtung außerhalb des Wagens liegen würde. Um das zu verhindern, wird der Drehpunkt wie folgt festgelegt. Man schweißt an die beiden Platten jeweils links und rechts eine Wange an. An deren Ende wird eine Lagerung angebracht, welche es erlaubt, die beiden Wangen jeder Seite miteinander zu verbinden. Somit erhält man den für diesen Fall günstigsten Drehpunkt, wie in Bild 71 dargestellt.



- 1 innere Wange
- 2 äußere Wange
- 3 Drehpunktlagerung
- 4 Formkastenauflage
- 5 Formkasten
- 6 Verspannung des Formkastens

Bild 71: Darstellung der neuen Kippkonstruktion

Es wurden verschiedene Lösungen, die in der Technik für eine solche Kippbewegung üblich sind, auf ihre Durchführbarkeit untersucht. Die in Frage kommenden Varianten mussten dahingehend überprüft werden, ob sich eine technisch sinnvolle und einfach zu bedienende Konstruktion ergibt. Es galt, die kostengünstigste Variante auszuwählen. Nach Analyse von vier verschiedenen Varianten und der Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen wurde die Lösung des Kippens durch einen von oben angreifenden Seil- oder Kettenzug favorisiert.

Diese im Bild 72 dargestellte Variante zeichnet sich besonders durch eine einfache Funktionsweise aus. Man bringt über der Gießstrecke eine Kranbahn an, auf der eine Laufkatze mit einem daran befestigten Hebezeug verfahren werden kann. Als Hebezeug eignen sich sowohl Kettenzüge als auch Seilwinden, die per Hand oder über einen elektrischen oder hydraulischen Antrieb bewegt werden können.

Für den Kippvorgang wird das Zugmittel (Seil oder Kette) mit einem Haken am Kippmechanismus eingehangen und nach oben gezogen. Da sich der Schwerpunkt bei um 90° gekipptem Formkasten noch vor dem Drehpunkt befindet, kippt der Formkasten selbständig wieder zurück. Das Seil dient während der Abwärtsbewegung nur dem geregelten Ablassen der Gießform (mit vorgegebener Geschwindigkeit).

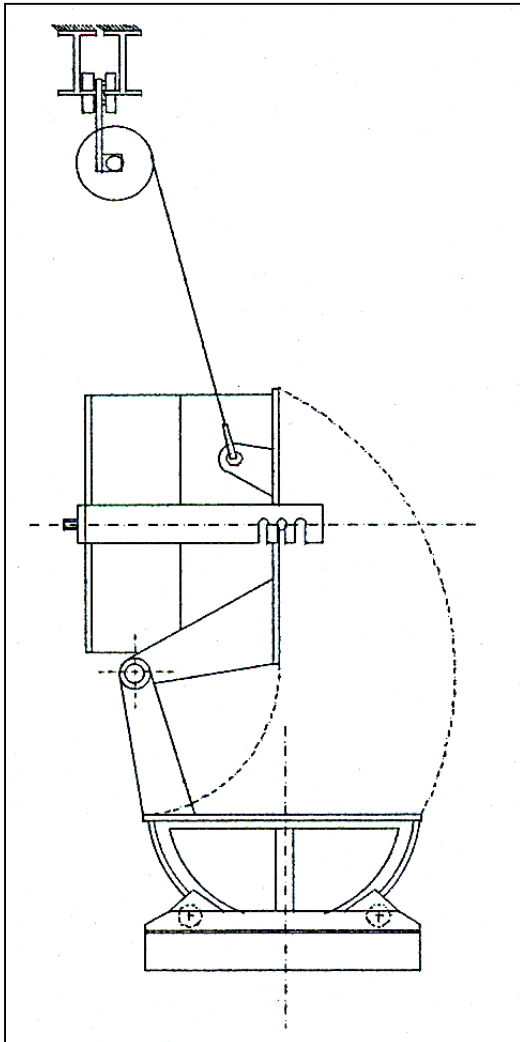


Bild 72: Kippvorgang mittels Hebezeug

Vorteile:

über Gießbereich verfahrbar, kein Hebezeug für jeden Gießplatz erforderlich,
 einfache Verbindung mit Kippvorrichtung (zum Beispiel: Haken),
 sehr gleichmäßige Bewegung möglich,
 einfache Bauweise

Nachteile:

Kranbahn fordert erhöhten Platzaufwand über dem Gießbereich

Diese Lösung zeichnet sich besonders durch geringere Kosten, hohe Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit, geringen Energieaufwand sowie eine einfache Bedienung durch das Anlagenpersonal aus.

5.3.2. Konzept zur technischen Umsetzung der Schmelzebehandlung durch Vibrationseintrag

Wie bereits erläutert wurde, sind positive Ergebnisse im Hinblick auf die Verbesserung des Gussgefüges bei einem Vibrationseintrag mit einer Frequenz von 25 bis 50 Hertz und Beschleunigungen von 1-2g zu erwarten. Ausgehend von diesen Feststellungen sollte eine geeignete Apparatur konstruiert werden, die die genannten Parameter realisiert.

Dazu muss der Formkasten federnd gelagert werden, um ihn schwingungstechnisch zu entkoppeln. Das heißt, es sollen möglichst keine Schwingungen in das Fundament oder in benachbarte Bauteile übertragen werden. Zwei Varianten für das Anbringen der Federungselemente zeigt das Bild 73. Bei Gestaltungsvorschlag 1 werden die Federelemente unterhalb der Kippkonstruktion angebracht. Hierbei bleibt die Stabilität der darüberliegenden Kippvorrichtung weitgehend erhalten. Bei Variante 2 belässt man die bisherige Ausführung des Formenwagens. Die Schwingungsisolatoren werden in den oberen Teil der neuen Kippkonstruktion eingebaut.

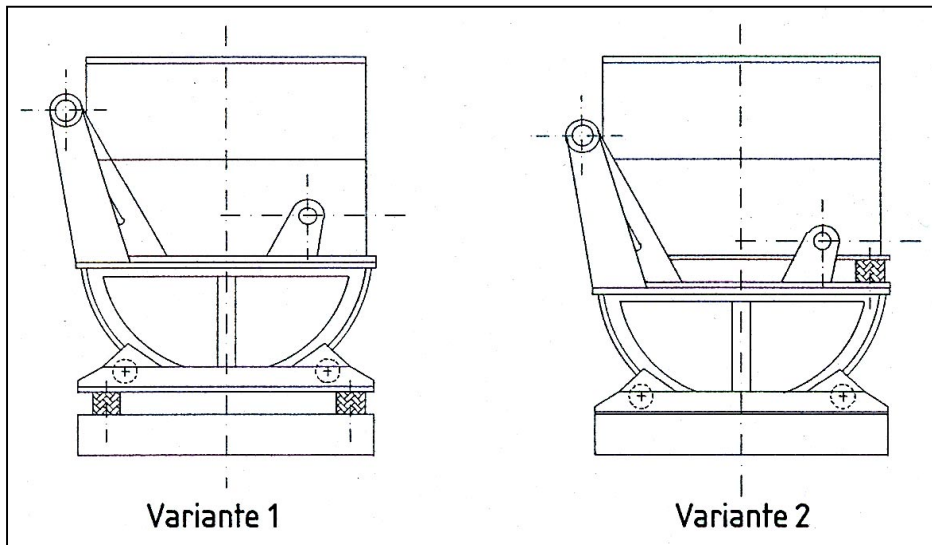


Bild 73: Lage der Federungselemente

Beide Varianten sind gut geeignet, um die Schwingungen während der Vibrationsbehandlung zu kompensieren. Das Ziel für die spätere Auslegung der Vibratoren ist jedoch, so wenig wie möglich Masse in Schwingung versetzen zu müssen.

Deshalb ist Variante 2 die günstigere Lösung. Außerdem würde bei Variante 1 die Schwingung auf die gesamte Konstruktion, die für die Realisierung des Extrem-Kippgusses aufgesetzt wurde, wirken und vor allem im Drehpunkt nachteilig sein, da dort Gleitlager angebracht sind und übermäßige Schwingungen zum Ausschlagen der Lagerung führen würde.

Eine Voraussetzung war laut Aufgabenstellung, dass jede Gießform einzeln vibriert werden kann. Da die Formen nacheinander abgegossen werden und sofort nach dem Abguss mit der Vibrationsbehandlung begonnen wird, sollte jeder Kasten auch seine(n) eigenen Vibrator(en) haben.

Ein Vorschlag für die konstruktive Gestaltung der Vibrationseinrichtung ist im Bild 74 dargestellt.

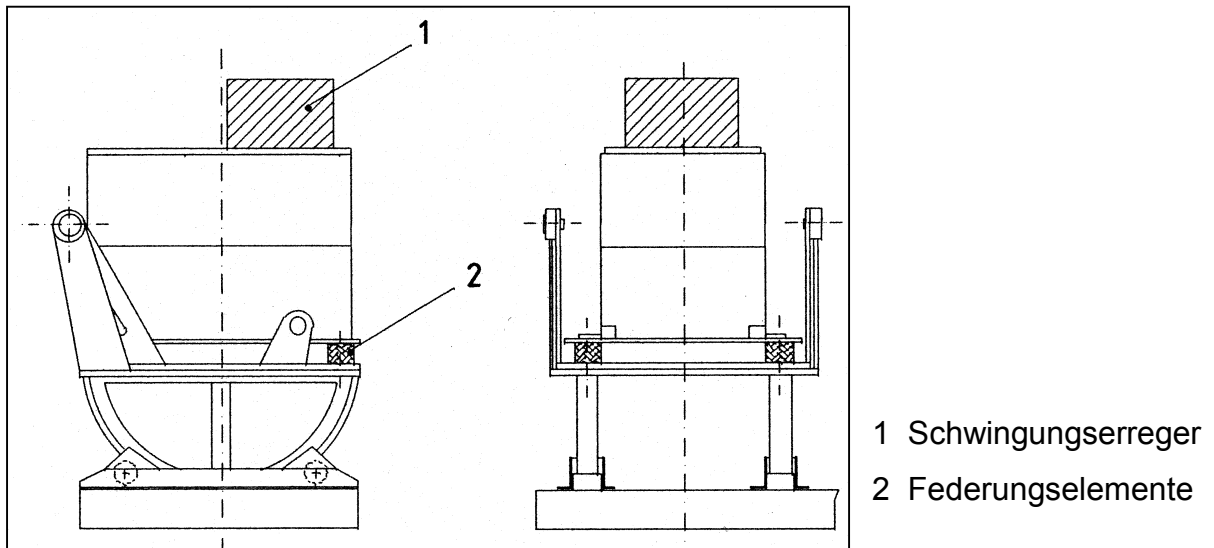
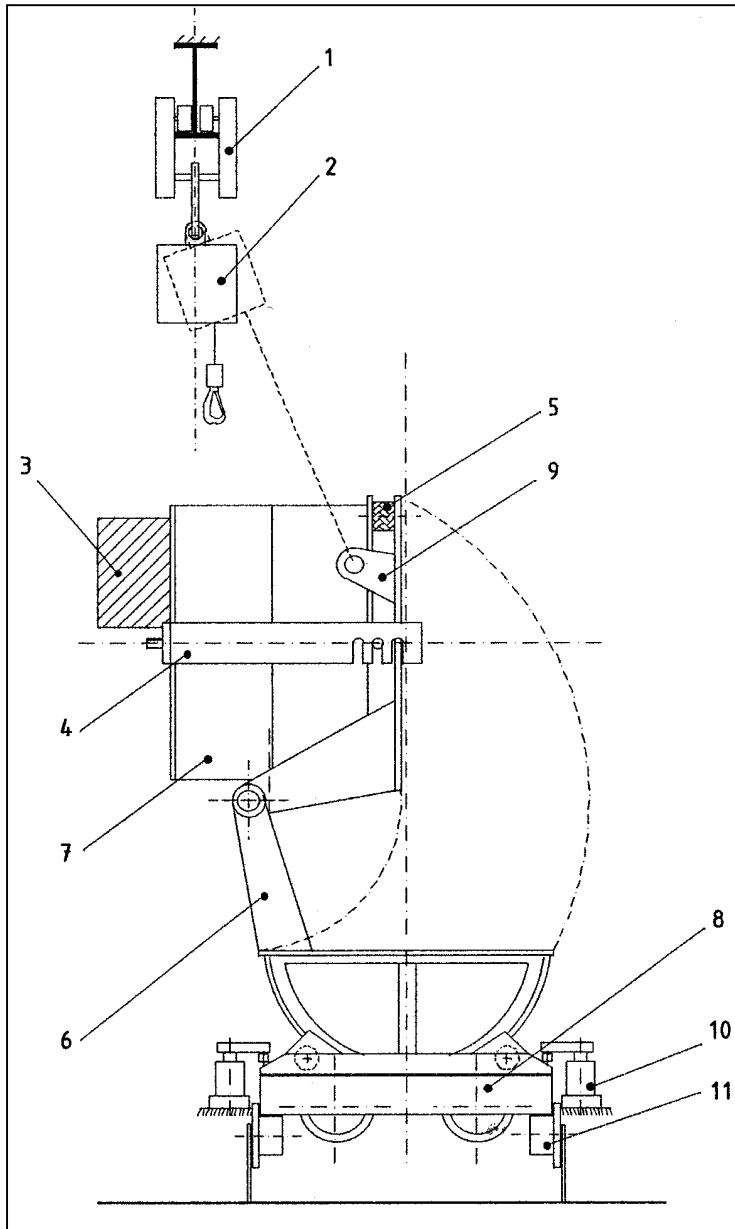


Bild 74: Darstellung der Vibrationseinrichtung

5.3.3. Kombinierte Schmelzebehandlungsanlage

Um die Vibrationsbehandlung auch in Kombination mit den Kippgussvarianten anwenden zu können, galt es im nächsten Projektschritt, beide Verfahren zu kombinieren. Im Bild 75 sind die in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 ausgewählten Varianten zur Realisierung der Einzelaufgaben zusammengefasst und als Entwurfsskizze dargestellt.



- | | | |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 Laufkatze | 5 Schwingungsisolatoren | 9 Kranhakenöse |
| 2 Seilwinde / Kettenzug | 6 Drehpunktaufhängung | 10 Schwenkspanner |
| 3 Schwingungserreger | 7 Gießform | 11 Laufrollen im Gießbe- |
| 4 Verspanneinrichtung | 8 Wagenuntergestell | bereich |

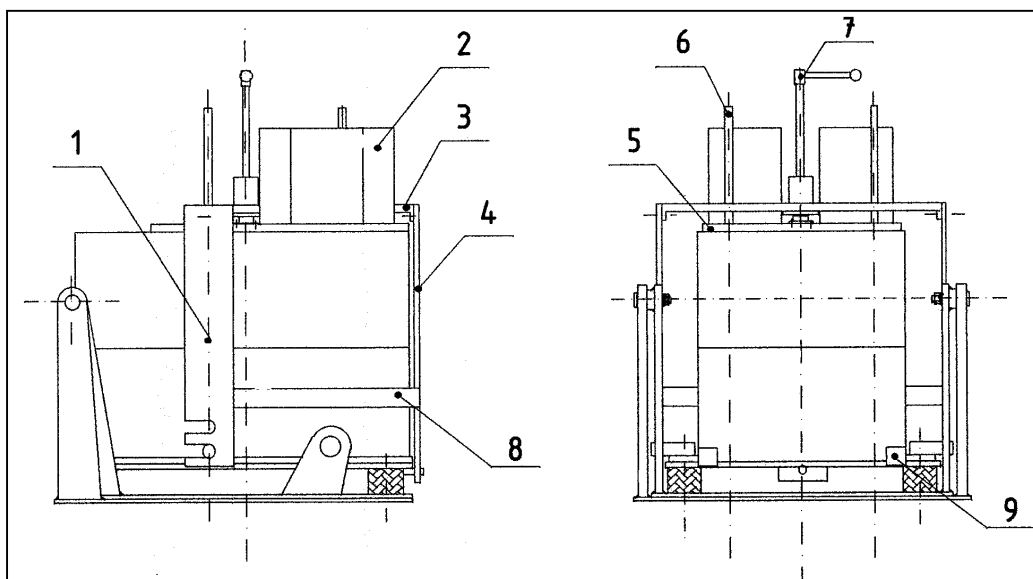
Bild 75: Entwurfsskizze der kombinierten Schmelzebehandlungseinrichtung

Wie im Bild 75 ersichtlich, wird der Formkasten mit Hilfe einer Verspanneinrichtung auf der Kippkonstruktion befestigt, damit er während des Kippvorganges nicht verrutschen kann. Das Hebezeug ist flexibel an einer Laufkatze aufgehängt. Es stellt sich

je nach Kippwinkel in die jeweilige Richtung. Die Laufkatze rollt auf einem Träger. Der Antrieb ist somit über dem gesamten Gießbereich fahrbar.

Damit der Wagen während des Abgusses stehen bleibt, muss er festgehalten werden. Dies kann zum Beispiel durch sogenannte Schwenkspanner geschehen. Sie werden hydraulisch oder pneumatisch betätigt und drücken den Wagen nach unten gegen die Laufrollen.

Damit die Formkästen bei der Durchführung des Kippgusses nicht vom Wagen rutschen, werden sie mit Hilfe einer Verspanneinrichtung auf der oberen Platte befestigt. Eine Möglichkeit einer solchen Verspanneinrichtung ist im Bild 76 dargestellt.



- | | | |
|-------------------|------------------|----------------|
| 1 Seitenblech | 4 Rückblech | 7 Spannspindel |
| 2 Vibrationsmotor | 5 Verspannplatte | 8 Aussteifung |
| 3 Jochblech | 6 Führungsstange | 9 Anschläge |

Bild 76: Verspanneinrichtung für die Formkästen

Die Verspannung der Formkästen wird mit Hilfe einer Spannspindel, welche die Verspannplatte fest auf die Form drückt, realisiert. Auf der Oberseite dieser Verspannplatte sind die Vibratoren befestigt, welche bei Bedarf auch ohne weiteres entfernt werden können.

Alle weiteren Berechnungen zur konstruktiven Umsetzung sind in [93] ausführlich dargestellt.

Um die Vibrationsbehandlung erstarrender Metallschmelzen in Kombination mit den Kippgussverfahren erfolgreich realisieren zu können, machen sich weitere Anpassungsarbeiten erforderlich:

- Zur Realisierung des Abgusses bei der Durchführung des Extremkippgusses (90°) wird ein Gießgehänge benötigt, welches die veränderten Anforderungen bezüglich der Gießhöhe und des Abstandes vom Wagen erfüllt.
- Die Absaugung der Gießgase während und nach dem Abguss muss angepasst werden, da es durch das Kippen der Formkästen und durch den in diesem Bereich liegenden Antrieb der Kippeinrichtung zu Kollisionen kommen kann.
- Durch das Anbringen der Vibrations- und Kippeinrichtung ist eine neue Auflagehöhe der Formkästen entstanden (70 mm höher). Da sich dadurch auch die Höhe in der Entleerstation verändert, sind Anpassungsarbeiten notwendig
- Um einer Zerstörung der Form sowie einer Beschädigung der Kipp- und Vibrationseinrichtung vorzubeugen, muss verhindert werden, dass schon während des Kippvorganges die Vibratoren eingeschaltet werden können. Dies lässt sich zum Beispiel durch Endschalter realisieren.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei metallischen Werkstoffen entstehen je nach Legierungstyp und Erstarrungsbedingungen unterschiedliche Gussgefüge. Die Art des Gefüges ist entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes und in der Folge für die technologischen Gebrauchseigenschaften der gegossenen Bauteile.

Kornfeinungsbehandlungen führen zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften im Gussteil. Unter bestimmten Bedingungen bietet die mechanische Schmelzebehandlung Vorteile im Vergleich zur chemisch-metallurgischen.

Aus der Literatur ließ sich folgender Stand der Technik zum Thema Vibrationsbehandlung erstarrender Metallschmelzen ableiten:

Die Wirkung der Schmelzebehandlung durch Vibration wurde bisher meist nur punktuell an verschiedenen Werkstoffen untersucht. Es konnten positive Ergebnisse, wie z. B. Kornfeinung oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Dichte festgestellt werden. Die Ergebnisse beschränkten sich im Wesentlichen auf Untersuchungen im Labormaßstab. Der Wirkmechanismus der mechanischen Kornfeinung wurde einerseits über den Effekt der Keimmultiplikation (abgebrochene Dendritenäste wirken als Keime in der Schmelze) und andererseits über den Effekt der dynamischen Keimbildung (der Energieeintrag unterstützt direkt den Keimbildungsprozess) erklärt.

In Modellversuchen mit einer dendritisch kristallisierenden Ammoniumchloridlösung ($\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$) konnte der Einfluss der Vibration auf den Erstarrungsablauf anschaulich dargestellt werden. Während in der unvibrierten Schmelze ausgehend vom Ort des stärksten Wärmeentzuges große Dendriten entstanden, konnte in der vibrierten Schmelze das gleichzeitige Wachsen kleiner Dendriten im gesamten Volumen der Schmelze beobachtet werden. Aus der Tatsache, dass die Keimbildung in der vibrierten Schmelze gleichzeitig am Rand und in der Schmelze einsetzte, wurde geschlossen, dass bei diesen Versuchen der Keimbildungsprozess vorzugsweise durch eine dynamische Keimbildung beeinflusst wurde.

An Versuchen mit zylindrischen Probekörpern wurde festgestellt, dass der Kornfeinungseffekt vom Erstarrungstyp abhängig ist. Reine Metalle (Aluminium, Zink) zeig-

ten nach der Erstarrung der unvibrierten Probe eine ausgeprägte Stengelkornstruktur. Die Abkühlungskurve wies keine messbare Rekaleszenz auf. Es konnte kein Einfluss einer Vibrationsbehandlung auf die Gefügeausbildung festgestellt werden. Legierungen mit breitem Erstarrungsintervall (untereutektische und übereutektische Al-Legierungen, Rotguss) erstarrten globulitisch, in der Abkühlkurve konnte eine geringe Rekaleszenz nachgewiesen werden. Die Vibrationsbehandlung der Schmelze ergab eine Verringerung der Rekaleszenz und eine Kornfeinung des globulitischen Gefüges. Eutektische Legierungen erstarrten mit erheblicher Rekaleszenz, durch die Vibrationsbehandlung der erstarrenden Schmelze wurde diese nahezu vollständig unterdrückt. Aus den genannten Ergebnissen ließ sich ableiten, dass durch die Vibrationsbehandlung der Keimbildungsprozess unterstützt wird. Die deutliche Senkung von Unterkühlung und der Rekaleszenz bestätigen diese Annahme.

Der Hauptteil der Untersuchungen bezog sich auf die Rotgusslegierung CuSn5Zn5Pb5 .

Die mit einem Barrenmodell durchgeführten Versuche zeigten, dass die Beschleunigung die Haupteinflussgröße unter den variierten Vibrationsparametern darstellt. Das Gefüge wurde durch eine Vibrationsbehandlung deutlich gefeint. Versuche mit und ohne freier Speiseroberfläche ergaben, dass der Kornfeinungseffekt nicht an eine freie Gussteiloberfläche gebunden ist.

Die Ergebnisse von Zugversuchen zeigten eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch die Vibrationsbehandlung. Es wurde ein Festigkeitsoptimum bei einer Vibrationsbeschleunigung von 1,5g festgestellt.

Die ermittelte Dichte wies ebenfalls bei Teilen, die mit einer Beschleunigung von 1,5g vibriert wurden, ein Optimum auf. Der Festigkeitsabfall war somit der verminderten Dichte bei höheren Beschleunigungswerten zuzuordnen.

Durch Untersuchungen am Stufenkeil konnte festgestellt werden, dass es durch eine Vibrationsbehandlung der erstarrenden Schmelze möglich ist, den Wanddickeneinfluss auf die Gefügeausbildung nahezu vollständig auszuschalten. Außerdem wurde der Einfluss des Zeitpunktes des Schwingungseintrages untersucht. Der Energieeintrag sollte sofort nach beendeter Formfüllung beginnen und bis zum Ende der Erstarrung andauern.

Die ermittelten Ergebnisse am Stufenkeil wurden an abgegossenen Rundstäben verschiedener Durchmesser (25; 35; 50 mm) bestätigt. Bei den unvibrierten Stäben erfolgte ein Abfall der Zugfestigkeit mit steigender Wanddicke. Durch eine Vibrationsbehandlung konnte unabhängig von der Stabdicke eine Steigerung der Zugfestigkeit um bis zu 17% erzielt werden.

An einem Armaturenteil wurde die Wirkung einer Vibrationsbehandlung auf die Druckdichtheit untersucht. Die unter Vibration erstarrten Teile entsprachen vollständig den Anforderungen an die Druckdichtheit. Bei einem weiteren Praxisteil traten innerhalb einer Gusstraube aufgrund der Temperaturverhältnisse unterschiedliche Gefüge auf. Zur besseren Dichtspeisung wurden Kühleisen verwendet. Durch einen Vibrationseintrag während der Erstarrung wurde bei allen Teilen an der Gusstraube ein einheitlich feinkörniges Gefüge erzielt. Auf das Anlegen von Kühleisen konnte in der Folge bei diesem Teil verzichtet werden.

An Hydraulikteilen aus Gusseisen mit Lamellengrafit wurde nach einer Vibrationsbehandlung eine Feinung der Grafitlamellen und die Erhöhung der Zahl der eutektischen Zellen festgestellt.

Die Einführung der Vibrationsbehandlung in den Prozess der Gussteilfertigung nach den entsprechenden Berechnungen und konstruktiven Umbauarbeiten in einer Schwermetallgießerei ergab, dass die Anwendung dieses Verfahrens auch unter technischen Bedingungen möglich ist. Es wurden Parameter vorgegeben, bei denen eine optimale Gefügebeeinflussung eintritt, aber keine Zerstörungsgefahr für die Sandformen besteht. Durch die Integration der Vibrationstechnik in die bestehende Gießanlage wurde es möglich, das Verfahren bei Bedarf anzuwenden und mit dem bereits praktizierten Kippguss zu kombinieren. Die Nutzung des Verfahrens bietet die Möglichkeit, die Gussteilqualität zu sichern, die Ausschussquote zu verringern, das Gussteilsortiment zu erweitern und damit die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens zu erhöhen.

Die Schmelzebehandlung durch Vibration stellt eine Möglichkeit zur Kornfeinung des Gussgefüges dar und führt dadurch zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der technologischen Gebrauchseigenschaften. Sie ist eine Alternative

für solche Anwendungsfälle, bei denen eine chemische Kornfeinung nicht zweckmäßig oder problematisch ist.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stellen lediglich einen Beitrag innerhalb des Gebietes der mechanischen Schmelzebehandlung durch Vibration während der Erstarrung dar. Weitere Untersuchungen sollten zur Thematik des Einflusses einer Schwingungsbehandlung auf das Lunker- und Speisungsverhalten sowie zum Wirkmechanismus eines Energieeintrages auf das Erstarrungsverhalten durchgeführt werden.

Zur weiteren Qualifizierung der durchgeführten Arbeiten ist es außerdem notwendig, zusätzliche Untersuchungen mit anderen Versuchsparametern durchzuführen. Die vorliegenden Ergebnisse sind teilweise noch nicht umfassend statistisch gesichert, auch hierin bestehen weitere Ansatzpunkte für anschließende Aufgabenstellungen.

In der vorliegenden Arbeit wurden Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Erstarrungsmorphologie und der Vibrationsparameter auf den Erstarrungsablauf metallischer Schmelzen durchgeführt. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen konnte die Übertragbarkeit auf praxisrelevante Gussteile nachgewiesen werden. Die Umsetzung der Ergebnisse in den technologischen Prozess der Gussteilfertigung einer Schwermetallgießerei wurde realisiert.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl von Untersuchungen zur physikalischen Behandlung von Metallschmelzen	30
Tabelle 2 : Versuchsdokumentation Kokillenversuche	52
Tabelle 3: Versuchsparameter mit Labor-Vibrationstisch	68
Tabelle 4: Versuchsdokumentation Barren	72
Tabelle 5: Versuchsdokumentation Stufenkeil	74
Tabelle 6: Untersuchungen zum Zeitpunkt des Vibrationseintrages	77
Tabelle 7: Versuchsparameter Gusseisenversuche	96

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Verlauf der freien Enthalpien	8
Bild 2: Abhängigkeit der freien Enthalpie für die Keimbildung vom Keimradius	9
Bild 3: Keimbildungsgeschwindigkeit v und Wachstumsgeschwindigkeit w in Abhängigkeit von der Unterkühlung ΔT	10
Bild 4: Prinzipielle Darstellung von homogener und heterogener Keimbildung	10
Bild 5: Schematisches Gefüge eines Gussblockes	12
Bild 6: Erstarrungstypen ΔT	13
Bild 7: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens von Aluminium	15
Bild 8: Speisung bei unterschiedlicher Erstarrungsmorphologie	16
Bild 9: Temperaturkurven bei Kornfeinung einer untereutektischen (links) und Veredlung einer eutektischen Aluminium-Silizium-Legierung	20
Bild 10: Schematischer Ablauf des Kristallschauermechanismus [22]	22
Bild 11: Entstehung des Gussgefüges durch mechanische Manipulation der Oberfläche [22]	22
Bild 12: Auswahl von im Schrifttum angegebener Frequenzen und Amplituden zur Vibration	35
Bild 13: Anzahl von Veröffentlichungen in Fünfjahreszeiträumen	36
Bild 14: Einfluss- und Zielgrößen für den Energieeintrag in Metallschmelzen	38
Bild 15 : Einfache Versuchseinrichtung zur Durchführung von Vibrationsversuchen	41
Bild 16: Vibrationstisch 2 mit Messeinrichtung	42
Bild 17: Kippguss bei Gießbeginn Kippguss nach Gießende	44
Bild 18: Messplatz zur Aufnahme von Schwingungskurven	45
Bild 19: Schwingungskurve zur Ermittlung der Schwingungsparameter	45
Bild 20: Bereiche der Vibrationsverdichtung von Formstoffen	46
Bild 21: Modellsubstanz $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ im Becherglas	48
Bild 22: Dendritenverbände, herausgelöst aus Modellsubstanz $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$	48
Bild 23: Versuchsaufbau Kokillenversuche	51
Bild 24: Temperaturkurven Al99,9; vibriert mit 20 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 720 \text{ }^\circ\text{C}$	53
Bild 25: Al99,9; vibriert mit 20 Hz; geätzt mit 1	53
Bild 26: Temperaturkurven Zn, vibriert mit 20 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 440 \text{ }^\circ\text{C}$	54
Bild 27: Zn; vibriert mit 20 Hz; geätzt mit 3	54

Bild 28: Temperaturkurve AlSi7Mg vibriert mit 30 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$	55
Bild 29: Gefüge AlSi7Mg, vibriert bei verschiedenen Frequenzen, $T_{\text{Abstich}} = 700^{\circ}\text{C}$; geätzt mit 1	56
Bild 30: AlSi7Mg; geätzt mit 1	57
Bild 31: Temperaturkurve AlSi12 vibriert mit 40 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$	58
Bild 32: AlSi12; 40 Hz; geätzt mit 2	58
Bild 33: Temperaturkurve AlSi20 vibriert mit 40 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$	59
Bild 34: AlSi20; 40 Hz; geätzt mit 2	59
Bild 35: Temperaturkurve Rg5, vibriert mit 20 Hz, $T_{\text{Abstich}} = 1180 \text{ }^{\circ}\text{C}$	60
Bild 36: Rg5; 20 Hz; geätzt mit 4	60
Bild 37: Breiartiger Erstarrungsablauf von Kupferlegierungen [79]	64
Bild 38: Selbstspeisung in Kupferlegierungen mit breitem Erstarrungsintervall [79]	65
Bild 39: Unvibrierte Probe Vibrierte Probe	69
Bild 40: Unvibrierte Probe Vibrierte Probe (Sandform)	70
Bild 41: Kornquerschnittsflächen unvibrierter und vibrierter Probekörper, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5	70
Bild 42: Gussteil Barren mit Speiser	71
Bild 43: Kornquerschnittsflächen beim Barren, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5 (oS – ohne Speiser; mS – mit Speiser)	73
Bild 44: Gussteil Stufenkeil zur Untersuchung von Wanddickenunterschieden	74
Bild 45: Makrogefüge Stufenkeil, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz	76
Bild 46: Kornquerschnittsflächen beim Stufenkeil	76
Bild 47: Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Vibrationsbeschleunigung, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5	79
Bild 48: Dichte in Abhängigkeit von der Vibrationsbeschleunigung, ermittelt am Barren, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5	80
Bild 49: Modellplatte zur Herstellung von Rundstäben verschiedener Wanddicken (\varnothing 25; 35; 50 mm)	81
Bild 50: Abhängigkeit der Kornquerschnittsfläche vom Stabdurchmesser, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz und 1,5g	82
Bild 51: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Stabdurchmesser, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz und 1,5g	83
Bild 52: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Gefüge	83
Bild 53: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Vibrationszeit	84

Bild 54 : Gefügeausbildung im 35 mm Probestab nach unterschiedlichen Vibrationszeiten	84
Bild 55: Experimentell ermittelte Bereiche zur Vibrationsbehandlung von CuSn5Zn5Pb5	87
Bild 56 : Armaturenteil aus Rotguss CuSn5Zn5Pb5	90
Bild 57: Modellplatte für die Herstellung von Gussteilen aus Rotguss	91
Bild 58: Kornquerschnittsflächen in Abhängigkeit von der Lage des Gussteils im Formkasten, Werkstoff CuSn5Zn5Pb5, Vibration mit 30 Hz und 1,5g	92
Bild 60: Skizze, Schleifring aus Rotguss CuSn5Zn5Pb5	93
Bild 61: Schleifring, Farbeindringverfahren	94
Bild 62: Gefüge Schleifring; CuSn5Zn5Pb5; rechts vibriert mit 30 Hz; 1,5g	94
Bild 63: Anzahl der eutektischen Zellen (Proben 3/4) in Abhängigkeit von der Lage im Gussblock, Werkstoff EN-GJL300, Vibration mit 40 Hz und 0,8g	97
Bild 64: Minimale und maximale Lamellengröße (Proben 3/4) in Abhängigkeit von der Lage im Gussblock, Werkstoff EN-GJL300, Vibration mit 40 Hz und 0,8g	98
Bild 65: Gefügebilder Zinkversuche	100
Bild 66: Prinzipdarstellung der Versuchseinrichtung	104
Bild 67: Berechnungsmodell der Vibrationseinrichtung	104
Bild 68: Darstellung der schwingenden Teile	107
Bild 69: Experimentell ermittelte Ausschwingkurve [92]	109
Bild 70: Notwendige Winkelstellungen w für den Extremkippguss	111
Bild 71: Drehpunkt am äußeren Ende der unteren Platte	111
Bild 72: Darstellung der neuen Kippkonstruktion	112
Bild 73: Kippvorgang mittels Hebezeug	113
Bild 74: Lage der Federungselemente	115
Bild 75: Darstellung der Vibrationseinrichtung	116
Bild 76: Entwurfsskizze der kombinierten Schmelzebehandlungseinrichtung	117
Bild 77: Verspanneinrichtung für die Formkästen	118

Quellenverzeichnis

- [1] **Kurzmann, W.; Ullrich, H.-J.:** Werkstofftechnik zur Ausbildung in der Grundstudienrichtung Maschineningenieurwesen 1. Lehrbrief
- [2] **Gottstein, G.:** Physikalische Grundlagen der Materialkunde, 2. Auflage Springer-Verlag 2001
- [3] **Schatt, W.:** Einführung in die Werkstoffwissenschaft, VEB Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1972
- [4] **Ruppersberg, H.:** Struktur von Metallschmelzen in Metallphysik, Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf 1967
- [5] **Ilschner, B.:** Keimbildung und Kristallwachstum in Metallphysik, Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf 1967
- [6] **Oettel, H.:** Gefügebildung durch Erstarrung und Sublimation; persönliche Mitteilung, TU Bergakademie Freiberg; Institut für Metallkunde
- [7] **Bargel, H.-J.; Schulze, G.:** Werkstoffkunde, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999
- [8] **Engler, S.:** Grundlagen des Gießens in Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der fertigungstechnik, Band 1 Urformen, Carl Hanser Verlag München Wien 1981
- [9] **Altenpohl, D.:** Aluminium von innen. Aluminium –Verlag Düsseldorf, 1994
- [10] **Liesenberg, O. u. a.:** Gusswerkstoffe im Gießereiwesen. 4. Lehrbrief Aluminiumgusslegierungen TU Bergakademie Freiberg
- [11] **O.L. Bustos C.; Reif, W.:** Kornfeinung von Reinstkupfer durch chemische Zusätze, Teil 1. Metall 47(1993)11,
- [12] **O.L. Bustos C.; Reif, W.:** Kornfeinung von Reinstkupfer durch chemische Zusätze, Teil 2; Metall 48(1994)2, S. 123-127
- [13] **O.L. Bustos C.; Reif, W.:** Kornfeinung von Reinstkupfer durch chemische Zusätze, Teil 3; Metall 48(1994)7, S. 538-548
- [14] **Just, J.; Motz, J.M.; Schneiders, W.:** Primärgefügebeeinflussung dickwandiger Stahlgussstücke durch Bewegung der Restschmelze mit elektromagnetischen Wanderfeldern während der Erstarrung, Gießereiforschung 26 (1974)4 S. 133-146

-
- [15] **Höner, K.E.; Fliegenschuh, H.:** Beitrag zur Kornfeinung umwandlungsfreier austenitischer und ferritischer Stahlgusslegierungen mit keimwirksamen Zusätzen, Gießereiforschung 33 (1981)4 S.129-138
- [16] **Müller, K.; Reif, W.:** Kornfeinung von AlSi-Gußlegierungen am Beispiel von AlSi9. Gießerei 82 (1982)20, S. 725-734.
- [17] **Reif, W.:** Derzeitiger Stand der Kornfeinung von NE-Metallen und ihre Auswirkung auf die Eigenschaften. Neue Hütte 36 (1991)10, S. 388-391
- [18] **Liesenberg, O.; Wittkopf, D.:** Stahlguß- und Gusseisenlegierungen. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, Stuttgart 1992
- [19] **Müller, K.:** VDI Fortschrittberichte, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 424
- [20] **Ellerbrock, R.; Engler, S.:** Kornfeinung metallischer Werkstoffe durch Nutzbarmachung des Kristallschauermechanismus. Metall 36 (1982)8, S.877-882.
- [21] **Buxmann, K.:** Auswirkung von Schock, Vibration und Strömung auf die Erstarrung von Metallen. Zeitschrift Metallkunde 63(1972)9, S.516-521.
- [22] **Chen, X-G.; Ellerbrock, R.; Engler, S.:** Versuche zur phys. Kornfeinung bei austen. Stahlguß und bei Kupferlegierungen. Gießereiforschung 48 (1996)1 S.1-7
- [23] **Sakwa, W.; Gawronski, J.; Szajnar, J.:** Einfluß eines rotierenden Umkehrmagnetfelds auf die Erstarrung von Aluminiumgußstücken. Gießereiforschung 40 (1988)1 S. 17-22
- [24] **Bechny, L. u.a.:** Improving the utilization properties of cast alloys for investment casting. 58. Gießerei-Weltkongress Krakow September 1991, Paper Nr. 18.
- [25] **Anonym:** Manufacturing process produces metals with superfine, uniform crystal structures. National Research Institute for Metals, Science and Technology Agency, 1-2-1, Tsukuba City, Japan. Kurzfassung: Metallurgia, Redhill, Band 62 (1995)9, S. 324.
- [26] **Tyznov, V.I.:** Tiegelreaktion im sauren SM-Ofen. ONTI 1936
- [27] **Schmid, G.; Roll, A.:** Elektrochemie,45 (1939)10, S.769-775
- [28] **Seemann, H.J.; Menzel, H.:** Zeitschrift Metall, 1 (1947), S. 39-46
- [29] **Rosenfeld, S.; Judin, S.B.; Levin, M.M.:** Über Methoden der dynamischen Einwirkung auf kristallisierende Gußstücke. Litejnoe Proizvodstvo (1957)11, S.24-26.

-
- [30] **Novikov, I.I. u.a.:** Anwendung niederfrequenter Vibration während der Erstarrung zur Verbesserung der Struktur und der Eigenschaften von Gußstücken. Aus Buntmetalle und deren Legierungen, Sammelband Forschungsberichte des Institutes für Buntmetalle Moskau (1960).
- [31] **Freedman, A.H.; Wallace, J.F.:** Vibration strength into metals. Modern Castings 31(1957)4.
- [32] **Freedman, A.H.; Wallace, J.F.; Carbonaro, F.H.:** Vibration can improve casting quality. Foundry 85(1957)11.
- [33] **Kostron, H.; Schippers, M.:** Zeitschrift Metallkunde 44(1953) S.192.
- [34] **Levinson, D.W.; Murphy, A.H.; Rostocker, W.:** Influence of vibration on fluidity and filling during investment casting of an aluminium alloy. Trans. AFS (1955) S.683-686.
- [35] **Form, G.W.; Furmbull, G.K. u.a.:** 27. Internat. Gießereikongreß, Zürich 1960, S.167-187
- [36] **Angeloff, G.:** Bedingungen für eine wirkungsvolle Schwingungserregung der Metalle während der Kristallisation. 34. Gießereiweltkongreß 1967.
- [37] **Braun, M.P.; Moscharenko, I.P.; Solovjew, J.K.:** Der Einfluß der Vibration auf Struktur und Eigenschaften warmfester Legierungen. Litejnoe Proizvodstvo (1969)2, S.29-30.
- [38] **Guljajew u. a.:** Spezial-Gießverfahren. Maschinenbauverlag Leningrad 1971.
- [39] **Kalinin, K.G.; Gorbenke; M.:** Litejnoe Proizvodstvo (1971)6 S. 37.
- [40] **Seemann,J.; Wehner, F.:** Untersuchungen über Kornfeinung von Kupfer durch Erstarrungsbeschallung. Metall 27(1973)10 S. 971-977.
- [41] **Kruschenko, G.G.; Iwanov, A.A.:** Kiew UPL AN USSR, (1973) S. 196-198
- [42] **Fahy, F.W.:** The vibration of molten metal. Castings 20(1974)7-8, S. 18-21; 25-27
- [43] **Abdel-Reihim, M.; Reif, W.:** Effect of ultrasonic vibrations on the solidifications of alloys containing different microstructures. Metall 38(1984)2, S.130-132.
- [44] **Smirnov, A.H.; Pettik, J.B. u. a.:** Verbesserung der Eigenschaften von Bronzegussteilen durch die Anwendung einer Vibrationsbehandlung, Litejnoe Proizvodstvo (1988)4, S.27.

-
- [45] **Camui, C.; Cosneanu, C. u.a.:** Der Einfluß von Niederfrequenzschwingungen auf die Erstarrung einiger Nichteisenlegierungen. 58. Gießereiweltkongress 1991.
- [46] **Yoneda, H.; Kondo, T.; Ishino, T.:** Influence of the vibration during solidification on the primary crystal morphology in hypoeutectic Al-Cu alloys and their strength. Transact. of the Japan Foundrymen's Soc. (1991)Oct. S. 17.
- [47] **Bingbo, W.:** Undirectional dendritic solidification under longitudinal resonant vibration. Acta metallurgica et materialia. Vol. 40 (1992)10, S. 2739-2751.
- [48] **Pancuk, A.G.; Porucikov, J.P.; u. a.:** Einfluß niederfrequenter Schwingungen auf kristallisierendes Metall. Litejnoe Proizvodstvo (1994)4, S. 12-14.
- [49] **Banerjee, M.K.:** The effect of melt homogeneity on the age-hardening of copper-chromium alloys. Cast Metals 6(1994)4, S. 204-209.
- [50] **Ohsawa, Y. u.a.:** Application Modes of Ultrasonic Vibration to Molten Metal and their Effekt on Solidification Structures. Imono Band 65 (1993)4, S.288-293.
- [51] **Ohno, A.:** Solidification. Springer-Verlag Berlin 1987
- [52] **Vives, C.:** Effects of electromagnetic vibrations on the microstructure of continuously cast aluminium alloys. Mat. Science and Engineering A173 (1993) S.169-172
- [53] **Ohsawa, Y.; Sota, A. u. a.:** Application modes of ultrasonic vibration to molten metal and their effect on solidification structures. Imono 65(1993)4 S. 288-293
- [54] **Pancuk, A.G.; Porucikov, J.P. u. a.:** Einfluß niederfrequenter Schwingungen auf kristallisierendes Metall. Litejnoe Proizvodstvo (1994)4, S. 12-14.
- [55] **Ohsawa, Y.:** Effect of ultrasonic vibration on solidification structures of cast iron. NRIM Research Activities (1995) S.5-6
- [56] **Anonym:** Manufacture of metals featuring superfine uniform crystal structures. New Technology Japan 23(1995)2, S.14
- [57] **Vives, C.:** Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminium alloys: Part 1:Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields. Metallurgical and Materials Transactions B, Process Metallurgy and Materials Processing Science 27B (1996)3, S.445-455.

-
- [58] **Vives, C.:** Part 2: Solidification in the presence of colinear variable and stationary magnetic fields. Metallurgical and Materials Transactions B, Process Metallurgy and Materials Processing Science 27B (1996)3, S.457-464.
- [59] **Eiji-Kato u. a.:** Steuerung der Erstarrungsmikrogefüge in Gußlegierungen auf Al-Si-Ni-Basis mittels Niederzyklusvibration. Journal of the Japan Institut of Metals, Band 60 (1996)3, S.269-275.
- [60] **Bechny, L. u. a.:** The influence of magnetic field on solidifications process of casting. 61. Gießerei-Weltkongreß 1995, Peking, Vortrag TB-19.
- [61] **Daming, X.; Quingchun, L.; Pehlke, R.D.:** Grain refining of casting alloys by melting control technique. Intern. Journal of Cast Metals Research 9 (1996)4, S. 187-193.
- [62] **Joseph, M. A.; Nagarajan, M.M.; Ravindran Nair, R.:** Studies on the porosity of eutectic aluminium-silicon alloy modified and vibrated during solidification. Indian Foundry Journal Vol. 46 Nr. 3; March 2000
- [63] **Joseph, M.A.; Nagarajan, M.M.; Ravindran Nair, R.:** Studies on the porosity of eutectic aluminium-silicon alloy modified and vibrated during solidification. Indian Foundry Journal Vol. 46 Nr. 3; March 2000.
- [64] **Banerjee, M.K.:** Effect of vibration on the characteristics of some iron carbon silicon alloys. Transact. of the Japan Foundrymen's Soc. (1992)Oct., S.48-55.
- [65] **Tschernischova, N.W. u. a.:** Litejnoe Proizvodstvo (1989)6, S.7-8.
- [66] **Smirnow, A. u. a.:** Der Einfluss einer Schwingungseinwirkung niederer Frequenz während der Erstarrung auf die Qualität von Gusseisen. Litejnoe Proizvodstvo (1991)7, S. 21-22
- [67] **Leger, M.-T. u.a.:** Refinement of the solidification grain by mechanical vibration. Application to austenitic stainless steel. Fonderie, Fondateur d`aujourd`hui (1997)162; S. 20-24, 37-41.
- [68] **Balandin, G.F.:** Kristallisation und Kristallstruktur in Gußstücken. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1974.
- [69] **Altenpohl, D.:** Aluminium und Aluminiumlegierungen. Springer-Verlag 1965.
- [70] **Schmidt, E.:** Metall 6 (1952) S. 737-744
- [71] **Levinson, D.W.; Murphy, A.H.; Rostoker, W.:** Light Metal Age 14 (1956) 3 / 4 S. 24-25

-
- [72] **Richard, R.S.; Rostoker, W.:** Metal Progress 68 (1955) 4 S. 218-220
- [73] **Balakin, J.A.:** Dissertation Moskau 1995
- [74] **Seemann, J.; Buxmann, K.:** Quantitative Untersuchungen über Erstarrungsbeschallung von Zinn. Metall 26(1972)1 S. 1-9
- [75] **Prodhan, A.; Mitra, A. u. a.:** A study on the effect of a magnetic and electric field during solidification of aluminium. IIF Transaction 1995, S. 67-75.
- [76] **Bast, J.:** Dissertation B, TU Bergakademie Freiberg 1990
- [77] **Bast, J.; Nikolov, K.:** Mathematische Modellierung der Verdichtungs Vorgänge bei der Formherstellung für das Vollformgießverfahren. Gießereiforschung 45 (1993)4, S. 142-146.
- [78] **McCay, M.H.; McCay, T.D.; Hopkins, J.A.:** The nature and influence of convection on the directional dendrite solidification of a metal alloy analog, NH₄Cl and H₂O. Metallurgical Transactions B, Process Metallurgy, Bd.24B (1993) Heft 4, S. 669-675.
- [79] **Dies, K.:** Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik, Springer-Verlag 1967
- [80] Metals Handbock Ninth Edition, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals
- [81] Metals Handbook Ninth Edition, Volume 15, Casting
- [82] **Mai, R.; Liesenberg, O.:** Gusswerkstoffe im Gießereiwesen, 1. Lehrbrief Kupfergusslegierungen, TU Bergakademie Freiberg
- [83] Guss aus Kupferlegierungen, aus dem amerik. von Brunhuber, E. Fachverlag Schiele & Schön GmbH 1986
- [84] **Patterson, W.; Kümmerle, R.:** Gießerei, wiss.- technische Beihefte (1959)26, S. 1403-1427
- [85] **Ruddek, P.; Waldow, P.; Zimmer, W.:** Erhöhung der Gebrauchseigenschaften bei Kupfer-Zinn-Zink-Legierungen. Gießereitechnik 21(1975)3, S. 95-99
- [86] DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe, Zugproben. März 1986
- [87] **Beyer, B.:** Werkstoffkunde NE-Metalle, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1971
- [88] **Goederitz, A.H.F.:** Metallguss, Entwicklung der deutschen Metallgusstechnik, VEB Wilhelm Knapp Verlag Halle (Saale) 1955
- [89] **Hoshino, K., u.a.** Imono, 3(1994) Heft 66, S. 217 - 222
- [90] **Brunhuber, E.:** Gießerei-Lexikon, Fachverlag Schiele & Schön GmbH Berlin

-
- [91] **Richter, R.; u. a.:** Schwermetallgusstechnologie, Lehrbrief 13: Gießereitechnik / Technologiebeispiele, Institut für Fachschulwesen der DDR, Leipzig 1977
- [92] **Schulze, M. J.:** Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg 1996
- [93] **Schäfer, A.:** Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg 1999
- [94] **Holzweißig, F.; Dresig, H.:** Lehrbuch der Maschinendynamik. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1979
- [95] **Krämer, E.:** Maschinendynamik. Springer-Verlag Berlin 1984
- [96] **Fronius, S; Holzweißig, F.:** Taschenbuch Maschinenbau. Band 2, VEB Verlag Technik Berlin 1985