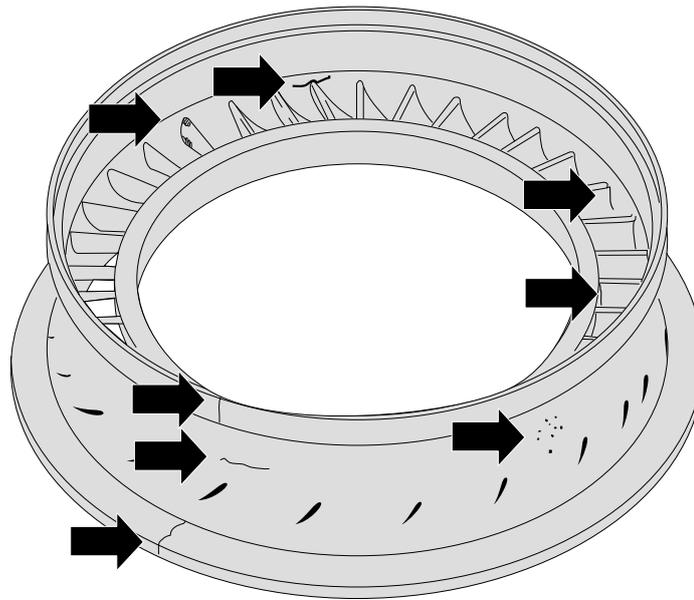


# 15. Werkstofffehler - Probleme an Rohteilen und Halbzeug.



Wenn man von Problemen *an* Rohteilen und Halbzeug spricht, denkt der Techniker zuerst an **Werkstofffehler**. Dabei wird besonders von Unerfahrenen übersehen, dass bereits die **Beschaffung** des Halbzeugs bzw. der Rohteile mit großen Problemen verbunden sein kann (Bild 15.1-1). Für Triebwerks-teile bestehen besonders umfangreiche Forderungen an Qualität, Dokumentation, Reproduzierbarkeit und Überwachbarkeit der damit erforderlichen Zulassungen detailgenau spezifizierter technologischer Schritte. Das schränkt den Kreis möglicher Lieferanten merklich ein.

Eine spezifikationsgerechte **Legierung** qualifiziert ein Halbzeug noch längst nicht für den Einsatz in einem Triebwerksbauteil. Eine Vielzahl weiterer Forderungen müssen erfüllt sein, bevor ein Serieneinsatz ins Auge gefasst werden kann (Bild 15.1-2).

Gerade die Probleme bei der **Rohteilbeschaffung** können in der Entwicklungs- und Prototypenphase dazu zwingen, lange Lieferzeiten durch **Zwischenlösungen** zu überbrücken. So kann z.B. ein Halbzeug mit nicht optimaler „Faserrichtung“ notgedrungen bei hohem Risiko zur Anwendung kommen (Bild 15.1-3).

Spezifikationsgerechtes **Halbzeug** ist nicht nur Voraussetzung für ein sicheres Betriebsverhalten. Es ist auch für eine **sichere, spezifikationsgerechte, problemlose und reproduzierbare Fertigung mit akzeptablen Ausschussquoten** unerlässlich. Spuren unerwünschter Legierungsbestandteile erschweren z.B. die Schweißbarkeit mit der Folge erheblicher Fertigungsprobleme mit Kosten und Terminüberziehungen. Ebenso sind die Zerspanungseigenschaften vom Gefüge des Halbzeugs abhängig (Bild 15.1-4).

Über Werkstofftechnik und dabei auftretende Fehler bzw. Probleme gibt es eine umfangreiche Fachliteratur (siehe „empfohlene Literatur“ am Ende dieses Kapitels). Deshalb soll sich dieses Kapitel auf triebwerks-spezifische Probleme, die nicht in der allgemeinen Fachliteratur befriedigend beschrieben sind, beschränken.

**Werkstofffehler** sind im Folgenden **dadurch definiert, dass sie außerhalb der Spezifikationsgrenzen liegen** und ursächlich bei der Rohteil- bzw. Halbzeugherstellung entstanden sind. Zu Spezifikationen gehören Zeichnungsforderungen, Werkstoffnormen, und Prüfbefunde (siehe hierzu Band 1, Bild 3-1).

Von **Schwachstellen** (in der Schweißtechnik taucht der Begriff „Ungänzen“ auf) wird gesprochen, wenn deren **Auswirkung in der Auslegung der Bauteile berücksichtigt** wurde. Damit werden Schwachstellen von den Vorschriften abgedeckt.

Fehler eines Rohteils beschränken sich nicht nur auf Materialtrennungen und Inhomogenitäten mit gefährlicher Kerbwirkung. Genau so unzulässig können Ansammlungen von Legierungsbestandteilen bzw. von Phasen (z.B. Karbide, Nitride), sog. Seigerungen sein. Auch die Korngröße und deren Verteilung sowie Kornorientierung bzw. der Verlauf der Korngrenzen können über die Verwendbarkeit eines Rohteils entscheiden.

Von Fehlern muss also definitionsgemäß erwartet werden, dass sie zu einer unzulässigen Beeinträchtigung der Betriebseigenschaften (Lebensdauer, Sicherheit) führen. Sie sind deshalb unzulässig und müssen vermieden werden. Von Abweichungen und Fehlern können sehr unterschiedliche Eigenschaften betroffen sein, wie:

- Festigkeit: dynamisch, statisch
- Werkstoffverhalten: Sprödigkeit, Korrosionsverhalten
- Bruchmechanische Kennwerte
- Korrosionseigenschaften, auch Rissfortschritt
- Verhalten bei Fertigungsprozessen (Aufwand, Kosten/Ausschuss)

Auf eine umfassende Aufzählung und Beschreibung der Fehler aus dem sog. **Urformen** (Bild 15.1-5) zu dem Gießtechnik und Schmieden gehört, soll aus Gründen einer ausreichenden Fachliteratur hier verzichtet werden. Einige typische Begriffe werden erfahrungsgemäß immer wieder missverständlich oder unzutreffend außerhalb der Fachkreise benutzt. Sie werden deshalb angesprochen. Hierzu gehören die typischen Fehler in **Gussteilen, Poren und Lunker** (Bild 15.1-7), deren Unterschiede für Abhilfen von entscheidender Bedeutung sind. Bei **Schmiedeteilen** stiften „**Fasern**“ in Fachbegriffen Verwirrung. Diffus ist auch das Verständnis von **Seigerungen** und damit deren Ursachen und Auswirkungen (Bild 15.1-8).

Der Begriff **Wärmebehandlung**, in der Literatur auch manchmal eher unglücklich als Warmbehandlung bezeichnet, wird im Folgenden in erster Linie für Glühvorgänge verwendet. In der Definition nach DIN umfasst er aber auch Verfahren wie Härten, Aufkohlen und Nitrieren. Schmiede- und HIP-Prozesse werden beispielsweise nicht unter Wärmebehandlung geführt, obwohl ihr Temperaturverlauf den Werkstoff vergleichbar beeinflussen kann.

Bei Fertigungsverfahren treten typische Fehler mit ihren Fachbegriffen auf. In der Schweißtechnik, insbesondere hochlegierten Stählen, Nickellegierungen und Titanlegierungen sind **Warm- bzw. Heißrisse** (Bild 15.1-8) besonders problematisch und manchmal unvermeidlich.

Während der Halbzeugentstehung und dem anschließenden Fertigungsprozess bis zum Fertigteil können sich Schwachstellen und Fehler verändern und dadurch gefährlicher oder entschärft werden. Dies lässt sich bei ausreichendem Kenntnisstand im Herstellungsprozess gezielt beeinflussen.

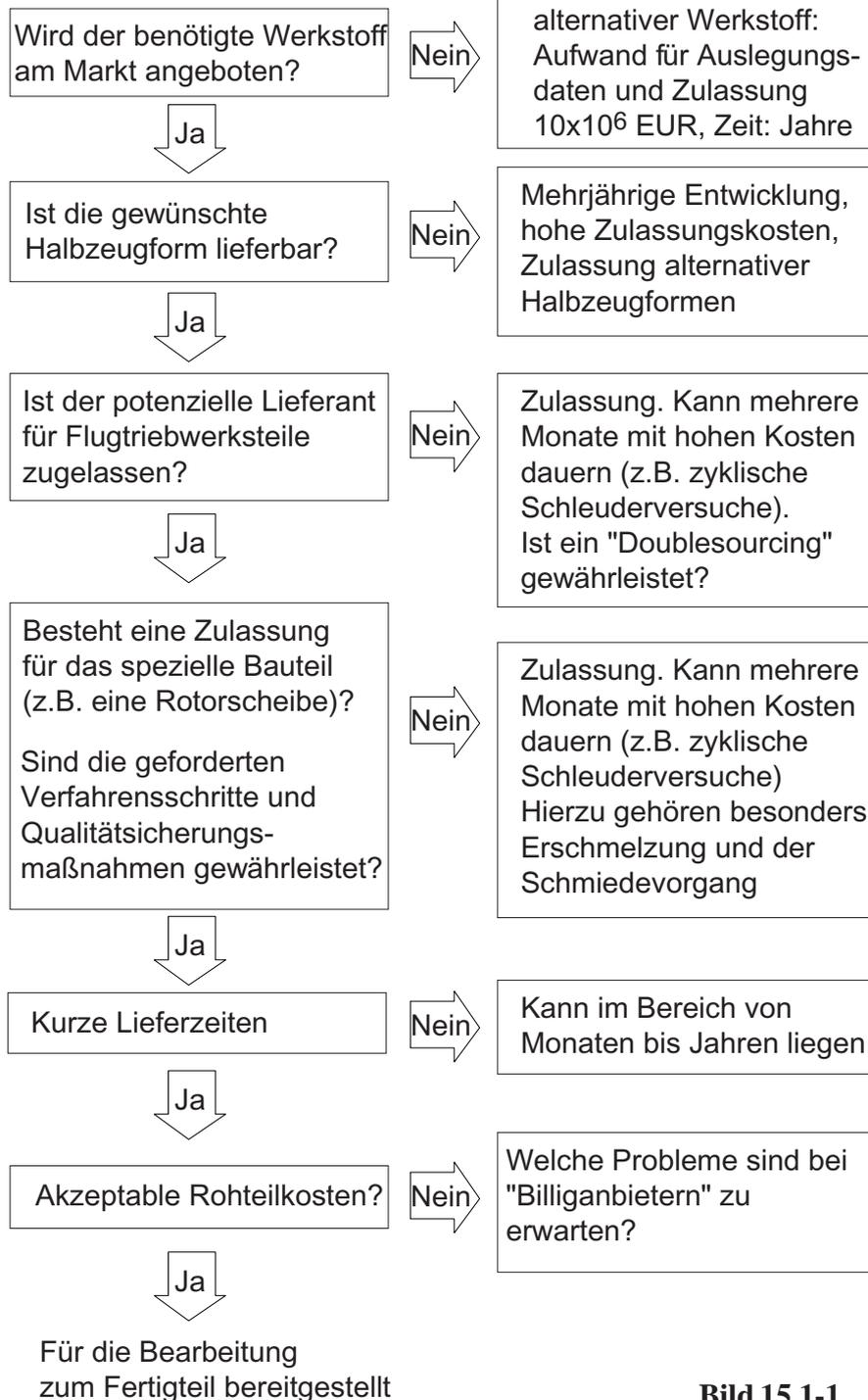
## Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

**Bild 15.1-1:** *Muss ein alternativer Werkstoff verwendet werden, kann dies zu unerwarteten Problemen führen. Unerfahrenen kann es passieren, als selbstverständlich vorauszusetzen, dass ein luftfahrtzugelassener Werkstoff auch in der gewünschten, notwendigen Form als Halbzeug oder Rohteil lieferbar ist. Diese Annahme kann sich als äußerst gefährlich erweisen, wenn fälschlich die Zeit von einer Bestellung bis zur Anlieferung für die Fertigung des Bauteils zu kurz eingeschätzt wurde. Auch ist es möglich, dass das gewünschte **Halbzeug** wegen zu geringer Nachfrage **nicht am Markt** angeboten wird. Für eine Turbinenscheibe benötigt man z.B. ein entsprechend geschmiedetes Rohteil mit geeigneter Kornstruktur und geeignetem **Faserverlauf**. Es scheint bei Lieferengpässen nahe zu liegen, stattdessen eine von einer Stange abgestochene Scheibe zu verwenden (Bild 15.1-3). Die axiale Faserrichtung des Stangenmaterials lässt jedoch nicht die notwendigen Festigkeitseigenschaften erwarten. Dies gilt besonders für das LCF-Verhalten gegenüber Tangentialspannungen. Durchaus nicht selbstverständlich ist es also, dass ein Werkstoff mit speziell benötigten, bauteilspezifischen Eigenschaften am Markt angeboten wird, der für den **Einsatz in Flugtriebwerken zugelassen** ist.*

*Muss der **Werkstoff erst für die (besondere) Luftfahrtanwendung zugelassen** werden, ist mit großem Zeit- und Kostenaufwand zu rechnen. Dies ist selbst dann der Fall, wenn die technologischen Schritte bei der Halbzeugherstellung (z.B. Erschmelzung, Schmiedeprozess) bereits ausreichend erprobt, stabil und festgeschrieben sind. Der Aufwand ergibt sich besonders aus der Ermittlung sicherer Auslegungsdaten (Statistik) und bauteilspezifischen Zulassungen (z.B. zyklische Schleuderversuche). Die Neuzulassung eines Werkstoffs für Rotorbauteile in Flugtriebwerken dürfte in einem Zeitraum von mindestens einem Jahr bei Kosten von ca. „20 Einfamilienhäusern“ liegen.*

Fortsetzung auf Seite 15.1-5

Eines der großen Probleme ist die Beschaffung des Halbzeugs. Typisches Beispiel ist eine Rotorscheibe.



**Bild 15.1-1**

Fortsetzung von Seite 15.1-3

Die Gefahr nicht verfügbaren Halbzeugs besteht auch, wenn in einem Programm zwischen **Entwicklungsabschluss und Serienanlauf eine zu große Zeitspanne** liegt. Sie kann insbesondere bei militärischen Projekten mehrere Jahre betragen. In einem solchen Fall können sich teure ungenutzte Investitionen beim Halbzeughersteller nicht mehr rechnen. So ist es z.B. möglich, dass statt einem hochbelasteten, bisher pulvermetallurgischem Bauteil, nur noch eines in konventioneller Schmiedetechnik lieferbar ist. Selbst bei gleicher Legierungszusammensetzung dürfte in diesem Fall eine zeit- und kostenaufwändige Neuzulassung, möglicherweise mit umfangreicher Erprobung, unvermeidlich werden.

Selbst wenn das gewünschte Halbzeug vorhanden ist, ist eine **Zulassung des Lieferanten** Voraussetzung für die Nutzung für ein Bauteil von Flugtriebwerken. Diese Zulassung beinhaltet neben den einzelnen Fertigungsschritten das gesamte Qualitätsmanagement. Sie erfordert die Abnahme von den zuständigen Behörden sowie gegebenenfalls das Einverständnis des Konstruktionsverantwortlichen (z.B. OEM bei Lizenzfertigung), Auftraggebers (bei Zulieferung) bzw. Betreibers (z.B. bei militärischen Projekten).

Selbst wenn der Halbzeuglieferant für flugfähige Bauteile zugelassen ist, muss das nicht für die **Lieferung eines speziellen Bauteils** gelten. Gesonderte umfangreiche Zulassungen können sich daraus ergeben. Möglicherweise muss die Zulassungsprozedur für jede einzelne Scheibe eines Rotors erfolgen. Der Aufwand fällt nicht nur beim Halbzeuglieferanten an, sondern auch beim Hersteller des Fertigteils. So ist zumindest mit **Ausfallmusterprüfungen** und begrenzten Festigkeitsnachweisen zu rechnen. Hinzu können umfangreiche zyklische Schleuderversuche kommen.

Selbst wenn alle diese Voraussetzungen für eine Rohteil- bzw. Halbzeuglieferung geschaffen sind, können lange **Zeiten zwischen Bestellung und Lieferung** (Lieferzeiten) unvermeid-

bar sein. Mehrere Monate bis zu mehrere Jahre sind möglich.

Bisher wurden nur technisch begründete Probleme angesprochen. Diese werden aber von den Kosten überlagert. Sie fallen, wie bereits dargestellt, nicht nur beim Halbzeuglieferanten an. Auch eventuelle Zulassungen und Optimierungsschritte schlagen zu Buche. Weitere Aspekte einer Beschaffung sind Liefertreue, Qualität und Forderungen nach einem „**Double Sourcing**“. Dabei handelt es sich um den Wunsch nach zwei unabhängigen Lieferquellen. So lassen sich die Kosten minimieren und die Liefersicherheit erhöhen.

Eine zu starke Fixierung auf minimale **Rohteilpreise** kann erfahrungsgemäß zu Problemen mit **zusätzlichen Kosten** führen, welche die Einsparungen bei weitem übertreffen. So kann ein Lieferant in schlechten Zeiten zähneknirschend Preisen zustimmen die seinen Aufwand nicht ausgleichen. Sobald sich jedoch der Markt zu seinen Gunsten erholt, stellt er, möglicherweise durch vorgeschobene Gründe wie hohe Ausschussraten, Anschlusslieferungen ein. Auch ist die Motivation zu Qualitätsverbesserungen bei nicht auskömmlichen Preisen und ein Engagement in Produkte mit Entwicklungsrisiko verständlicherweise eher gering.

**Bild 15.1-2:** Ein metallischer Werkstoff wird von seiner Zusammensetzung (Legierung) bestimmt. Dabei geht es nicht nur um die Hauptlegierungsbestandteile, insbesondere das Basismetall. Wichtig sind auch geringe Legierungsbestandteile innerhalb der Spezifikation sowie begrenzte Spuren und Verunreinigungen. Für das Betriebsverhalten sind neben der spezifikationsgerechten Zusammensetzung weitere charakteristische Merkmale von entscheidender Bedeutung. Man erkennt aus der Tabelle die vielfältige Beeinflussung von Werkstoffmerkmalen und Betriebsverhalten. Auch der Betrieb selbst kann den Werkstoff verändern. Das macht die gesamte Problematik sehr komplex. Deshalb erhebt diese Darstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Allgemeingültigkeit. Sie soll jedoch den Praktiker sensibilisieren.

**Gefügecharakteristik:** Unter diesem Begriff sollen in erster Linie Guß- und Schmiedestrukturen verstanden werden. Auch Gefüge pulvermetallischer Werkstoffe (PM) lassen sich getrennt betrachten. Allgemein gilt, die üblicherweise grobkörnigen und auf Grund der Dendriten inhomogenen Gussstrukturen weisen einen besonders hohen Kriechwiderstand auf (Band 3, Bild 12.5-11). Sie kommen deshalb für thermisch hochbeanspruchte Bauteile wie Turbinenschaufeln zur Anwendung. Nachteilig ist eine im Vergleich zu Schmiedelegierungen niedrige HCF- und LCF-Festigkeit. Die relativ feinkörnigen Schmiedewerkstoffe sind dagegen wegen ihrer vergleichsweise hohen Schwingfestigkeit besonders für Rotorscheiben und Verdichterschaufeln geeignet. Pulvermetallische Werkstoffe weisen typischerweise ein besonders feines, ungerichtetes Korn auf. Sie erreichen eine besonders hohe Festigkeit bei guter Zähigkeit. Meist liegen sie im nachgeschmiedeten Zustand vor („HIP and Forge“, Bild 15.1-16) und sind deshalb sehr teuer. Der Widerstand gegen Rissfortschritt erhält bei wachstumsfähigen Fehlstellen in LCF-lebensdauerbegrenzten Baut-

eilen (Damage Tolerance Concept) erhöhte Bedeutung. Dieser sicherheitsfördernde Widerstand ist bei den „inhomogenen“ Gusslegierungen dagegen relativ hoch. Schmiedelegierungen die Gussvormaterial hatten (Bild 15.2-17 und Bild 15.3-7) weisen einen höheren Widerstand als die extrem homogenen/feinkörnigen PM-Werkstoffe auf (Band 3, Bild 14-10). Die so mögliche, höhere Rissfortschrittsgeschwindigkeit erschwert das **Abfangen von Rissen durch Zwischeninspektionen** im Betrieb deutlich, kann sie sogar unmöglich machen.

**Korngröße und deren Verteilung:** Ganz allgemein gilt, je größer das Korn eines Werkstoffs, um so höher ist der Kriechwiderstand bzw. die Kriechfestigkeit. Dieses Verhalten lässt sich wie folgt erklären: Je feiner das Korn, um so größer ist die gesamte (aufsummierte) Kornoberfläche bzw. Korngrenzenlänge. Damit ist die Konzentration von Verunreinigungen auf den Korngrenzen bei feinerem Korn geringer. Feinkörnige Werkstoffe sind damit in der Tendenz für schädigende Einflüsse an den Korngrenzen weniger empfindlich. Zu diesen Einflüssen gehören chemischer Korngrenzenangriff oder Warmrissbildung (Bild 15.1-8).

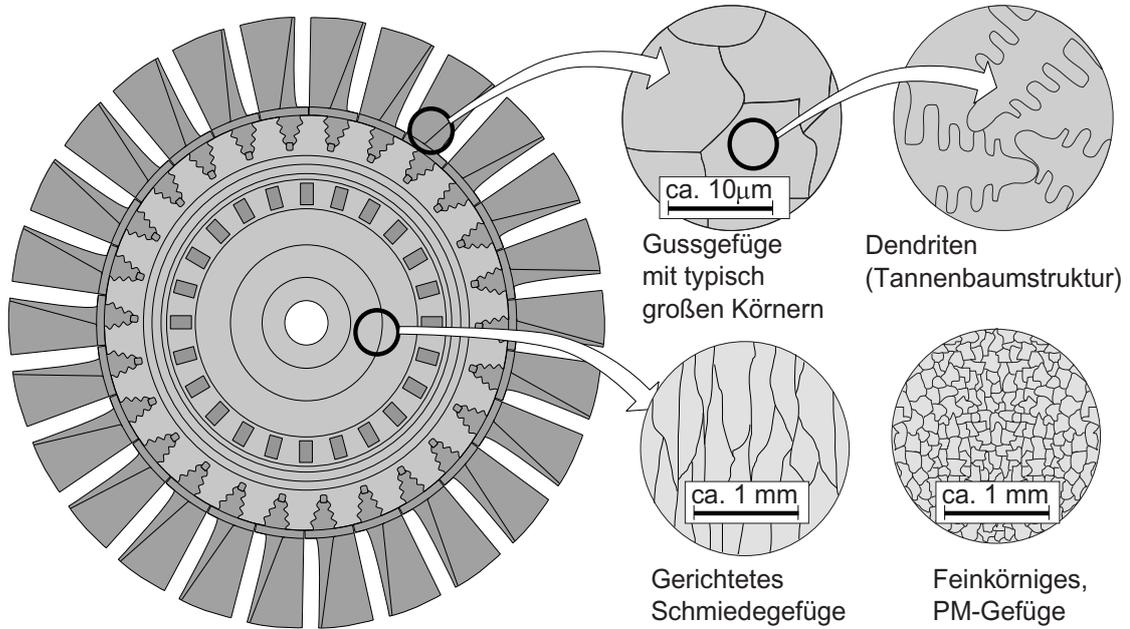
**Kornstruktur:** Es handelt sich um Gefügebesonderheiten innerhalb des Kornes. Typische Beispiele sind Gefüge von Stählen und Titanlegierungen. Dabei ist die Auswirkung der Gefüge, man denke nur an Härte- und Vergütungsgefüge bei Stählen, allgemein bekannt. Dies gilt auch für das unterschiedliche Verhalten von austenitischen und ferritischen Stählen (z.B. Magnetismus und Korrosion).

$\alpha+\beta$ -Titanlegierungen zeigen abhängig von Schmiedung und Wärmebehandlung sehr unterschiedliche Gefüge. Sie können sich z.B. auf die Anrissphase und den Rissfortschritt risikorehöhend auswirken (Bild 15.2-19 und Bild 15.2-20).

Fortsetzung auf Seite 15.1-8

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

**Einfluss charakteristischer Merkmale eines Werkstoffs auf die Betriebseigenschaften.**



Werkstoffmerkmal / Beeinflusste Eigenschaft	Gefügecharakteristik Guss, Schmiede, PM	Korngrößen-, -verteilung	Kornstruktur, Härtegefüge, "Korbgeflecht",	Korngrenzenorientierung, Verformungsgrad	Phasen wie: Karbide $\gamma'$ -Phase	Verunreinigungen, Spurenelemente
Festigkeit statisch	■	■	■	■	■	■
Festigkeit dynamisch LCF, HCF	■	■	■	■	■	■
Kerbempfindlichkeit bei Schwingbeansp.	■	■	■	■	■	■
Kriechwiderstand	■	■	■	■	■	■
Zähigkeit/Duktilität	■	■	■	■	■	■
Containmentverhalten Kerbschlagverhalten	■	■	■	■	■	■
Warmrissbildung	■	■	■	■	■	■
Rissfortschritt	■	■	■	■	■	■
Korrosion	■	■	■	■	■	■

**Bild 15.1-2** Eingeschätzter Einfluss: hoch ■ mittel ■ niedrig ■ (kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit)

Fortsetzung von Seite 15.1-6

**Faserverlauf, Kornorientierung:** Die Lage der Korngrenzen ist von großer Bedeutung für Festigkeit und Versagensverhalten (Bild 15.1-3). Belastungen quer zur Faserrichtung lassen im Allgemeinen niedrigere Festigkeit und Duktilität erwarten als für Längsbeanspruchung. Der Rissfortschritt bei zyklischer Belastung und/oder Korrosion kann beschleunigt werden, was natürlich als negativ zu bewerten ist. Besonders das Kriechverhalten mit typischer Poren- und Rissbildung wird von quer zur Zugbeanspruchung liegenden Korngrenzen verschlechtert.

**Phasen:** Es lassen sich erwünschte (z.B. Karbide, Aushärtungsphasen) und unerwünschte Phasen wie die spröde **Sigmaphase** unterscheiden. Sie sind auch von Betriebsbedingungen beeinflusst und wirken sich besonders negativ auf Festigkeit und Zähigkeit aus.

**Verunreinigungen, Spurenelemente:** Winzige Mengen werkstoffspezifischer Verunreinigungen können das Betriebsverhalten bereits merklich verändern. Ein Beispiel ist Wismuth (Bi) in Nickellegierungen (Bild 16.2.2.3-14). In erster Linie ist das Verhalten der Korngrenzen betroffen, auf denen sich die schädlichen Verunreinigungen ansammeln.

**Bild 15.1-3:** Der Faserverlauf bzw. die Vorzugsrichtung der **Korngrenzen** beeinflusst auf vielfältige Weise das Bauteilverhalten (Bild 15.1-2). Wirkt die Beanspruchung quer zum Faserverlauf, ist wegen des Versagens in Korngrenzenrichtung ein schlechteres Verhalten von den folgenden Eigenschaften zu erwarten:

- statische Festigkeit, insbesondere bei Temperatur (Kriechen)
- Schwingfestigkeit (LCF/Thermoermüdung, HCF)
- Risswachstum (Fortschrittsgeschwindigkeit, kritische Risslänge).
- Risszähigkeit
- Bruchdehnung

Scheinbar bildet die Kerbschlagzähigkeit eine Ausnahme. Eine Schlagrichtung quer zur Faser erzeugt einen Bruch quer zur Korngrenzenorientierung. Tatsächlich tritt aber infolge der Biegebeanspruchung eine Zugspannung längs der Faserrichtung mit einer hohen Energieaufnahme auf.

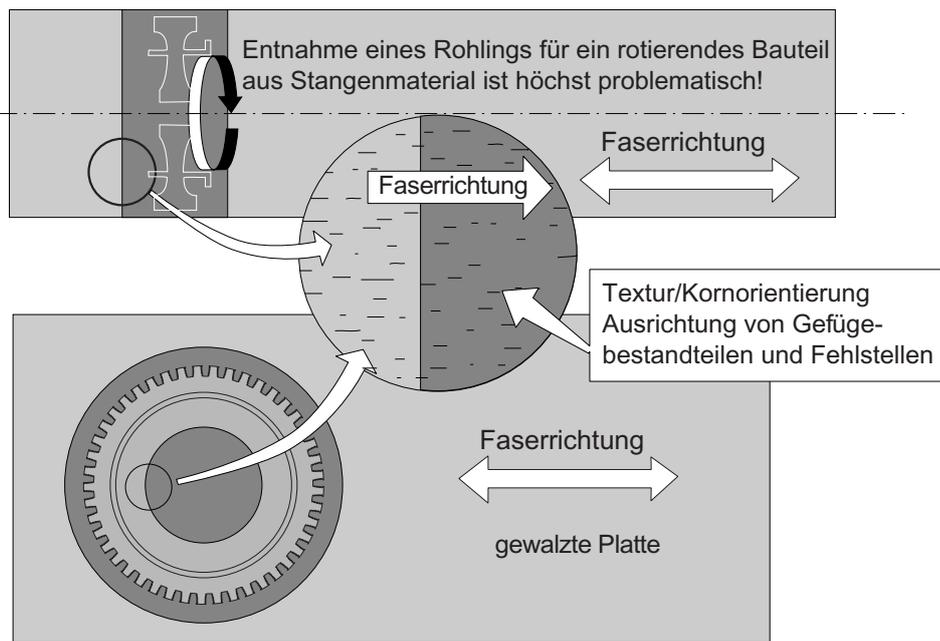
Der Einfluss der Faserrichtung ist für die **Entnahme von Proben** aus Bauteilen und von Bauteilen aus gewalztem Halbzeug wie **Stangen- oder Plattenmaterial** von erheblicher Bedeutung (Skizzen oben). Eine Ausnahme sind in einem Stück gewalzte oder stumpfgeschweißte Ringe aus Walzprofil. Deren Faserrichtung ist nach der höchsten Belastung (Tangentialspannung) ausgerichtet. Besonders bei rotierenden Bauteilen wie Scheiben, ist eine hohe Querbeanspruchung kaum zu vermeiden wenn sie aus Platten oder Stangen entnommen wurden. In der Serienanwendung wurde ein solcher Fall bisher nicht bekannt. Handelt es sich jedoch um **Versuchs- oder Entwicklungsteile**, die unter großem Zeitdruck realisiert werden müssen, ist die Versuchung zu einer solchen Vorgehensweise groß.

Ein potenzielles, auch in der Serienanwendung, auftretendes Problem, ist die ungünstige Ausrichtung von **Blechen in druckbeaufschlagten Gehäusen und deren Flanschen bei Verdichtern, Brennkammern und Turbinen** (Skizzen unten, ungünstige Anordnungen; Band 3, Bild 11.2.2.2-9). Bei Umfangsbelastung durch den Innendruck entsteht die Gefahr einer **axialen Rissbildung, schnellem Rissfortschritt und wegen niedrigerer Risszähigkeit kleiner kritischer Risslänge**. Damit erhöht sich das Versagensrisiko auf doppelte Weise: frühe Rissbildung und zusätzlich eine kleine Zeitspanne für die Entdeckung eines Risses. Auch bei Gehäusewänden mit **Containmentaufgaben** kann sich mit einer ungünstigen Faserrichtung ein unzulässiges Betriebsverhalten ergeben. Eine solche, ungünstige Faserlage kann die Folge zur Verfügung stehender Halbzeugabmaße oder einer Verwechslung sein.

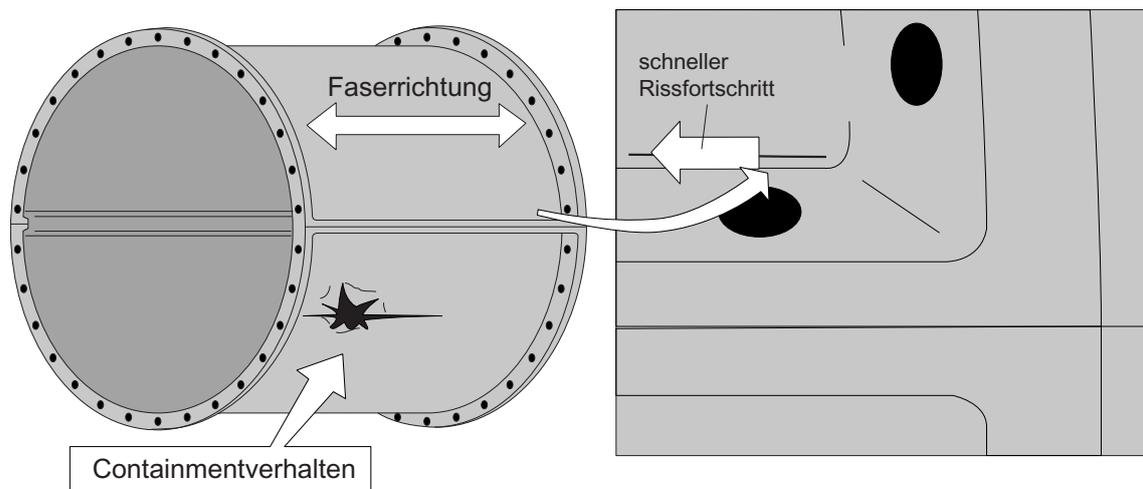
# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

Der Faserverlauf ist von erheblicher Bedeutung für die Bauteilfestigkeit und deshalb auch bei Nachweisen mit der Probenlage zu berücksichtigen.

## Entnahme von Rotorscheiben aus Walzprofilen



## Einfluss der Faserrichtung in Blechen von Gehäusen

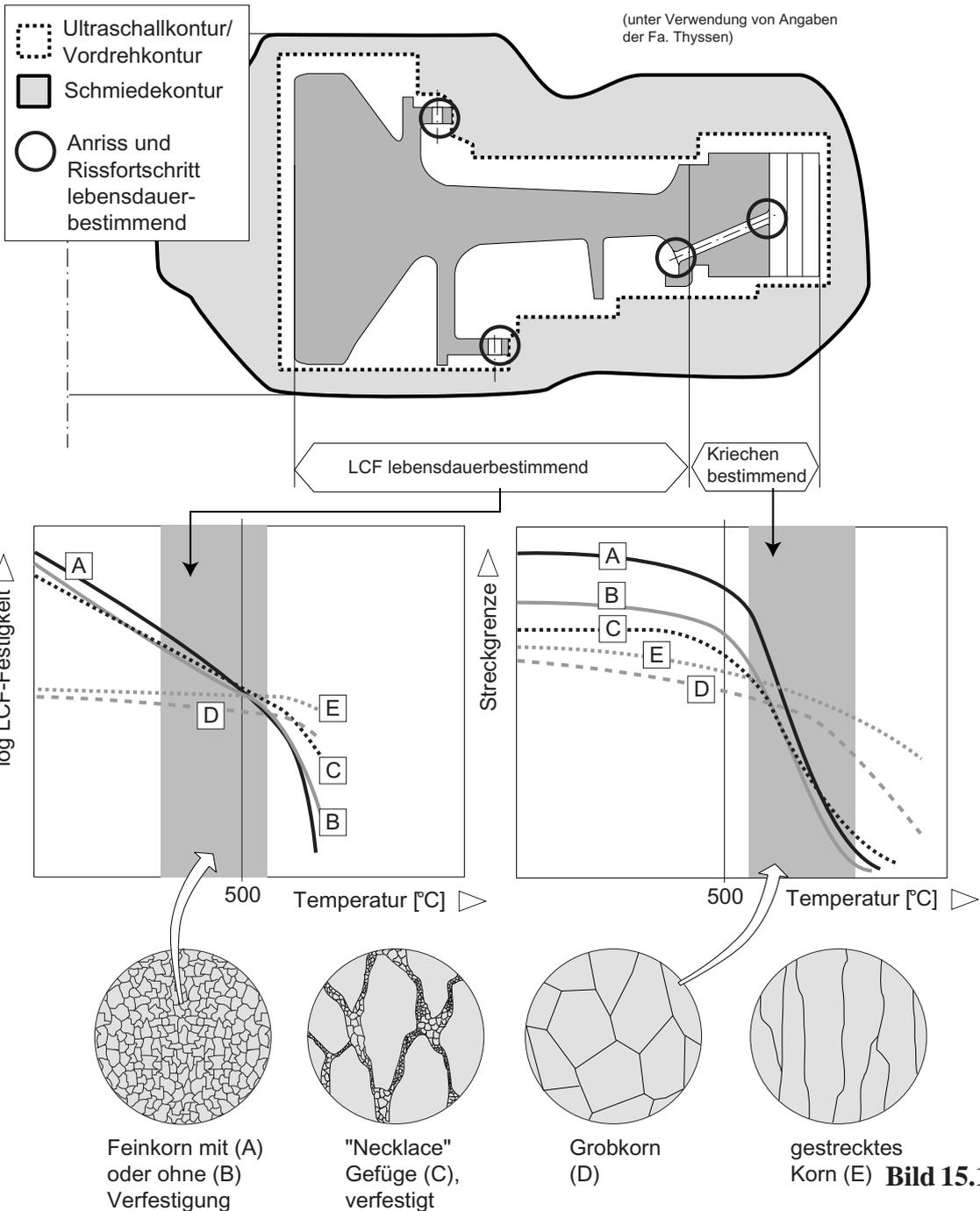


**Bild 15.1-3**

**Bild 15.1-4:** Die verschiedenen Zonen eines Bauteils können sehr unterschiedlich zeitabhängig mechanisch und thermisch belastet sein. Diesen Anforderungen kann ein Werkstoffgefüge allein nicht optimal genügen, wie das Beispiel einer Turbinenscheibe verdeutlicht. Der **Kranz einer Turbinenscheibe** (Skizze oben) befindet sich in der Nähe des Heißgasstroms. Er erfährt so besonders hohe Betriebstemperaturen. In einem solchen Fall sind die lebensdauerbestimmenden Belastungen insbesondere Kriechbeanspruchung und Thermoermüdung. Man wird also in diesem Bauteilbereich ein gröberes Korn (Bild 15.1-2) als in der besonders hoch LCF-beanspruchten **Nabe und Scheibe** anstreben, deren Betriebstemperaturen vergleichsweise niedrig liegen. Das rechte Diagramm zeigt den Verlauf der LCF-Festigkeit über der Temperatur für darunter dargestellte unterschiedliche Gefüge eines typischen Scheibenwerkstoffs. Solche Gefüge entstehen bei dem, in Temperaturverteilung, Zeitablauf und Umformung **abgestimmten, Schmiede- und Wärmebehandlungsprozess**. Man erkennt, dass unterhalb einer Bauteiltemperatur von ca 600 °C (grauer Bereich) feinkörnige und verfestigte Gefüge eine deutlich höhere LCF-Festigkeit aufweisen als grobkörnige Gefüge. Anders verhält es sich bei LCF-Festigkeit (Thermoermüdung), Warmstreckgrenze und Zeitstandfestigkeit oberhalb 600 °C. Deutlich ist im rechten Diagramm zu erkennen, dass die flach verlaufenden Kurven des grobkörnigeren Gefüges über den steil abfallenden Kurven des Feinkorns liegen. Ein grobkörniges Gefüge am Kranz ist deshalb in seinen Eigenschaften optimal auf dessen erhöhte Kriechbeanspruchung und Thermoermüdungsbelastung abgestimmt. An **integralen Turbinenrädern** von Gasturbinen kleiner Leistung (z.B. für Hubschrauber) hat man diese Gefügeanpassung („**Dual Property**“) besonders weit getrieben. Mit Hilfe von Diffusionsverbindungen (Diffusionsschweißen, HIP) werden Schaufelkränze aus typischem grobkörnigem Gusswerkstoff mit ei-

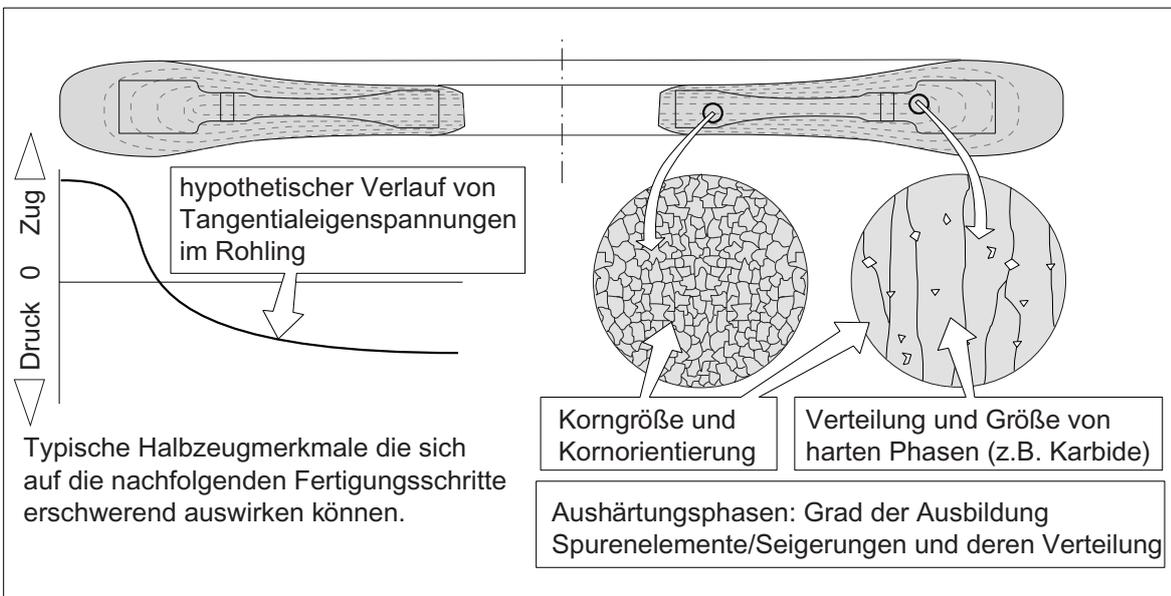
# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

Ein Bauteil hat nach Möglichkeit ein den spezifischen Belastungen einzelner Zonen angepasstes Gefüge.



ner geschmiedeten oder PM-Nabe verbunden (engl. „Dual Property“, Lit. 15.1-11, Bild 16.2.1.3-38). Problematisch an solchen Teilen ist immer die zerstörungsfrei zu prüfende Verbindungszone (Lit. 15.1-1).

Halbzeugeigenschaften können die Fertigung zum Endprodukt äußerst unangenehm erschweren.



Typische werkstoffbedingte Probleme in der Fertigung und Qualitätssicherung:

**Zerspanung:** Werkzeugverschleiß, Rattermarken, Fressen, unerwünschte Spanformen, Oberflächenqualität (z.B. Orangenschaleneffekt), Eigenspannungen in Oberflächennähe, Verzug, Neigung zur Mikrorissbildung (Kommarisse), Schleifrisbildung (Warmrisse), Ausbrechen von Karbiden an der Oberfläche, Aufreißen von Korngrenzen

**Verformen, Richten:** Rissbildung/Bruch, Orangenschaleneffekt in Abhängigkeit von Korngröße und Kornorientierung.

**Schweißen:** Warmrisbildung, verzögerte Rissbildung ("Stress Relief Cracking") bei Stellitpanzerung der Anlageflächen von Deckbändern  
Aufschweißen von Labyrinthspitzen

**Ätzen, chemische und elektrochemische Auflösung bzw. Bohrverfahren:**  
Korngrenzenangriff, selektiver Abtrag (z.B. Herauslösen von Karbiden),  
Rissbildung (SpRK) beim  
Abtrag von Oxidschichten,  
Abziehen (Strippen) von Beschichtungen  
Rissöffnung vor (Eindringprüfung)

**Wärmebehandlung:** Verzug, Rissbildung (Warmrisse)

**Qualitätssicherung:** Prüfbarkeit durch Ultraschall, Grobkorn und ungleichmäßige Korngrößen verstärken die Störungen und mindern die Fehlererkennbarkeit.  
Prüfbarkeit durch Röntgen, Beugungserscheinungen bei Grobkorn von Gussteilen.

**Bild 15.1-5**

**Bild 15.1-5:** Die Qualität des Fertigteils ist von Fertigungsschritten beeinflusst, die ihrerseits von Halbzeugeigenschaften abhängig sind. Solche Eigenschaften sind:

- Korngröße und Kornorientierung
- Harte Phasen und deren Verteilung
- Aushärtungszustand
- Seigerungen und Verunreinigungen
- Eigenspannungen

**Zerspanung:** Die Festigkeit bzw. die Härte sind für die Zerspanungseigenschaften entscheidend. Werkstoffe mit extrem hohen Festigkeiten, wie PM-Werkstoffe für Turbinenscheiben, können einen **unakzeptablen Werkzeugverschleiß** hervorrufen. So ist es möglich, dass das Räumen der Tannenbaumnuten eines einzelnen kleinen Turbinenrads, Räumnadeln im Wert eines Mittelklassewagens benötigt. Auch die benötigte Oberflächenqualität in den zumeist extrem hoch beanspruchten Bauteilzonen lässt keine Schwachstellen wie Rattermarken, Fressspuren oder Rissbildung zu. Eine besondere Erscheinung sind Kommarisse, ein interkristallines Aufreißen von angeschnittenen Körnern an der Oberfläche (Bild 16.2.1.1-2). Sie stehen offenbar im Zusammenhang mit der Kristallorientierung. Bei sehr grobkörnigen, schwer zerspanbaren Werkstoffen (Korngrößen über 1 mm) wie z.B. Ni-Gusslegierungen, machen sich die unterschiedlichen orientierungsabhängigen Eigenschaften der Körner bemerkbar. Die unterschiedlichen Zerspanungskräfte zeichnen sich in den Höhen der Zerspanungsfläche der einzelnen Körner ab. Das führt zu einer deutlich strukturierten Oberfläche (**Orangenschalen-effekt**). Diese Erscheinung ist auch ein Hinweis auf hohe Verfestigungen und entsprechend große, örtlich sehr unterschiedliche, vom Zerspanungsprozess induzierte Eigenspannungen. Für die Festigkeit warmfester Werkstoffe ist neben einer Aushärtungsphase (meist  $\gamma'$ -Phase) auch Größe und Verteilung der Karbide für einen Zerspanungsvorgang von Bedeutung.

Oberflächennahe Karbide können beim Zerspanen ausbrechen und/oder zertrümmert werden. Dabei entstehende, wenn auch kleine, scharfe Kerben können die Schwingfestigkeit des Bauteils merklich beeinflussen.

Werden beim Zerspanungsvorgang (z.B. Schleifen, Hochgeschwindigkeitsfräsen) örtlich so hohe Temperaturen erreicht, dass es zu einer Erweichung der Korngrenzen kommt, können sich im Zusammenspiel mit den gleichzeitig auftretenden Wärmespannungen, sog. Heiß- oder Warmrisse bilden (Bild 15.1-8). Die Empfindlichkeit eines Werkstoffs für dieses Aufreißen von Korngrenzen hängt von der Kornorientierung, der Korngröße und der Korngrenzen-Warmfestigkeit ab. Auch Spurenelemente (z.B. Wismuth), Aushärtungszustand (Kornfestigkeit) spielen eine wichtige Rolle.

**Verformen, Richten:** Verständlicherweise begünstigt eine geringere Duktilität (plastische Verformbarkeit) die Entstehung von Rissen bzw. den Bruch des Werkstücks. Auf die plastische Verformbarkeit wirkt sich eine vorzugsweise Orientierung der Korngrenzen (Faserichtung) aus. Die größte Zähigkeit ergibt sich in Richtung der Korngrenzen was eine Verformung nutzen sollte.

Grobkörnige Werkstoffe lassen sich gewöhnlich weniger gut verformen als feinkörnige. Bei ausgeprägtem Grobkorn kann es zu dem bereits im vorherigen Abschnitt beschriebenen Orangenschaleneffekt kommen. Es zeichnen sich auch hier die orientierungsabhängigen Verformungseigenschaften der einzelnen Körner ab.

Für Fertigungsschritte mit derartigen Effekten ist also auf einen optimalen Gefügezustand zu achten (z.B. lösungsgeglüht). Dieser kann sich durchaus von dem des Fertigteils unterscheiden, der erst nach weiteren Wärmebehandlungen erreicht wird.

**Schweißen:** Gerade dieses Fertigungsverfahren ist besonders werkstoffabhängig. Hauptfehlertyp ist eine Warm/Heißrissbildung

oder verzögerte Rissbildung (*Stress Relief Cracking*, Bild 16.2.1.3-10 und Tabelle 16.2.1.3-1). Von Bedeutung ist der Aushärtungszustand. Beim Schweißen aushärtbarer Werkstoffe wird deshalb ein duktiler, weniger kriechfestes, lösungsgeglühtes Gefüge bevorzugt.

Grobkorn ist für Heißrisse deutlich empfindlicher als Feinkorn (Bild 16.2.1.3-14).

Verständlicherweise wirken sich Seigerungen an den Korngrenzen mit einem Abfall der Kriechfestigkeit bzw. des Schmelzpunkts rissfördernd aus. Deshalb kann eine Werkstoffvariante mit besonders eingenger Legierungsspezifikation notwendig werden.

**Ätzen, Elektrochemische und chemische Abtragungs- und Bohrverfahren:** Die Entfernung von Oxidschichten oder die Öffnung verschmierter Risse aus vorhergehenden Fertigungsschritten erfordert aggressive Medien. Wirken diese zu lange ein oder werden empfindliche Korngrenzen besonders stark angegriffen, kann es zu gefährlichen Schädigungen kommen (Bild 16.2.1.7-7). Die Empfindlichkeit der Korngrenzen ist eine Folge von Anreicherungen und/oder der Verarmung von Legierungsbestandteilen und Phasen. Dabei spielt Legierungstyp, Wärmeeinwirkung (Sensibilisierung, Bild 16.2.1.3-1) und Korngröße (Bild 15.1-2) eine Rolle. Die Oberflächenqualität (Rauigkeit) von chemischen und elektrochemischen Bearbeitungsflächen wie bei Bohr- und Abtragungsverfahren (Bild 16.2.1.2-3 und Bild 16.2.1.2-6) reagiert ebenfalls auf Korngröße und Inhomogenitäten.

**Wärmebehandlung:** In erster Linie ist Verzug und Rissbildung zu vermeiden. Hohe Eigenspannungen aus einem Schmiede- oder Gießprozess können beim Zerspanen zum Verzug, bei einer Wärmebehandlung zusätzlich zur Rissbildung führen. Die Höhe der Eigenspannungen hängt nicht zuletzt von der Warm- und Kriechfestigkeit des Werkstoffs ab. Diese begrenzt den möglichen Spannungsabbau. Diese Rissbildung

unterliegt den gleichen Einflüssen wie das Schweißen.

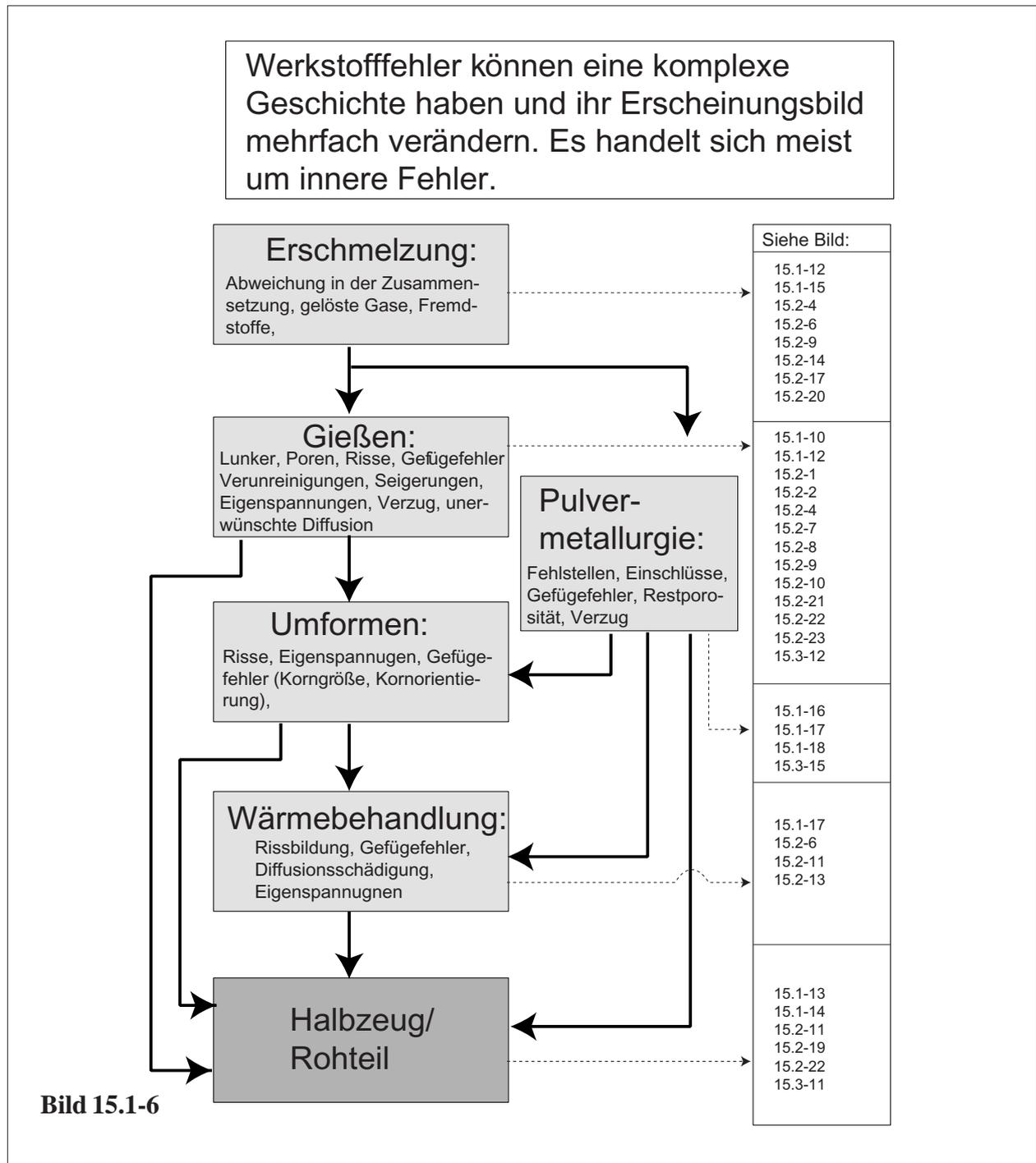
**Qualitätssicherung:** Zerstörungsfreie Prüfung wird hier als Fertigungsschritt behandelt. Die Prüfbarkeit bzw. die ausreichend sicher auffindbare Mindestfehlergröße ist beim Ultraschallverfahren stark von den, durch vom Gefüge bedingte Störungen des Echos („Gras“) abhängig (Bild 17.3.1-4). Je kleiner und gleichmäßiger die Korngröße, um so kleinere Fehlstellen sind sicher auffindbar. Das führt dazu, dass trotz gleicher Legierung ein Schmiedeteil zyklisch nicht so hoch belastbar ist (gröberes, ungleichmäßigeres Korn) als ein feinkörniges PM-Teil.

Bei den sehr großen und in ihrer Struktur inhomogenen Körnern von Gussteilen (bis in den Zentimeterbereich) wird selbst die Röntgenprüfung durch Beugungserscheinungen auf Grund der unterschiedlichen Orientierung des Atomgitters der einzelnen Körner beeinträchtigt. Eigenspannungen im Inneren der Bauteile sind mit serieneigneten zerstörungsfreien Verfahren nicht messbar (Bild 16.2.2.4-21 und Tabelle 17.3.2-1)

**Bild 15.1-6:** Fehler im Halbzeug bzw. in Rohteilen, sog. **Werkstofffehler**, können in sehr unterschiedlichen „**Urformprozessen**“ entstehen und sich im Laufe des Herstellungsprozesses gegenseitig beeinflussen. Im gezeigten Ablaufschema sind die einzelnen Herstellungsschritte in der rechten Spalte Bildern mit ausführlicheren Beschreibungen in den folgenden Kapiteln zugeordnet. Schadensrelevante Probleme wichtiger Prozessschritte sind:

**Erschmelzung:** Bereits die Grundstoffe, aus denen die Legierung erschmolzen wird, beeinflussen die Qualität des Halbzeugs und des Fertigteils. So ist z.B. Halbzeug suspekt, das unter Verwendung von Bearbeitungsspänen mit der Gefahr von Partikeln aus Werkzeugbruch (Hartmetall) erschmolzen wurde. Eigenschaften von Titanlegierungen sind von der Güte des Titanschwamms als Ausgangsprodukt beeinflusst. Es können aber bereits über das Vor-

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen



material Spuren schädlicher Fremdstoffe eingebracht werden. Nachfolgende Produktionsschritte sowie das Betriebsverhalten des Fertigteils können so negativ beeinflusst werden.

**Gießen:** Der Gussbarren (Ingot) kann erfahrungsgemäß Fehlstellen aus dem Gießprozess aufweisen, die nicht durch Abtrennen von Material entfernt wurden (Lit 15.1-3, Bild 15.1-13

und Bild 15.3-7). Fehlstellen als Folge solcher Gussfehler können sich in den daraus hergestellten Schmiedeteilen auch nach einem intensiven Umformprozess wiederfinden (Bild 15.2-22 und Bild 15.2-23).

Hierzu gehören Ansammlungen (**Seigerungen**) von Verunreinigungen (Oxide, Nitride, Karbide) die auf die Erschmelzung zurückgehen (Bild 15.2-22). Auch eine ungleichmäßige Verteilung

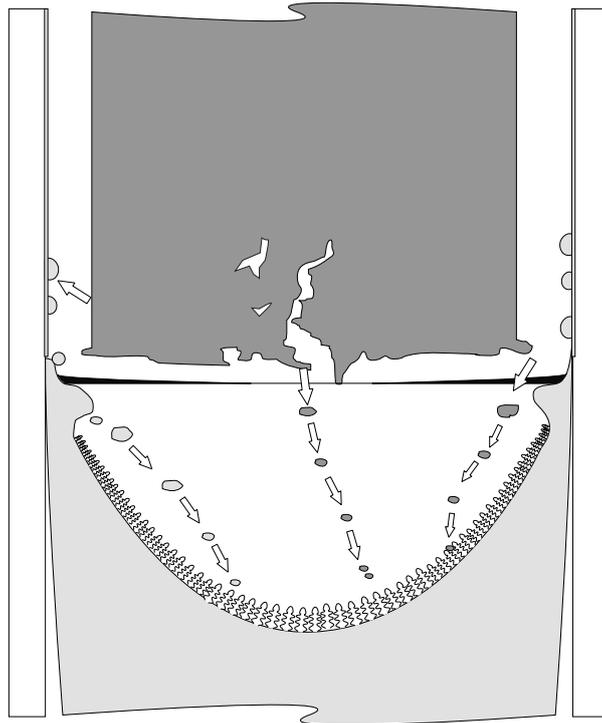
von Legierungsbestandteilen kann gewöhnlich auf den Erstarrungsvorgang zurückgeführt werden. Oxid belegte Trennungen, wie Lunker und Risse, lassen sich vom nachfolgenden Schmiedeprozess nicht fehlerfrei schließen. Ist die Fehlerlage im Halbzeug z.B. in der **Ultraschallkontur** für die ZfP ungünstig, ist mit derartigen Fehlern auch im Fertigteil zu rechnen (Bild 17.3.1-5). Bei Gussteilen, wie Turbinenschaufeln und integralen Turbinenrädern, verbleiben unerkannte Fehler und/oder tolerierte Schwachstellen wie begrenzte Schrumpfporen (Bild 15.1-7) in den Bauteilen. Hinzu kommen Eigenspannungen aus dem Abkühlungsprozess. Stört eine Zerspannung das Gleichgewicht der Eigenspannungen, zeigt sich dies im Verzug. Spätere Betriebsspannungen können sich schadensursächlich mit verbleibenden Eigenspannungen überlagern (siehe auch Bild 15.2-19). Je dicker die Querschnitte in Gussteilen (z.B. integralen Turbinenrädern), um so höher sind die Zugspannungen mit denen zu rechnen ist.

**Umformen:** Schmieden, Walzen und Strangpressen formen das Gussmaterial in Schmiedewerkstoff um. Dieser Prozessschritt kann manche Fehler aus dem Gießprozess nicht eliminieren oder entschärfen (Lit 15.1-2, Bild 15.1-13). Der Umformprozess kann selbst auch die Ursache für Fehler sein. Eine Empfindlichkeit dafür kann wieder im Zusammenhang mit Besonderheiten des Gießprozesses stehen. Gerade warmfeste Legierungen erschweren den Schmiedeprozess. Warmrisse und zu wenig Umformung (geringer **Umformgrad**, Bild 15.1-14) mit unerwünschter Korngröße und/oder ungünstiger Faserrichtung sind typische Folgen (Bild 15.1-3 bis Bild 15.1-5). Warmrisse können an der Oberfläche und/oder im Inneren des Schmiedeteils auftreten. Es ist nicht zu erwarten, dass oxidbelegte, nach außen offene Warmrisse vom Verformungsprozess wieder verschweißt werden. Selbst innere Trennungen können als Schwachstellen verbleiben.

**Wärmebehandlung:** Bereits bei den Prozessschritten des Gießens und Umformens finden „integrierte Wärmebehandlungen“ statt. Reichen diese für geforderte Rohteileigenschaften nicht aus, schließen sich spezielle Wärmebehandlungen an. Große Querschnittsunterschiede beeinflussen den Zeit-Temperaturverlauf unterschiedlich. Das kann sich unzulässig auf Korngröße, Ausscheidungen und Eigenspannungen auswirken. Abhängig von einer hohen Warmfestigkeit ist auch mit gefährlich hohen verbleibenden Eigenspannungen nach einer Wärmebehandlung zu rechnen (Band 3, Bild 14-9; Bild 16.2.2.4-14). Hohe Wärmespannungen können Warmrisse auslösen, die bis in das Fertigteil gelangen, wenn die zerstörungsfreie Prüfung wegen dem ungewöhnlichen Fehlerbild versagt (Bild 17.3.1-9).

**Pulvermetallurgie** (Bild 15.1-15): Bei diesem Verfahren lässt sich prozessbedingt (aussieben) die maximale Fehlergröße klein halten. Die Korngröße ist sehr fein und gleichmäßig. Dies kann jedoch für hoch kriechbeanspruchte Bauteilzonen unerwünscht sein. So wird mit nachgeschalteten Schritten, wie eine besondere Wärmebehandlung, über **Kornwachstum** versucht diesem Problem zu begegnen. Besonders gefürchtet sind Fehler die als Fremdpartikel aus dem Füllprozess oder im Pulver eingebracht wurden (Bild 15.1-16). Die Nutzung des hohen Festigkeitspotenzials lässt nur sehr kleine Schwachstellen zu. Ein Durchschlupf bei den zerstörungsfreien Prüfungen (Bilder 17.3.1-2 bis 17.3.1-4) führt so leicht zu wachstumsfähigen Fehlern im Betrieb. Auch nachgeschmiedetes (**HIP and forge**) Halbzeug kann gefährliche Reste dieser Fehler aufweisen (Bild 15.1-16).

## 15.1 Ursachen für Probleme an Rohteilen und Halbzeug.



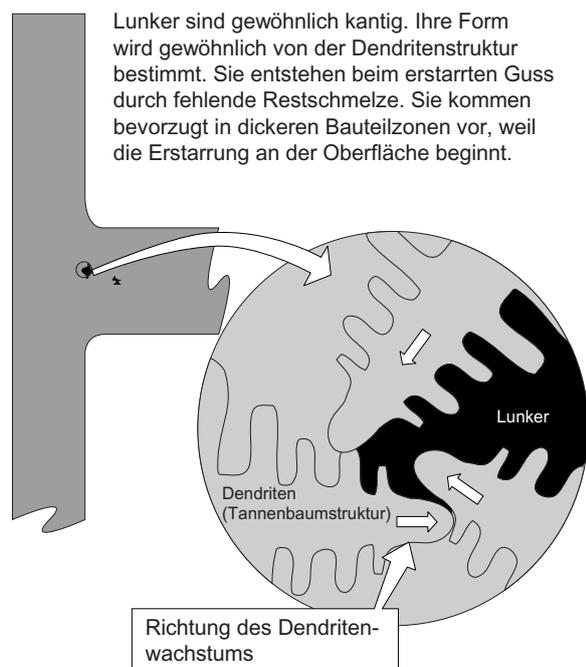
Im Folgenden sollen anhand weniger ausgewählter Beispiele Ursachen und Probleme an Rohteilen und Halbzeug dargestellt werden. Es handelt sich um unerwünschte Auswirkungen von Einflüssen durch Vormaterial und den Herstellungsprozess. Die Vielzahl verfahrensspezifischer und **konstruktiver Einflüsse** ist in der einschlägigen Fachliteratur (siehe empfohlene Literatur am Ende des Kapitels) ausreichend behandelt. Angesprochen sind besonders Fachleute außerhalb der Werkstofftechnik, die sich jedoch von Ihrer Aufgabe her mit diesem Gebiet auseinandersetzen müssen. Hierzu gehören Konstrukteure sowie Personal aus Fertigung, Arbeitsvorbereitung und Qualitätssicherung, Insbesondere der Konstrukteur beeinflusst durch Gestaltung und Massforderungen entscheidend Häufigkeit, Arten und Verteilung von Fehlern. Damit optimiert er Qualität, Kosten und Sicherheit von Rohteilen und Halbzeug und so der Fertigteile (Bild 15.1-8). Im Folgenden geht es um das Verständnis schadensrelevanter Prozessabläufe.

Eine entsprechende Auswahl von Ursachen, die im Zusammenhang mit Schäden und Unfällen bekannt geworden sind, werden dazu genauer beschrieben, .

Zu Beginn soll die Entstehung einiger solcher häufig auftretender Schädigungen und Schwachstellen erklärt und in diesem Zusammenhang Fachbegriffe verdeutlicht werden. Es handelt sich um solche, die in der Praxis missverständlich gebraucht werden. Hierzu gehört die Unterscheidung von Poren und Lunkern (Bild 15.1-7). Auch das Phänomen der Warmrissbildung (Bild 15.1-8, Bild 16.2.1.1-2 und Bild 16.2.1.3-13) tritt in vielen Prozessschritten auf (Bild 15.1-6). Hier sollte dessen Verstehen ebenfalls als Voraussetzung für gezielte erfolgreiche Abhilfe gelten.

## Lunker oder Gaspore? Zwei durchaus unterschiedliche Werkstofffehler.

### Lunker, Schrumpflunker, Schrumpfporen



### Gasporen



Bild 15.1-7

**Bild 15.1-7:** Von Praktikern außerhalb der Werkstoffkunde werden erfahrungsgemäß die Begriffe **Lunker** und **Pore**, für typische Hohlräume in Gussteilen, vertauscht und falsch angewendet.

**Lunker, Schrumpflunker oder Schrumpfporen** (Skizze links) sind Hohlräume aufgrund **fehlender Restschmelze**. Sie bildeten sich beim Erstarren der Schmelze zwischen sog. **Dendriten**. Aus dieser Entstehung und der Anordnung im Gefüge ist ihre zerklüftete Form verständlich. Häufig bilden mehrere Lunker ein **Lunkerfeld**. In diesem können die einzelnen Lunker durch enge, rissartige interdendritische Öffnungen verbunden sein. Weil Lunker sich erst zum Ende eines örtlichen Erstarrungsvorgangs bilden, ist verständlich, dass sie oft durch eine „Gushaut“ zur Oberfläche verschlossen sind. Das macht es schwer, Lunker mittels

**Eindringprüfung** zu finden (Bild 17.3.1-4). Um Lunker zu öffnen, werden Bauteile geätzt. Eine abrasive Strahlbehandlung der Gussteile ist nicht unbedingt die Gewähr für das Öffnen der Lunker. Es kann dabei durchaus zum Verstopfen und zum Zudrücken feiner Verbindungen zur Oberfläche kommen (Bild 17.3.1-4). Eine raue Strahloberfläche kann die Fehlererkennbarkeit zusätzlich erschweren. Für das **Öffnen von oberflächennahen Lunkern** hat sich ein **thermischer Zyklus** gut bewährt (Bild 17.3.1-7). Zum **Auffinden innerer Lunker** wird eine zusätzliche **Röntgenprüfung** vorgenommen (Bild 17.3.1-4). Selbst sehr kleine Lunker lassen sich mit Mikrofocusröntgen finden (Lit. 15.1-1).

Ein **Öffnen der Lunker kann auch erst im Betrieb** durch thermisch und/oder mechanisch bedingte Dehnungen erfolgen. **Deshalb ist es durchaus nicht selten, dass Lunker erst im Betrieb entdeckt werden.**

Größere Lunkerfelder können sich durch dicke Querschnitte ziehen. Das führt bei Wänden die unter Differenzdruck stehen zu **Undichtigkeiten**. So kommt es zum typischen Ausschwitzen von Öl bei Getriebegehäusen aus Leichtmetallguss. Aus diesem Grund werden Getriebegehäuse mit Hilfe einer **Infiltration** aushärtbarer Substanzen (Kunstharz, Wasserglas) abgedichtet. Ein ähnlicher Effekt kann das Strahlen mit großen Aluminiumkugeln erreichen. Beide Verfahren lassen sich auch kombinieren.

Lunker sind bevorzugt in **dicken Querschnitten** zu erwarten. Dies macht sie als **Starter für LCF-Risse** in den hochbelasteten **Naben gegossener Turbinenräder** kleiner Triebwerke und den **Tannenbaumfüßen** größerer Turbinenschaufeln besonders gefährlich.

Auch in **dünnen Querschnitten** wie den Wänden gekühlter Turbinenschaufeln können sich Lunker bilden. Hier sind besonders sog. **Lagenlunker** zu nennen. Hier haben sich Lunker in einer Ebene angeordnet und schwächen so den betroffenen Querschnitt besonders (Lit. 15.1-1, Bild 15.2-1). Auch an **schroffen Querschnittsübergängen** bilden sich bevorzugt Lunker. Typisch ist eine Lunkerbildung am **Übergang von Noppen** (engl. „Pedestal“) oder **Querstegen in die Wand** gekühlter Turbinenschaufeln (Bild 15.2-1).

Geschlossene Lunker lassen sich mit einem **HIP-Prozess schließen** (Bild 15.3-8). Es kommt bei metallisch blanken Lunkeroberflächen zu einer Verschweißung und somit Beseitigung der Fehlstelle. Das fehlende Material im Lunker kann sich dabei in Form einer **Delle an der Oberfläche** des Bauteils abzeichnen.

Werden in einem, dem Guss anschließenden Schmiedeprozess Lunker nicht ganz geschlossen und/oder wieder verschweißt, z.B. als Folge einer zu geringen Verformung, sind auch **Lunker in Schmiedeteilen** möglich.

Der Vollständigkeit wegen sei hier auch die Lunkerbildung in **Schweißnähten** erwähnt. Ihre Entstehung entspricht dem Gussteil. Zum Ein-

fluss von Lunkern auf die Bauteilfestigkeit, insbesondere bei thermisch-mechanischer Wechselbeanspruchung wird in Kapitel 15.3 Stellung genommen (Lit 15.1-18).

**Gasporen in Gussteilen und Schweißungen** sind gewöhnlich sphärische Hohlräume ähnlich kleiner Blasen (Skizze rechts). Sie sind Folge einer Gasbildung in der Schmelze. Weil sie aufschwimmen sammeln sie sich im oberen Bereich des Bauteils oder an nach oben abschließenden Flächen. Gasporen haben gewöhnlich keine Verbindung zur Oberfläche, sie erfordern deshalb zur Auffindung eine Röntgenprüfung. Porenwände sind meist nicht oxidiert. Poren lassen sich deshalb mit einem HIP-Prozess entfernen.

Auch in **Schmiedeteilen** werden in seltenen Fällen Gasporen, wenn auch sehr kleine, gefunden (z.B. in **Titanlegierungen**, Bild 15.2-20). Sie stammen aus dem Gießprozess und wurden nicht verschmiedet. Oft stehen diese Poren im Zusammenhang mit **Wasserstoff**.

Gleiches gilt für viele Poren in Lichtbogen-Schweißverfahren die eine **Verdampfung des Metalls** nutzen. Diese können Metaldampf vor der Sublimation einfangen und eine Gaspore entstehen lassen. Zu solchen Verfahren zählt das **Elektronenstrahlschweißen** (Bild 16.2.1.3-25). Der Verdampfungsprozess wird vom Umgebungsvakuum unterstützt.

Eine weitere Form der Porenbildung sind mikroskopisch feine Poren auf Korngrenzen (Stähle) im Zusammenhang mit einer **Wasserstoffversprödung**. Diese Poren haben sich **erst im Schmiedeteil gebildet** (Band 1, Bild 5.4.4.1-2).

Porenbildung ist auch bei **PM-Werkstoffen** bekannt. Wenn eine zeitweise **leckende Kapsel** das Druckgas (meist Argon) in den noch porösen Körper eindringen lässt und dieses nach der Verdichtung gefangen bleibt, können sich während und nach dem Abkühlprozess auf Grund des hohen Druckes Poren bilden.

Der Vollständigkeit halber sei die Bildung winziger Poren (**Kriechporen**) auf den **Korn-**

**grenzen von Heiteilen** erwähnt (Band 3, Bild 12.5-7). Diese Poren entstehen besonders ausgeprägt in Schmiedeteilen während des Kriechprozesses im Betrieb. Geschlossene Poren, d.h. solange keine Risse zur Oberfläche gehen (keine Oxidation, Differenzdruck kann sich aufbauen) können in einer Frühphase, mit Hilfe eines **HIP-Regenerationsprozesses** geschlossen werden (siehe auch Bild 15.1-16).

**Bild 15.1-8:** Neben Betriebseinflssen (Skizze oben Mitte) wie Anstreifvorgnge (Band 2, Bild 7.2.2-9.2) die in erster Linie mit schnellen örtlichen Überhitzungen in Zusammenhang stehen, können viele Verfahren bzw. Fertigungsschritte eine **Warm- bzw. Heirissbildung** auslösen:

- Gießen (Skizze oben rechts)
- Schmieden (Bild 15.2-11)
- Wärmebehandlung (Beispiel in Text zu Bild 17.3.1-9)
- Schweißen (Skizze oben links, Bild 16.2.1.3-10)
- Zerspanung wie Schleifen und Trennen (Bild 16.2.1.1-2).

Dabei wird der ausreichend erwärmte Werkstoff in erster Linie von Eigenspannungen (Wärmespannungen) an erweichten oder schmelzflüssigen Korngrenzen aufgerissen (mittlere Skizzen).

Ein Zusammenwirken vieler Einflüsse begünstigt die Warmrissbildung (Schaubild unten). Die folgenden Betrachtungen sollen sich auf den Gestaltungs- und Herstellungsprozess von Rohteilen, d.h. das Gießen, beschränken:

**Konstruktion:** Bereits die Konstruktion trägt entscheidend zur Warmrissbildung in einem Gussteil bei.

Dazu passt der **Trend zu äußerst komplexen, integralen großen Gussteilen** wie **Turbinenleitapparaten** in Segmenten oder als ganzes Bauteil. Abrupte Querschnittsübergänge in Kombination mit hoher Steifigkeit, Spannungskonzentrationen (scharfe Ecken) und unterschiedlicher Wärmeabfuhr unterstützen die Warmrissbildung. Ein typisches Bauteil sind integrale Turbinenleitapparate (Bild 15.1-9).

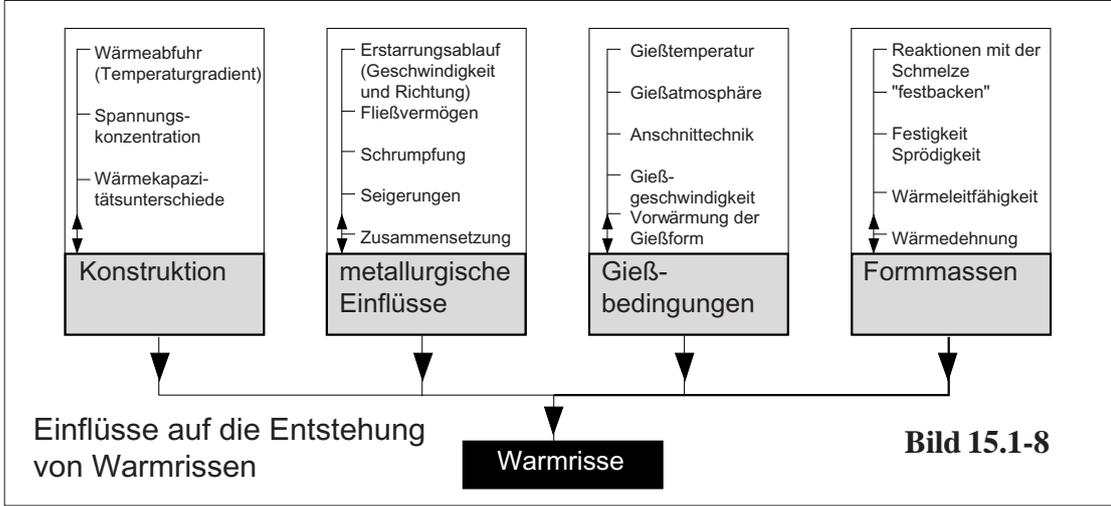
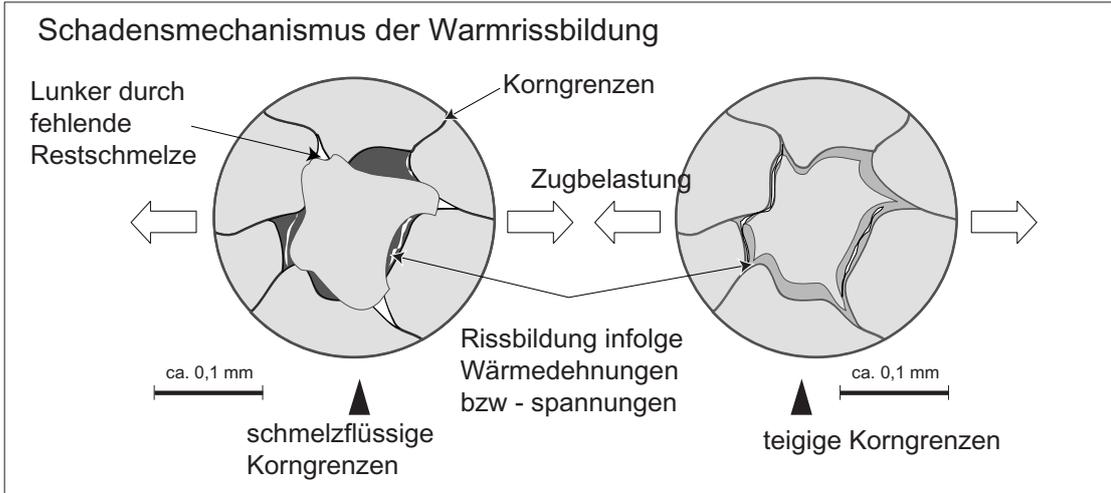
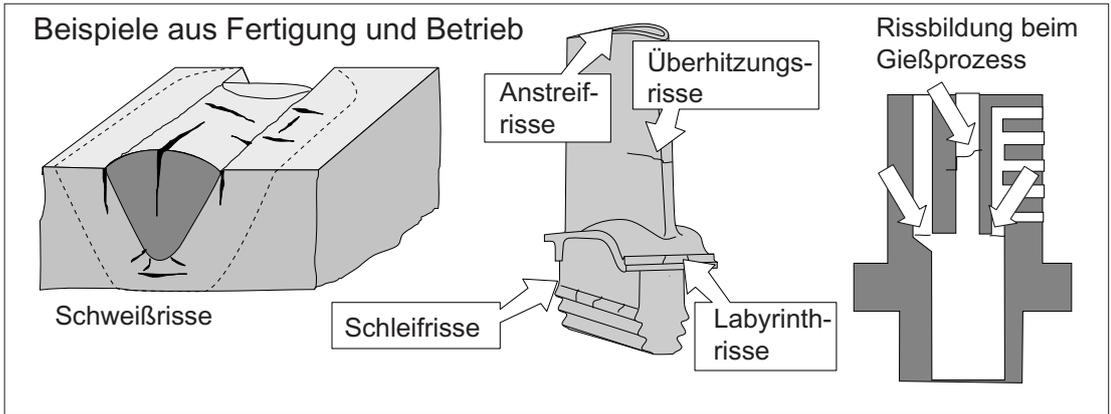
**Metallurgische Einflüsse** (siehe Bild 15.1-17): Natürlich gibt es legierungsabhngige Unterschiede in der Warmrissneigung. Die Realisierung eines komplexen Gussteils ist also nicht nachgewiesen wenn dies für einen anderen Werkstoff (z.B. mit höherer Duktilität) gelang. Scheinbar kleine Unterschiede im Erstarrungsablauf, der Schrumpfung, einer Neigung zur Seigerungsbildung (Anreicherung oder Verarmung an Legierungsbestandteilen) sowie geringen Mengen schädlicher Verunreinigungen (z.B. Wismuth, Lit 15.1-7, Bild 16.2.2.3-14) können sich gravierend auswirken.

**Gießbedingungen:** Große Erfahrung und die beste Gieereiausrstung sind bei komplexen Gussteilen des Triebwerksbaus die Voraussetzung Termine und Serienpreis zu halten. Anschnitttechnik mit Anordnung und Gestaltung von Einguss und Steiger, Vorwärmung und Abkühlung der Gießform, Gießgeschwindigkeit und Gieatmosphre sind im Zusammenspiel zu optimieren.

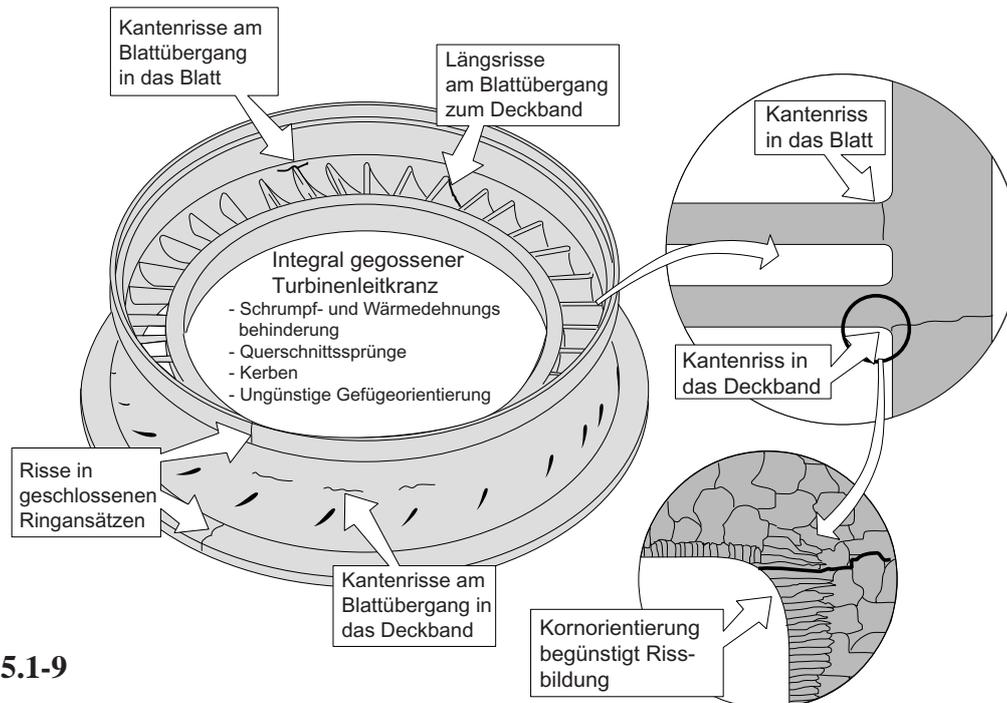
**Formmassen:** Hierbei spielen natürlich auch die keramischen Gießformen in Ihrem Einfluss auf den Wärmehaushalt und die Belastung des schrumpfenden Bauteils **bei Erstarrung und Abkühlung eine entscheidende Rolle** (Bild 15.2-1).

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

Warmrissbildung tritt bei vielen Herstellungs- und Betriebsvorgängen auf, die Einflüsse und Mechanismen sind weitgehend gleich.



Bereits der Konstrukteur entscheidet über die Neigung eines Bauteils zur Warmrissbildung. Dies gilt für die Rohteilherstellung und für das Betriebsverhalten.



**Bild 15.1-9**

**Bild 15.1-9:** Ein großes Problem integraler Turbinenleitapparate mit bis zu 50 cm Durchmesser, wie sie bei kleineren Triebwerken zum Einsatz kommen, ist die Warmrissbildung (Bild 15.1-8). Diese Bauteile überlagern in besonderem Maße warmrissbegünstigende Eigenschaften:

- Prinzipbedingte **behinderte Wärmedehnung** ermöglicht hohe Wärmespannungen.
- **Querschnittsprünge** und Materialansammlungen an Blattübergängen in die Deckbänder (Bauteilskizze und Detail oben rechts).
- **Kerben** an den Kanten der Übergänge.
- **Ungünstige Kornorientierung** in den gefährdeten Zonen (Detail unten rechts).

Dies kann zu erheblichen Ausschussquoten und Lieferschwierigkeiten bis zur Nichtreali-

sierbarkeit in der Serie führen. Ist es einer Gießerei nach aufwändiger Entwicklungsarbeit (Gießversuchen) gelungen ein solches Serienteil zu liefern, besteht erfahrungsgemäß die große Gefahr, dass dieser Aufwand sich für einen zweiten Lieferanten nicht mehr lohnt und ein „Double Sourcing“ nicht möglich ist. Fällt der verbliebene Lieferant aus, ist damit das gesamte Projekt zumindest verzögert, wenn nicht gar gefährdet.

**Interessant und von großer Bedeutung ist die Erfahrung, dass warmrissempfindliche Bereiche bei der Rohteilherstellung auch im Betrieb rissanfällig sind.** Hier handelt es sich jedoch meist um Thermoermüdungsrisse (Band 3, Bild 12.6.2-4). Warmrisse am Rohteil sollten deshalb den Konstrukteur zu einer rechtzeitigen Optimierung gerade im Hinblick auf das zu erwartende Betriebsverhalten ermutigen.

**Bild 15.1-10:** Viele Bauteile der Turbotriebwerke werden als **Feinguss** nach dem Prinzip des **Wachsausschmelzverfahrens** hergestellt. Es handelt sich in erster Linie um Heiteile aus sog. Superlegierungen vorzugsweise auf Ni-Basis, in geringerem Maß auf Co-Basis. **Ganz allgemein kann man sagen: Je komplexer und integraler das Bauteil ist, um so größer sind die zu erwartenden Gussprobleme, der technologische Entwicklungsaufwand und die Ausschussrate.**

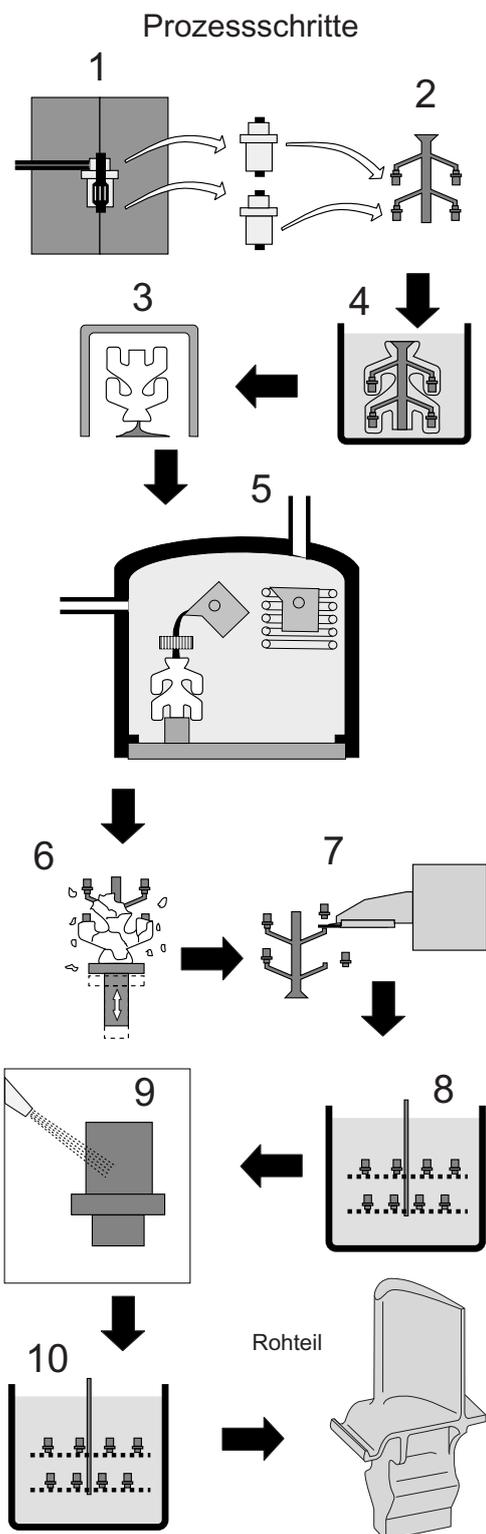
Typische Teile sind Turbinenschaufeln (Bild 15.2-1) in Form von **Einzelteilen oder Segmenten bis zu integralen (einstckigen) Leitapparaten**. Beschauelte **Turbinenräder** kleinerer Gasturbinen werden in einem Stück (Blisk) gegossen. Weitere Teile sind ganze Gehäuse oder **Gehäuse**. In Verdichter und Turbine finden wir derartige Feingussteile. Bei manchen kleinen Gasturbinen als Blisks aus Stahlguss, in großen Gasturbinen als einzelne Schaufeln bis zu ganzen Verdichterleitapparaten. Hier steht die Schwingfestigkeit im Vordergrund. Das erschwert den Ersatz von Schmiedeteilen durch Gussteile erheblich. Natürlich werden auch Titanlegierungen, beispielsweise für Verdichtergehäuse, in ähnlichen Gussverfahren hergestellt. Weil zumindest komplexe geometrische Flächen wie die der Schaufelbltter beim Guss die Endkontur des Fertigteils erhalten, also keinen merklichen Abtrag erfahren, können Schwachstellen und unerkannte Fehler aus dem Gießprozess leichter im Bauteil verbleiben als z.B. bei Schmiedeteilen die zerspannt werden. Solche Fehler bestimmen in hohem Maße die Betriebssicherheit. Deshalb ist ein Verständnis des Entstehens, der Ursachen, der Verteilung im Bauteil (Skizzen auf der linken Seite) und der Beeinflussung der Betriebseigenschaften (Skizzen auf der rechten Seite) Voraussetzung für das Vermeiden oder sichere Auffinden von Gussfehlern. Im Folgenden werden am Beispiel einer gekühlten Turbinenrotorschaukel die Schritte des Gießprozesses typischen Problemen, Fehlern und deren Lagen am Bauteil (gekennzeichnet durch A,B,C,D) zugeordnet:

**„1 und 2“ Wachsmo** **modell mit Keramikkernen:** Weil Abweichungen äußerer Masse und Geometrien einfacher zu erkennen sind, besteht eine Gefahr eher durch innen liegende Probleme. Die oft sehr filigranen und bruchempfindlichen **Keramikkern**e können im Inneren gerissen, gebrochen und aus ihrer geforderten Lage versetzt sein. Dies kann sich später im Inneren, z.B. der Khlkonfiguration, abbilden und diese unzulässig verändern (Bild 15.2-1). Selbst wenn solche Fehler mit modernen Prüfverfahren aufgefunden werden, kann es zu inakzeptablen Ausschussraten kommen. Dies gilt besonders für den Einkristallguss mit einer hohen Beanspruchung der Kerne (Bild 15.2-4).

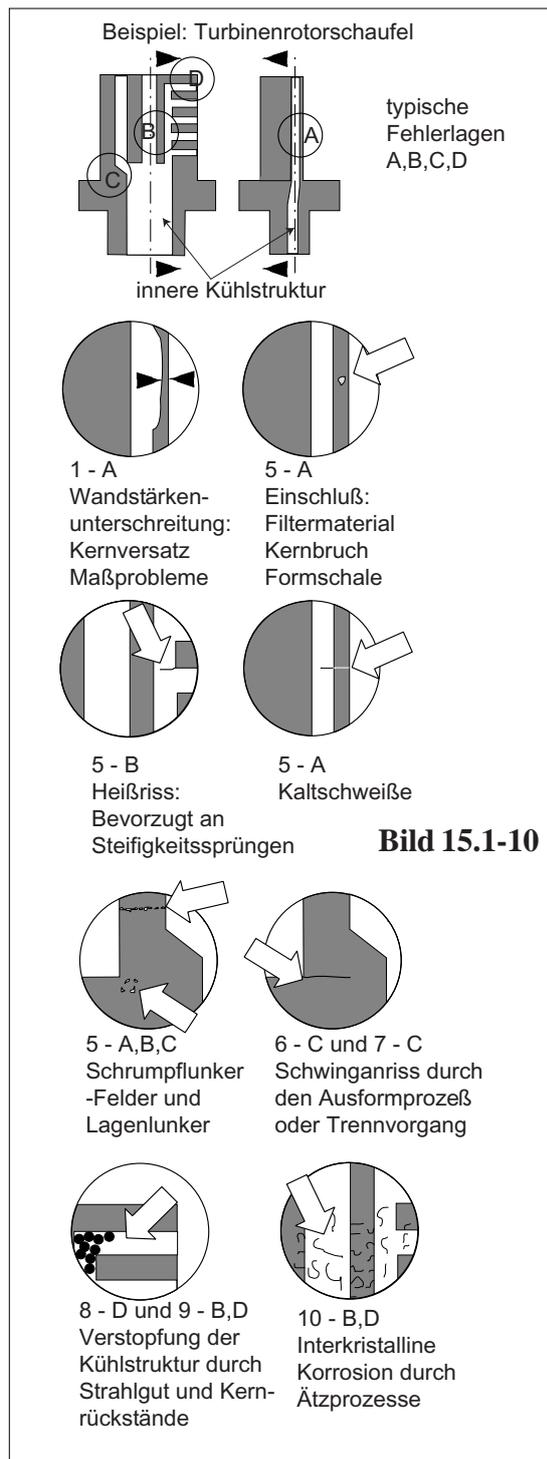
**„3“ und „4“ Gussform:** Die keramische Form für die Gusstraube bestimmt die äußere Form der Teile. Die Formsteifigkeit und wärmetechnische Daten sind für das Gussteil von großer Bedeutung. Mit einer Dotierung der Innenwand (Keimbildung) lässt sich das **Kornwachstum** an der Gussteiloberflche beeinflussen. Die äußere Bauteilgeometrie ist gut prüfbar, sodass masslich unzulässige Teile ausgeschieden werden können. Bestimmte **Verzge** lassen sich in festzulegenden Grenzen durch **Richten** (z.B. Verdrehen des Blattes, Bild 15.3-5) auffangen (siehe hierzu Punkt „11“ und Bild 16.2.2.5-12).

**„5“ Gießvorgang:** **Keramische Partikel können aus einem Filter, vom Kern oder der inneren Formschaleno** **berfläche** von der Schmelze mitgeführt werden. Solche Fehlstellen können dünne Querschnitte (z.B. Wände gekühlter Turbinenschaufeln, Bild 15.2-1) merklich schwächen. Diese Fehlstellen sollten jedoch mit Röntgen ausreichend sicher gefunden werden weil hier, anders als bei der Verstopfung von Kühlkanälen, die niedrige Absorption der Röntgenstrahlen von Vorteil ist. **Verunreinigungen der Schmelze durch geringste Mengen schädlicher Metalle** wie **Wismut** (Bild 16.2.2.3-14) und **Blei** sind dagegen sehr viel schwerer zu entdecken und können ganze Chargen unbrauchbar machen. Dies ist

## Entstehung von Fehlern an Fertigteilen im Feingussprozess.



### Fehler im Fertigteil



besonders unangenehm wenn die Schädigung **erst im Betrieb durch vorzeitiges Versagen erkannt** wird.

Das Gefüge, insbesondere **Korngröße, Korngrenzenorientierung, Kornform (Stängel, globular) und Kornstruktur (Dendriten, Phasen, Karbide)** werden vom zeitlichen und räumlichen Verlauf des Temperaturgradienten bei der Erstarrung bestimmt. Mit gesteuerten Abkühlungsraten und Temperaturgradienten lassen sich **gerichtet erstarrte Gefüge** (Korngrenzen parallel zur lebensdauerbestimmenden Beanspruchung) und **Einkristalle** herstellen (Bild 15.2-4). Damit werden Betriebseigenschaften des Bauteils optimiert. Hierzu gehören insbesondere Thermoermüdung und Kriechfestigkeit. Eine **nachträgliche Veränderung der Korngröße und -geometrie durch Wärmebehandlungen ist, im Gegensatz zu den verstärkenden Phasen und Karbiden, ohne Nachteile nicht möglich**. Treten **Stängelkristalle** in Bauteilzonen wie dem Übergang der Blattecken in das Deckband auf, die unter hohen Wärmespannungen stehen, wird die zu erwartende Lebensdauer des Bauteils entscheidend verkürzt.

Beim Erstarren des Bauteils kann es in **Querschnittsansammlungen zur Lunkerbildung** kommen (Bild 15.1-7). Solange diese Fehlstellen zur Oberfläche offen sind oder ausreichend voluminös, genügen Eindringprüfung und Röntgen für die sichere Auffindbarkeit. Kleine Ansammlungen von Lunkern an Querschnittssprüngen wie dem **Übergang von Noppen in die Wand eines Kühlluftkanals** oder eine **Lagenporosität** (Bild 15.2-1) sind dagegen schwer aufzufinden und können wegen des Risikos weiterer potenziell betroffener Teile im Betrieb umfangreiche Aktionen auslösen. Sind **aufeinandertreffende Schmelzenströme** bereits zu weit abgekühlt, kommt keine Verbindung zustande, es entsteht eine schwer erkennbare **Kaltschweisse**.

Beim Abkühlen des Gussteils führt der **Schrumpf im Teil und gegenüber der keramischen Gussform** zu hohen Wärme-

spannungen. Diese können **Warmrisse** (Bild 15.1-9) entstehen lassen. Kommt es an einkristallinen Werkstoffen zu ausreichend plastisch verformten Zonen, ist in der Abkühlungsphase bei hohen Temperaturen mit einer **Rekristallisierung unter Bildung kleiner „Fehlkörner“** zu rechnen. Diese verschlechtern das Betriebsverhalten und begünstigen eine **Rissbildung bei einer Bearbeitung** (z.B. beim Schleifen von Schauffelfüßen).

„6“ **Entformen:** Obwohl die **Gussform** nach der Abkühlung Risse aufweist, muss sie meist durch die **Einwirkung erheblicher mechanischer Kräfte** vom Bauteil getrennt werden. Das Entfernen der keramischen Gusschale mit **vibrierenden Geräten** (Bild 16.2.2.5-7) kann zu unerkennbaren Vorschädigungen infolge Schwingermüdung und/oder zu **Schwingrissen** führen.

„7“ **Abtrennen:** Es besteht der Verdacht, dass ein ähnliches Problem auch beim Abtrennen der Gussteile von der Traube besteht. Die Anregung der **Schwingungen** ist im Zusammenhang mit einer ungünstigen Einspannung der Teile und einem „Stick Slip“-Effekt der **Trennscheibe** zu sehen.

„8“ **Entfernen der Kerne (Auslaugen):** Dies geschieht, wegen der hohen chemischen Stabilität der keramischen Kerne, durch aggressive Medien. Bei Abweichungen der Prozessparameter kann dabei auch das Grundmaterial geschädigt werden. Ein **Korngrenzenangriff** ist besonders gefährlich und schwer erkennbar. Nicht ausreichend entfernte Kerne (**Kernrückstände**) können **Kühlluftkanäle so verengen**, dass es im Betrieb zur Überhitzung mit extremem Lebensdauerabfall kommt. Das typische Kernmaterial  $Al_2O_3$  absorbiert Röntgenstrahlen so wenig, dass von Kernrückständen verstopfte Kühlluftkanäle nur schwer zu finden sind (Lit. 15.1-1).

„9“ **Abrasive Strahlbehandlung:** Zur Entfernung von äußeren Formresten und für eine op-

timale äußere Erscheinung werden Gussteile mit keramischen Partikeln, im Extremfall mit Stahlkorn gestrahlt. Dabei besteht die Gefahr, dass Fehler verdeckt und Risse verschlossen werden, was eine nachträgliche Eindringprüfung erschwert (Bild 17.3.1-4). Strahlmittelreste in den Schaufeln sollten sich eigentlich vermeiden lassen. Eine Beladung mit stecken gebliebenem Strahlbruch kann bei späteren Fertigungsfolgen wie Diffusionsbeschichtungen (Bild 16.2.1.8.1-3) Probleme machen. Superlegierungen können mit **Strahlgut** (z.B. SiC) **reagieren**. Diese Gefahr besteht in nachfolgenden Fertigungsprozessen mit hohen Temperaturen wie Wärmebehandlung, Diffusionsbeschichtung und Hochtemperatlöten. Auch unter hohen Betriebstemperaturen kann es so zu schleichenden Schäden kommen.

„10“ **Ätzen:** Vor und/oder nach einem abrasiven Strahlen folgt in vielen Fällen ein Ätzvorgang in einem aggressiven Medium. Eventuelle Fehler werden dabei sichtbar gemacht bzw. Trennungen geöffnet. **Makrogefüge** wird entwickelt und kann beurteilt werden (Korngröße, Korngeometrie, siehe „5 Guss“). Auch hier ist darauf zu achten, dass insbesondere aus schlecht kontrollierbaren **Innenräumen** kein unzulässiger Angriff erfolgt und keine später schädigenden **Rückstände des Ätzmittels** verbleiben (Bild 16.2.1.7-6).

„11“ **Wärmebehandlung:** Eine Wärmebehandlung der Gussteile dient zur Optimierung der Form und Verteilung von Phasen ( $\gamma$ -Phase und Karbiden) welche die Betriebsfestigkeit bestimmen. Die dafür notwendigen **Glühtemperaturen sind sehr hoch**, bis in die Nähe der Solidustemperatur. Wenn in Verfahrensschritten wie Strahlen oder Richten ausreichend plastisch verformte Zonen (kritische Verformung) in einem einkristallinen Bauteil entstanden sind, kann es bei sehr hohen Glühtemperaturen zur Rekristallisation kommen (Bild 15.2-4). Es bilden sich neue Körner, die erfahrungsgemäß in

folgenden Fertigungsschritten und dem Betrieb als Schwachstellen wirken.

**Bild 15.1-11:** Fehlstellen und Besonderheiten in Schmiedeteilen gehen häufig auf den Gussblock (Ingot) zurück (Bild 15.2-21 und Bild 15.2-22). Wird ein zu kleines Kopfstück, abgetrennt (Skizze oben) können verbliebene Fehlstellen in das Schmiedeteil gelangen. Der Schmiedeprozess ist dann möglicherweise nicht mehr in der Lage den Fehler durch Verschmieden zu beseitigen (Bild 15.1-37). Typische Fehlstellen und Besonderheiten die sich im Schmiedeteil auswirken können sind Lunker (Bild 15.2-24), Gasporen, Seigerungen und Gefügebesonderheiten wie Stengelkristalle. Dabei spielt der örtliche Verschmiedungsgrad eine wichtige Rolle (Bild 15.1-14)

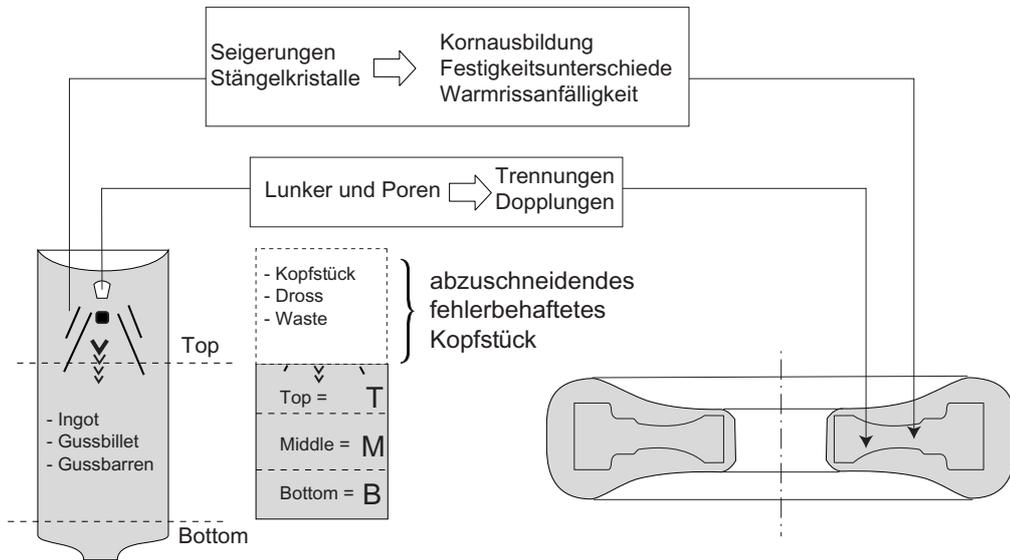
Im Rahmen unten ist schematisch die Entstehung von **Seigerungen** (engl. Segregation) beim **VAR-Prozess** (engl. Vacuum Arc Remelting, Bild 15.1-12) dargestellt.

Ein zweiter häufiger Erschmelzungsprozess ist der sog. **ESR-Prozess** (nicht dargestellt). Hier befindet sich der Lichtbogen in einer flüssigen Schlackeschicht die auf dem Bad schwimmt. Fehler bei der Erschmelzung (Lit. 15.1-4, Lit 15.1-12 und Lit. 15.1-13, Bild 15.1-12) bilden sich in beiden Schmelzprozessen im (Guss-) **Barren** (engl. **Ingot**) bzw. in den umgeschmolzenen Blöcken (engl. **Casting Billets oder Billets**). Aus diesen entstehen später Schmiedestangen (engl. Forging Billets) und daraus das umgeschmiedete Halbzeug (engl. Pancakes, Bild 15.3-11).

In hochlegierten Stählen (z.B. A286) und Superlegierungen (z.B. Waspaloy, IN718) stehen Fehler, die auf den Schmelzprozess zurückzuführen sind, im Zusammenhang mit **Seigerungen**, d.h. **Zonen verarmter oder angereicherter Legierungsbestandteile** (Bild 15.1-12). **Besonders festigkeitsmindernd und deshalb gefährlich sind Seigerungen aus Oxiden, Carbiden, Nitriden und Carbonitriden.** Schmiedestücke aus **Titan** kennen im Herstellungsprozess ähnliche Schritte. Die poten-

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

Auswirkungen von Fehlstellen und Besonderheiten im Gussbarren (Ingot) können auch später in Schmiedeteilen gefunden werden.



Bereits bei der Erschmelzung des später zu schmiedenden Gussmaterials entstehen die verunreinigungsbedingten Seigerungen der Schmiedeteile.

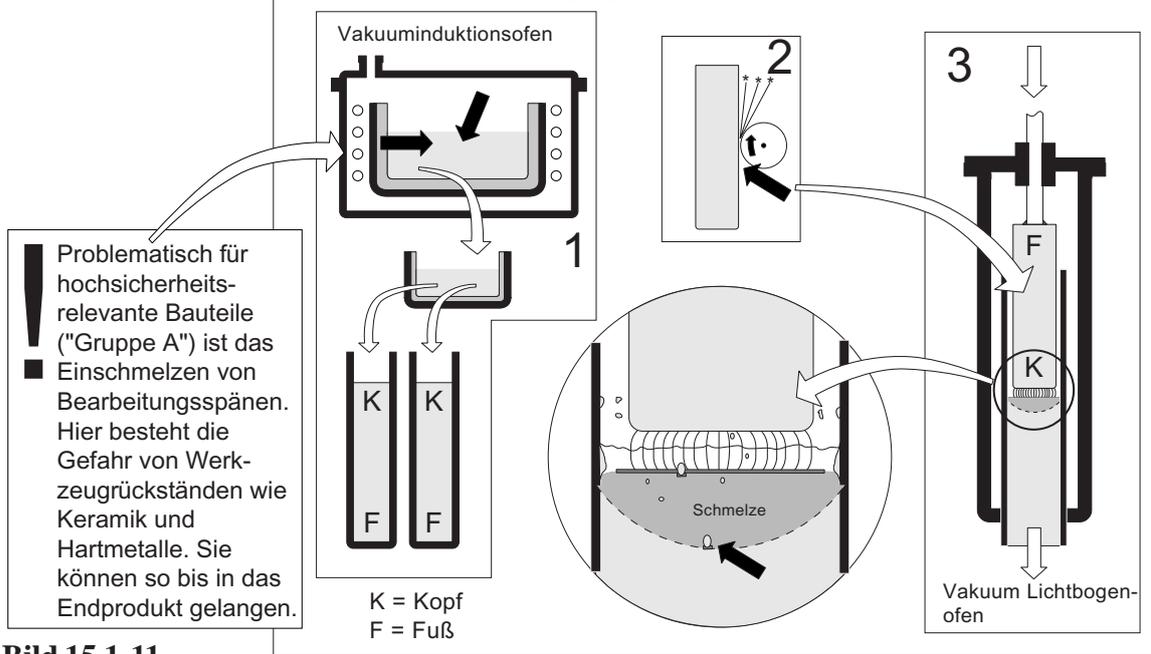


Bild 15.1-11

ziellen Verunreinigungen und Probleme unterscheiden sich jedoch von den hier beschriebenen und werden im Rahmen von dokumentierten Schadensfällen gesondert behandelt (Bild 15.2-13 bis Bild 15.2-20). Im Vakuuminduktionsofen („1“) erfolgt die Erschmelzung der

Legierung aus dem Vormaterial. Bereits die Qualität bzw. Herkunft dieses Vormaterials kann eine Auswirkung auf das spätere Schmiedeteil haben. Handelt es sich z.B. um wiederverwendetes Material (Recycling) aus einer Zerspanung, können sich nicht voll auf-

geschmolzene Verunreinigungen aus **Bruchstücken von Hartmetallschneiden** der Werkzeuge später im Gussteil wiederfinden. Dies gilt auch für Oxide aus dem Vormaterial, Verunreinigungen wie Strahlgutresten oder von Keramikformen. Aus dem Induktionsofen werden Stangen in Kokillen gegossen. Deren Kopf („K“) bzw Fußlage („F“) ist für die **Lage möglicher Fehler in den späteren Schmiedeteilen** von Bedeutung (Bild 15.1-13). Sie wird deshalb für eine vorgeschriebene Zeitspanne **nachvollziehbar dokumentiert**. Um möglichst wenig Verunreinigungen in den folgenden Umschmelzprozess einzubringen werden Oxide und eventuelle Kokillenrückstände **abgeschliffen** („2“). Auch hier besteht die potenzielle Gefahr, dass in der Oberfläche der Abschmelzelektrode Steckendes von der Schleifscheibe als Seigerungsbestandteil im Halbzeug auftritt. Beim folgenden Lichtbogen-Umschmelzprozess („3“) in Argon oder Vakuum wird die umgedrehte Stange (Kopf zuerst) abgeschmolzen (Bild 15.2-17). Sie tropft in die darunter liegende gekühlte Form, in der sich die umgeschmolzene Stange aufbaut. Dieser **Umschmelzprozess kann mehrmals** erfolgen, wobei davon ausgegangen wird, dass mit der Zahl der Umschmelzungen das Risiko von Seigerungen abnimmt. Dies ist deshalb für das Halbzeug von geschmiedeten Rotorkomponenten (bis zu 3 mal) ein **wichtiges Qualitätskriterium** und in Spezifikationen festgeschrieben. Sollen **abweichend erschmolzene Schmiederohteile** zur Anwendung kommen, ist gegebenenfalls eine sehr aufwändige **erneute Zulassung** mit umfangreichen zyklischen Schleuderprüfungen erforderlich.

Von besonderem Interesse für die Entstehung gefährlicher Seigerungen ist der **Bereich des Lichtbogens mit der abtropfenden oberen Elektrode und dem Schmelzbad auf der unteren Elektrode**. Auf diesem Schmelzbad sammeln sich und schwimmen leichte, nicht aufgeschmolzene Verunreinigungen. Besondere Abläufe können dazu führen, dass Verunreinigungen von der umgeschmolzenen Stange auf-

genommen werden. Auf diese Vorgänge wird in Bild 15.1-12 näher eingegangen.

Nach dem Umschmelzvorgang, **ist im zuletzt erstarrten Kopfbereich mit schädlichen Merkmalen** zu rechnen. Typisch ist ein großer zentraler Lunker, eine besondere Anordnung der Seigerungen von Legierungsbestandteilen und Konzentrationen von Verunreinigungen (Bild 15.3-11). **Für die Qualität der späteren Schmiedestücke ist entscheidend, dass vorher ein ausreichend großes Kopfstück abgetrennt wird** das nicht zur Verschmiedung kommt. Verständlicherweise beeinflusst dies die Kosten. Deshalb wird nach Möglichkeit kein unnötig großes Stück abgetrennt. Erfahrungsgemäß kommt es immer wieder vor, dass sich Fehler aus dem kopfnahen Stück in Fertigteilen finden (Bild 15.2-22). In einem solchen Fall muss auf die vorgeschriebene Dokumentation der Umschmelzung zurückgegriffen werden. So besteht die Chance, **weitere, „unter“ dem Schadensteil liegende Teile zu identifizieren**

**Bild 15.1-12 (Lit 15.1-4 und Lit 15.1-14): Erklärung des Schmelzprozesses:** Die zwei häufigsten Erschmelzungsprozesse sind der sog. VAR-Prozess (engl. Vacuum Arc Remelting) und der ESR-Prozess (engl. Electro Slag Remelting). Beide Prozesse bedienen sich eines Lichtbogens zum Umschmelzen. Der Unterschied liegt jedoch in der Umgebung des Lichtbogens. Im VAR- Fall handelt es sich um ein Vakuum, bei ESR um ein auf der Schmelze schwimmendes Schlackebad. Zum Verständnis der Fehlerarten und deren Entstehung beim Umschmelzprozess wird im Folgenden der VAR-Prozess genauer betrachtet. Diese Fehler können sich später auch im Schmiedeteil wieder finden. In der unteren Skizze ist der Querschnitt durch den Bereich des Schmelzvorgangs schematisch dargestellt. Zwischen der abschmelzenden Elektrode oben und dem beim Erstarren aufwachsenden Gussbarren (Ingots) unten „brennt“ der die Schmelzenergie einbringende

Fortsetzung Seite 15.1-30

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

Die Interpretation weißer Flecken ("White Spots") an geätzten Bauteilen aus Ni-Schmiedelegerungen ist eine "Wissenschaft". Nicht alle weißen Flecken sind nachteilig für die LCF-Festigkeit.

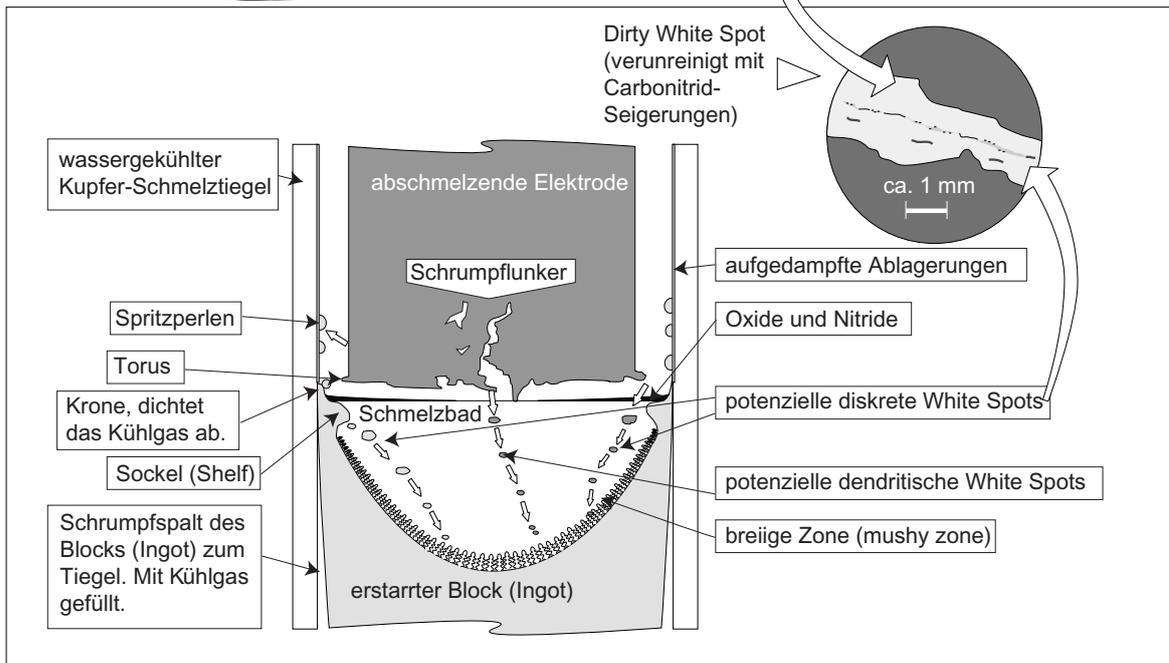
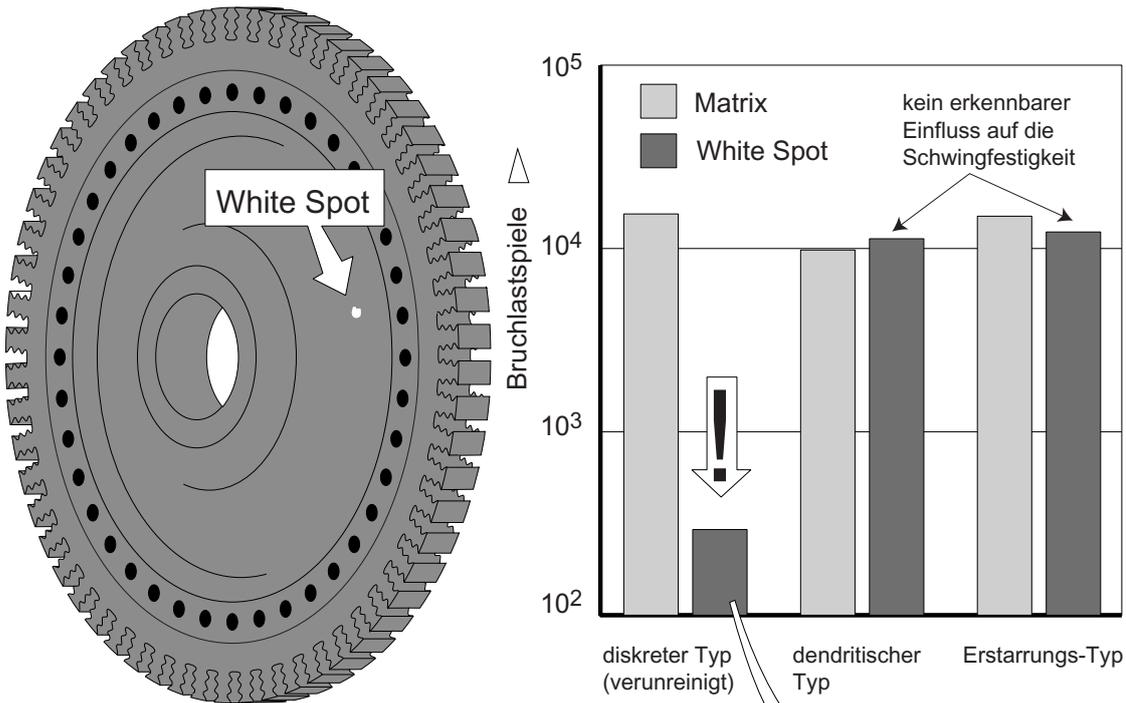


Bild 15.1-12

Fortsetzung von Seite 15.1-28

*Lichtbogen in einem Vakuum. Auf dem Schmelzbad schwimmen abgeschiedene nichtmetallische Verunreinigungen wie Oxide, Nitride und Karbide. Spritzer aus dem Bad können an der gekühlten Kokillenwand festkleben und sich wieder lösen. Die obere Elektrode bildet einen gratähnlichen Rand, den sog. Torus der abbrechen und in das Bad fallen kann. Der Barren weist um den Schmelzbadspiegel eine sog. Krone (engl. Crown) auf. Diese liegt wegen seiner hohen Temperatur bzw. Wärme- dehnung an der kalten Kokille an. So dichtet er den sich infolge der Schrumpfung bildenden Spalt darunter zum Vakuum ab. Dieser Spalt wird zur Verbesserung des Wärmeübergangs bzw. zur Steuerung der Blocktemperatur und damit der Schmelzbadgröße und -form mit einem Edelgas wie Helium oder Argon gefüllt (Bild 15.3-8). Unterhalb der Krone liegt ein an der kalten Kokille erstarrter Ring, der sog. Sockel (engl. Shelf). Krone und Sockel können Anreicherungen oder Verarmungen an Legierungsbestandteilen aufweisen und so einen höheren Schmelzpunkt als die Temperatur der Schmelze haben. Sowohl von der Krone als auch vom Sockel können sich Stücke ablösen und in die Schmelze fallen. Solche Partikel sind beim Erreichen der breiigen Erstarrungszone (engl. „Mushy Zone“) am Badboden, die Ursache für eine besondere Fehlerart (Bild 15.3-10). Die Schmelzbadgeometrie ist von großer Bedeutung für Art und Wahrscheinlichkeit potenzieller Fehler (Bild 15.3-10). In der breiigen Zone besteht eine ausgeprägte Dendritenbildung welche bestimmte örtliche Legierungsungleichmäßigkeiten (Seigerungen) begünstigt.*

**Fehler und deren Entstehung:** Entsteht am Fehler im Schmiedeteil ein detektierbares Ultraschallsignal, handelt es sich gewöhnlich um gefährliche Trennungen und/oder Ansammlungen von nichtmetallischen Partikeln (Seigerungen). In diesen Fällen spricht man von „**Sonic Defects**“.

*Seigerungen können als Sonic Defects und/oder als Gefügeveränderungen auftreten. Sie sind auf geätzten Oberflächen bzw. Trennflächen von Schmiedeteilen aus Ni-Legierungen (z.B. IN718 und Waspalloy) und hochlegierten Stählen visuell durch farbliche und strukturelle Veränderungen erkennbar (Bild 15.2-22 und Bild 15.2-23). Bei Seigerungen in Form von*

- Mikroseigerungen (engl. Microsegregations)
- Makroseigerungen (engl. Macrosegregations) insbesondere Anreicherungen an Nb- und Lavesphase (engl. „Freckles“, siehe auch Bild 15.2-21).
- Ringförmige Strukturen (engl. „Tree Rings“, Bild 15.1-15).

*Tree Rings haben offenbar nur einen geringen Einfluss auf die Betriebseigenschaften des Fertigteils. Abhängig von der Auslegung sind sie als Schwachstellen tolerierbar.*

*Eine besonders häufige Erscheinung sind sog. „Weiße Flecken“ (engl. „White Spots“) die ihren Namen einer schlechten Anätzbarkeit verdanken. Die Interpretation dieser Ätzbefunde auf die Art der Seigerung und ihre Auswirkung auf die Integrität des Bauteils ist selbst für einen Fachmann schwierig. Ein White Spot bedeutet anscheinend nicht immer eine unzulässige Beeinflussung der Schwingfestigkeit (Schaubild oben rechts). Solche Anzeigen können, wenn es die Spezifikationsangaben ermöglichen, akzeptiert werden. Weil es sich meist um äußerst teure Bauteile (Rotorteile, Skizze oben links) im Wert eines oder mehrerer Mittelklasse-PKW handelt, ist eine unnötige Aussonderung kostenintensiv. Das erschwert im Zweifelsfall Entscheidungen.*

*Seigerungen vom „diskreten Typ“ erscheinen gewöhnlich als ein heller, mehrere Millimeter großer, klar umrissener Fleck. Solche Fehler befinden sich gewöhnlich in einem zentrischen Kreisquerschnitt mit etwa dem halben Durchmesser der Stange (Billets). Die Korngröße in diesem Bereich entspricht der des umgebenden*

Werkstoffs. Die **Härte fällt meist zur Mitte des White Spots ab**. Bei **White Spots ohne Partikelverunreinigungen** beobachtet man neben einer Verarmung an Kohlenstoff in Verbindung mit einer geringen Dichte an Karbiden eine leichte Verarmung an Legierungsbestandteilen wie Nb, Ti und Al. Oft gilt das auch für den Mo-Gehalt. **Die Gefährlichkeit solcher White Spots entspricht einem potenziellen Festigkeitsabfall von ca. 20 %**.

Andere White-Spot-Typen ohne Verunreinigungen wie die besonders häufigen **Erstarrungs-White-Spots** (engl. **Solidification W.S.**) oder **dendritische White Spots** (engl. **Dendritic W.S.**) zeigen auch bei typischen Betriebstemperaturen **keinen bedenklichen Abfall der statischen und LCF-Festigkeit und der Duktilität**. Dendritische White Spots treten nah am Mittelpunkt des Billets auf (Bild 15.3-10).

Den Erstarrungs-White-Spots werden, was die Entstehung und eine vernachlässigbare Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften anbetrifft, auch sog. **„Baumringstrukturen“** zugerechnet (Bild 15.1-15).

**Deutlich gefährlicher sind verschmutzungsbedingte Seigerungen, sog. „Dirty White Spots“ vom diskreten und dendritischen Typ**. Sie enthalten **Anreicherungen von Oxiden, Karbiden und Nitriden** (Bild 15.2-11 und Bild 15.2-23). Bei einer ausreichend großen Fehlstelle ist auch mit einem **Riss** zu rechnen, der im Schmiedeteil mit einer optimierten Ultraschallprüfung auffindbar sein sollte. **Auch rissfreie verunreinigte Fehlstellen zeigen einen bedeutenden Abfall der LCF-Lebensdauer**. Im Gegensatz dazu hat man in den bereits behandelten Erstarrungs-White-Spots bisher offenbar keine gefährlichen Anreicherungen von Verunreinigungen gefunden.

### **Entstehungsmechanismen von „White Spots“:**

In das turbulente Schmelzbad fällt Material aus Sockel (engl. Shelf), Krone (engl. Crown) und

Torus (Umfangsgrat an der abschmelzenden Elektrode, Skizze des Badbereichs unten) während des Umschmelzvorgangs.

Verarmte Partikel haben eine angehobene Schmelztemperatur und höhere Dichte als das Schmelzbad. Weil sie schneller absinken, **können sie die Erstarrungsfront unter dem Schmelzbad erreichen und dort anbinden** ohne selbst zu schmelzen. Das gleiche gilt für Verunreinigungen aus Nitriden und Oxiden die sich in Krone und Sockel angereichert haben. **Ein tieferes Schmelzbad vermindert die Wahrscheinlichkeit** derartiger Fehler. Dies zeigt die **Bedeutung einer exakten Einhaltung optimierter und vorgeschriebener Prozessparameter** (Bild 15.3-13).

**Dendritische White Spots** entstehen wahrscheinlich durch **Elektrodenmaterial das in die Schmelze fällt**. Dies kann eine Folge des Abschmelzens im Bereich des **Zentrallunkers** der abschmelzenden (oberen) Elektrode sein. Ein **instabiler Lichtbogen** scheint die Häufigkeit dieses Seigerungstyps zu erhöhen. Es ist also zu empfehlen, bei unzulässigen derartigen Fehlern, die **Protokolle der Erschmelzung auf solche Hinweise genau zu überprüfen** (Bild 15.3-8).

**Erstarrungs-White-Spots** treten nur in einer Kreisfläche zwischen Billetoberfläche und halbem Billedurchmesser auf (Bild 15.3-10). Sie benötigen ein **sehr flaches Schmelzbad**. Man nimmt an, dass ihre Entstehung im Zusammenhang mit einer Veränderung der Erstarrungsgeschwindigkeit steht. Langsame Erstarrungsraten begünstigen die Vergrößerung der Dendriten was in den Zwischenräumen für eine leichte Verarmung von Legierungsbestandteilen sorgt.

**Merksatz:** Beim Auftreten bedenklicher Seigerungen in Schmiedeteilen ist für die betroffene Charge der gesamte Erschmelzungsablauf mit den Prozessparametern auf ungewöhnliche Vorkommnisse hin zu überprüfen (siehe Kapitel 15.3).

**Bild 15.1-13:** Bis zum Halbzeug durchläuft ein Schmiedeteil mehrere Prozessschritte bei denen spezifische Fehler und Schwachstellen entstehen können. Die Probleme des Erschmelzens werden in Bild 15.1-11 und Bild 15.1-12 behandelt. In erster Linie sind es

- Seigerungen („1-A“),
- Anreicherungen oder Verarmung von Legierungsbestandteilen
- Ansammlungen von nichtmetallischen Partikeln wie Oxiden, Karbiden und Nitriden.

Die gefährlichen Seigerungen entstehen am Kopf des Billets und gelangen in das Halbzeug wenn ein zu kurzes Kopfstück abgetrennt wurde (Beispiel 15.1-1, Bild 15.2-19, - 21, - 22 ). Diese **Seigerungen** können den Schmiede- und Warmbehandlungsprozess durch ihre Neigung zur Rissbildung (z.B. Warm-/Heißrisse, Bild 15.1-8) beeinflussen.

Das **Umformen** der aus dem „**Ingot**“ (Gussbarren) entnommenen „**Billets**“ (Bild 15.2-19 und Bild 15.3-11) kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Typische Verfahren sind **Freiform- und Gesenkschmieden** (Bild 15.1-14) sowie Walzen, Strangpressen (engl. **extruded**, Lit. 15.1-11) und Kriechumformen. Die Umformung bringt in das Material über innere Reibung Wärme ein. So können sich besonders stark umgeformte Zonen bis zur **Erweichung der Korngrenzen aufheizen und Heißrisse entstehen** („2-C“, Bild 15.2-11). Eine weitere Verformung kann solche Risse wieder schließen, wenn kein Luftsauerstoff Zutritt hatte. Konnte eine Oxidschicht entstehen, z.B. bei außen liegenden Rissen, besteht die Gefahr, dass sie zwar zusammengedrückt werden, aber nicht ausheilen. Sie gelangen so als Fehlstelle in das Halbzeug. Ein weiteres Problem ist eine **örtlich unzureichende Verformung des**

**Schmiedeteils** (zu geringer Verformungsgrad, „2-A,B“, Bild 15.1-14). Das kann zu unvorschriftsmäßigem Gefüge führen. Solche Schwach- und Fehlstellen können sich in **Korngröße, Korngrenzenorientierung und unzerkleinerten gussbedingten Fehlstellen** zeigen. Beim Schmieden, insbesondere bei Verfahren die eine Kaltumformung einschließen, können hohe **Eigenspannungen** induziert werden. Um ein optimales Gefüge aus dem Schmiedeprozess zu erhalten ist eine Wärmebehandlung nur eingeschränkt möglich. Gefährliche Eigenspannungen können im Halbzeug verbleiben („2-D“, Bild 15.2-19).

**Wärmebehandlungen** können sowohl beim Schmiedeprozess zur Verbesserung der Umformbarkeit, als auch nach dem Schmieden zur Erzeugung optimaler Gefüge bzw. Festigkeitseigenschaften und der Minimierung unerwünschter Eigenspannungen (Bild 16.2.2.4-14, Bild 16.2.2.4-15 und Band 3, Bild 12.6.1-16), erfolgen. Dicke Querschnitte und eine relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit der Titan- und Nickellegierungen erschweren den in allen Zonen des Halbzeugs gewünschten Zeit-Temperaturverlauf. Das kann sich örtlich ungünstig auf das Gefüge auswirken („3-A,B“, Bild 15.2-12). Treten bei der Wärmebehandlung auf Grund großer Temperaturgradienten hohe Zugeigenspannungen auf, können Warmrisse oder Zeitstandrisse ausgelöst werden („2-C“). Rissauslösend wirken schroffe Querschnittsübergänge, z.B. wenn das Schmiedeteil vor der Wärmebehandlung überdreht wurde („3-C“, Bild 15.2-13). Eine ungünstige Wärmebehandlung kann selbst auch neue gefährliche Eigenspannungen induzieren („3-D“).

# Die Entstehung von Fehlern im Schmiedeprozess des Halbzeugs.

## Prozessschritte

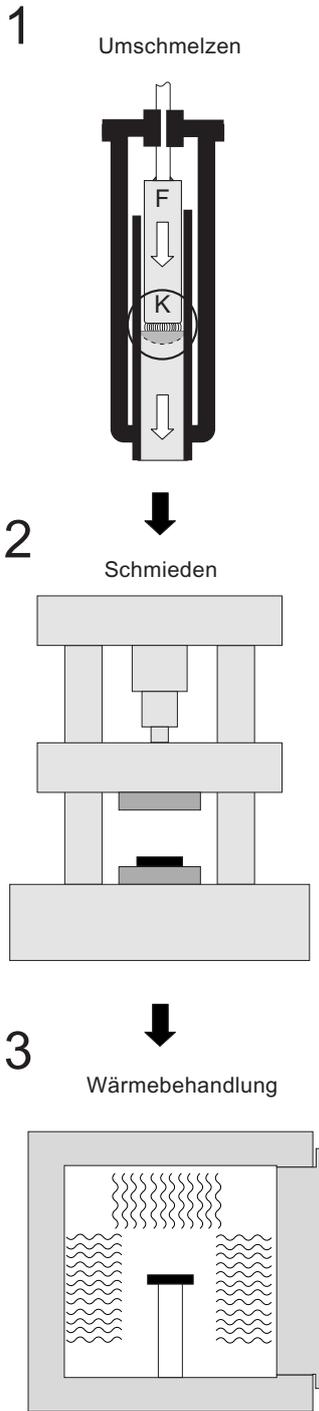
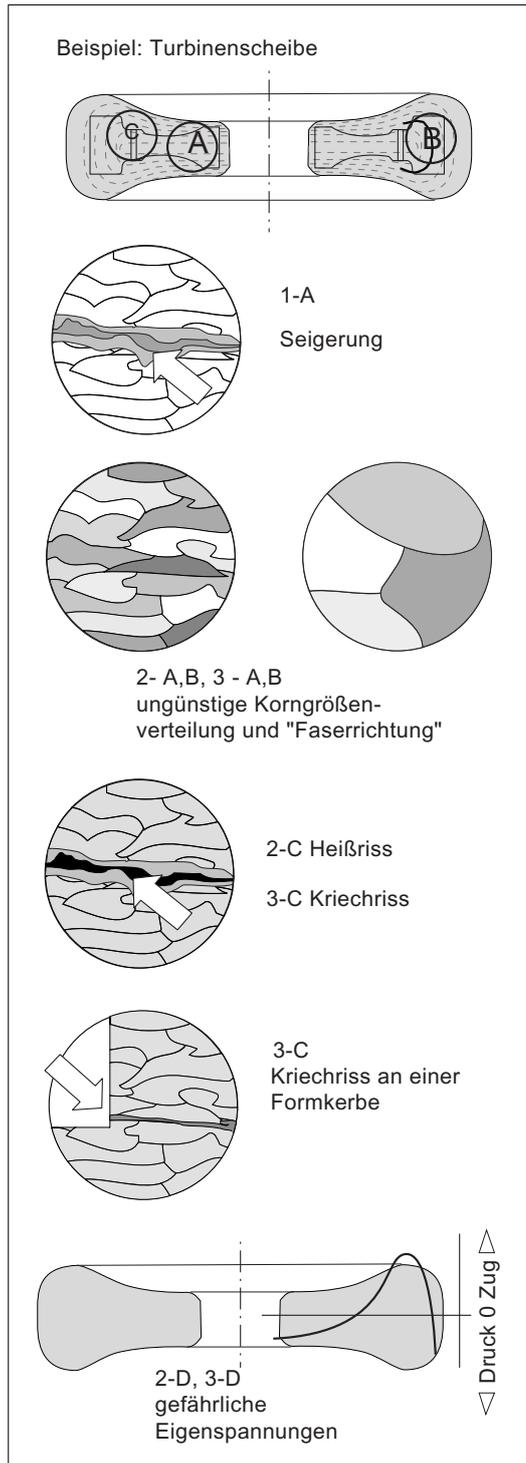


Bild 15.1-13

## Fehler im Fertigteil



Dimension bzw. Querschnitte des Bauteils beeinflussen beim Schmiedeprozess die später im Bauteil erreichbaren Werkstoffeigenschaften.

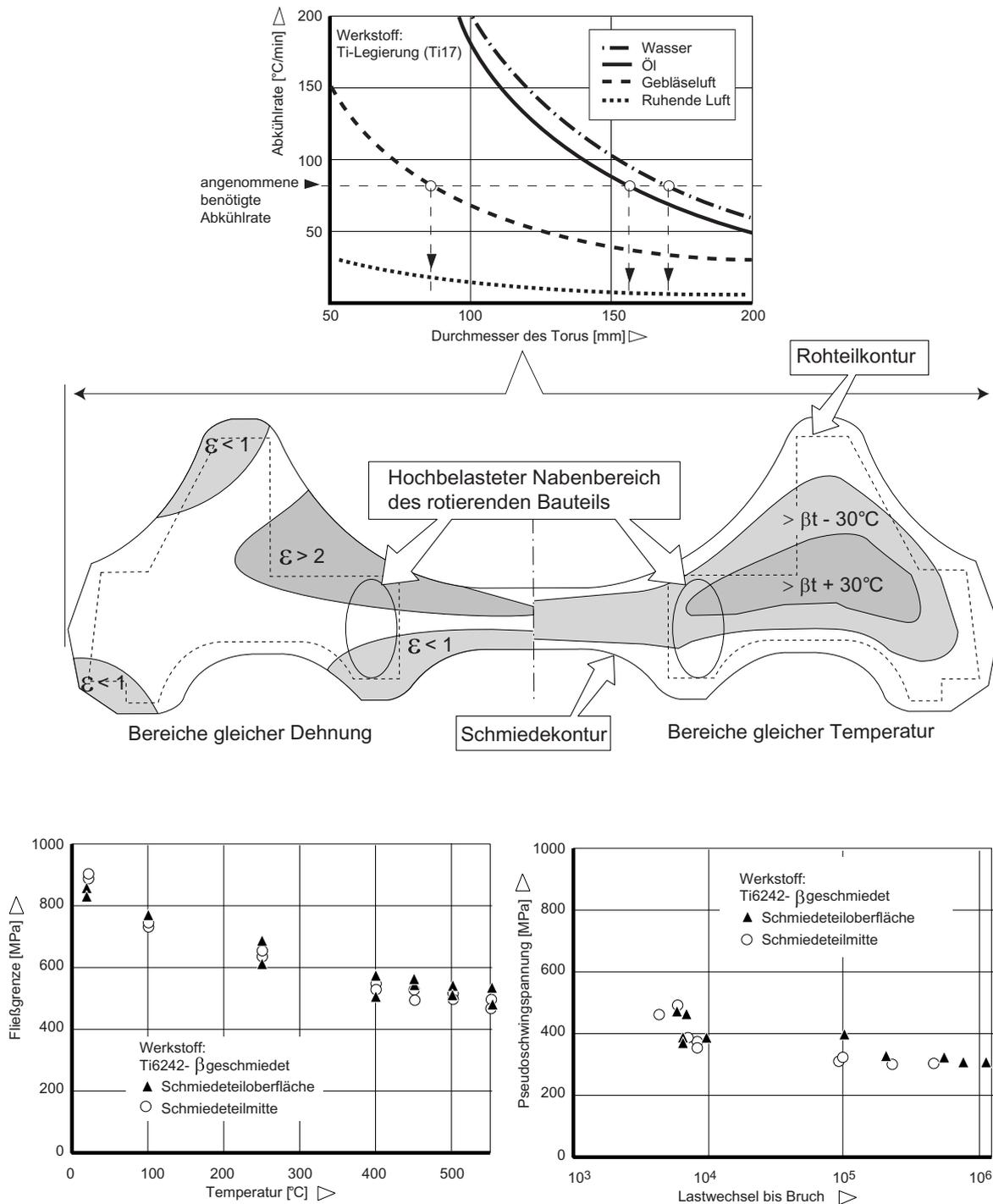


Bild 15.1-14

**Bild 15.1-14 (Lit 15.1-16):** Ein **optimales Gefüge** in Ti- und Superlegierungen erfordert eine geeignete **Wärmebehandlung** während und/oder nach dem Umformprozess. Insbesondere die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Titanlegierungen begrenzt wegen der erforderlichen **Abkühlgeschwindigkeit** die Bauteilquerschnitte. Das Diagramm oben zeigt die Abkühlrate in Abhängigkeit vom Durchmesser eines typischen, torusförmigen Scheibenrohlings (mittlere Skizze). Bei größeren Querschnitten kann eine Abkühlung in Öl oder Wasser notwendig werden. Intensive Wärmeabfuhr kann zu großen Wärmespannungen führen. Dies begünstigt hohe Eigenspannungen und Rissbildung. Die Eigenspannungen können sich den Betriebsspannungen gefährlich überlagern (Band 3, Bild 12.6.1-16).

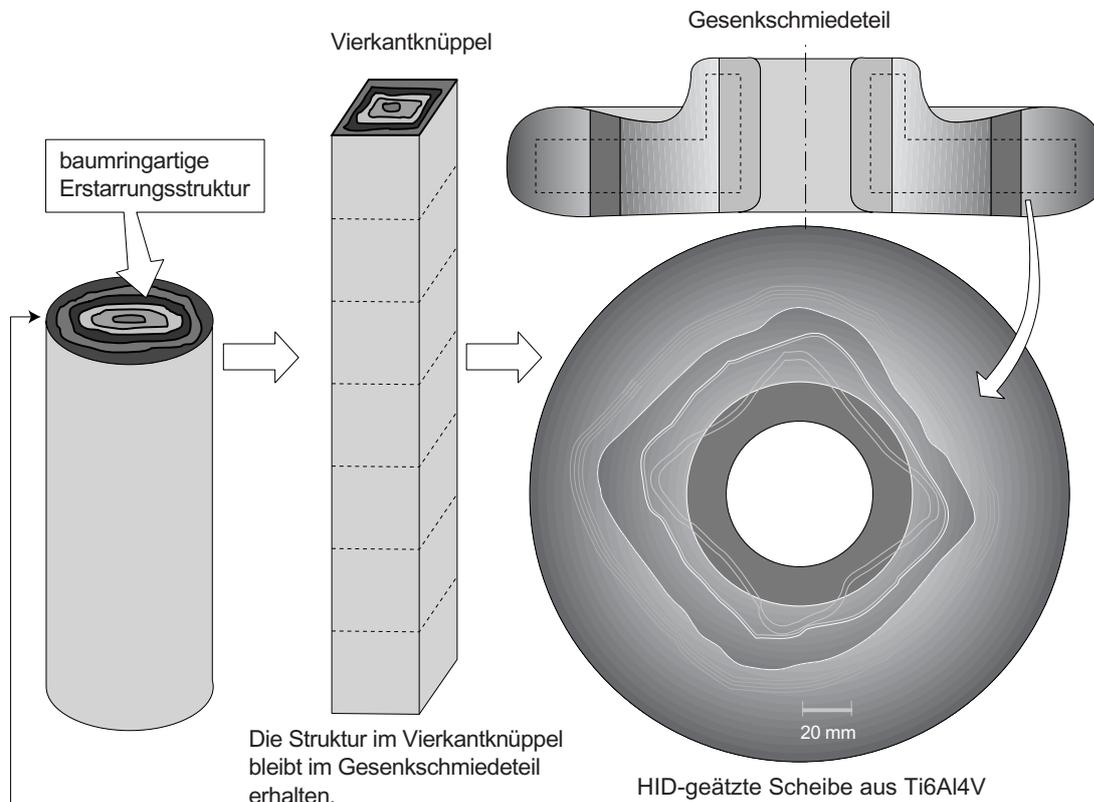
Im dargestellten Fall sind auf der linken Seite zwei für die **Gefügeausbildung** wichtige Temperaturbereiche gekennzeichnet. Sie sind für den Übergang zum  $\beta$ -Gefüge einer Titanlegierung am Ende des Schmiedeprozesses notwendig. Die dargestellte Temperaturverteilung lässt sich mit Hilfe eines **thermomechanischen Modells** rechnerisch ermitteln (Bild 15.3-13). Man erkennt, dass sich im Inneren des Querschnitts ein Temperaturbereich von 60°C um den  $\beta$ -Übergang einhalten lässt. Auf der rechten Seite sind Zonen gleicher plastischer Verformung eingezeichnet.

Natürlich werden oberflächennahe Zonen (**Schmiedekontur**) auf Grund der Kontaktbedingungen mit dem Schmiedewerkzeug (Reibung, Wärmeübergang) besonders beeinflusst. Erwünscht ist in lebensdauerbestimmenden Bauteilzonen eine ausreichende Umformung, ohne dass bereits **Rekristallisation** einsetzt. So lässt sich hohe Festigkeit bei guter Zähigkeit erzielen.

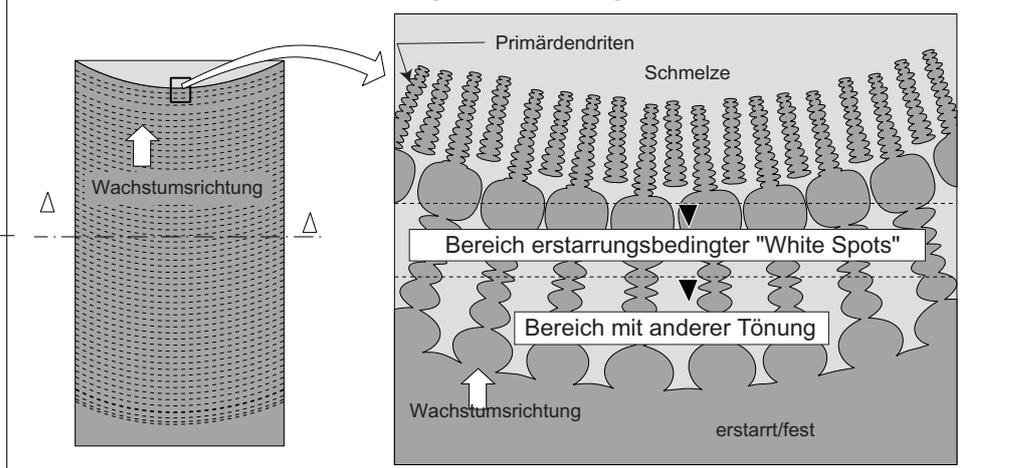
Betrachtet man die Rohteilkontur (gestrichelte Linie) ist zu erwarten, dass eine günstige Temperatur und Verformung beim Schmieden realisiert wird und sich z.B. im besonders hoch belasteten Nabenbereich des Bauteils nutzen lassen.

Die Diagramme unten zeigen für eine Titanlegierung links den lageabhängigen Einfluss des Schmiedeprozesses auf die temperaturabhängige **Fließgrenze** und rechts auf die **LCF-Festigkeit**. Die dargestellten Werte wurden an Proben aus Bauteilen ermittelt. Man erkennt in beiden Fällen die Tendenz (geschätzt mit ca. 10% Genauigkeit) zu schlechteren Werten im Inneren im Vergleich zu den oberflächennahen Bereichen. Dies entspricht in günstiger Weise der zu erwartenden Betriebsbelastung (hohe Nabenbelastung) eines rotierenden Bauteils.

Nicht alles was schlimm aussieht hat auch einen solchen Einfluss auf das Betriebsverhalten eines Bauteils.



Plausibles Modell zur Entstehung der "Baumringe"



**Bild 15.1-15**

**Bild 15.1-15** (Lit. 15.1-4): Diese ringförmigen Strukturen werden als „Baumringe“ (engl. „**Tree Rings**“) bezeichnet. Sie entstehen beim Umschmelzvorgang und zeichnen sich auch im Schmiedeteil ab. Die konzentrischen Ringe bil-

den in einem Querschnitt das Profil des Schmelzbads ab. Sie werden mit periodischen Unregelmäßigkeiten in der Erstarrungsgeschwindigkeit erklärt. (Rahmen unten). Dabei ändern sich der Dendritenabstand und

die Verteilung von Legierungsbestandteilen im Mikrobereich. Diese leichten Unterschiede in der Anätzbarkeit (**vergleichbar „solidification white spots“**, Bild 15.1-12) zeichnen sich in einem Querschnitt als Ringstruktur ab. Auch ein Einfluss von Drehfeldern bei der Erschmelzung ist offenbar nicht auszuschließen. Gefährliche Seigerungen bzw. Ansammlungen von Partikeln werden von den Baumringen nicht begünstigt. Es handelt sich wie die „solidification white spots“ um Gefügestrukturen welche die Festigkeitseigenschaften des Werkstoffs offenbar nur geringfügig beeinflussen.

**Bild 15.1-16:** Steigende Leistungskonzentration und Wirkungsgrade moderner Triebwerke führen zu höheren Belastungen der Bauteile. Damit werden tolerierbare **Schwachstellen** (kein unzulässiges zyklisches Risswachstum) immer kleiner. Seriengerechte zerstörungsfreie Prüfverfahren (in erster Linie Ultraschallprüfung) sind bereits an ihren Grenzen angelangt (Bild 17.3.1-2 und Bild 17.3.1-3). Die konventionelle Route der Halbzeugherstellung mit Gießen und Schmieden ist links dargestellt. Um potenzielle Fehler im Kopfstück des Billets auszuschließen, muss ein relativ großes Stück abgetrennt werden, das die Rohteilkosten merklich beeinflusst (Bild 15.3-11). Eine zusätzliche Sicherheit wird vom Umformprozess beim Schmieden erwartet. Etwaige **Fehler und Schwachstellen** (Einzelheit „A“) können so **zerkleinert** (spröde Partikel) und/oder parallel zur Hauptbeanspruchung ausgerichtet werden (Einzelheit „B“). Dieser Sicherheitsaspekt ist gegenüber Verfahren ohne gezielte Umformung durchaus beachtenswert. Der relativ

grobkonturierte Schmiederohling muss bei der Fertigteilherstellung mit beträchtlichem Aufwand zu einem großen Teil zerspannt werden (bis zu 95 % des Billets).

Deshalb wird versucht, bereits bei der Rohteilherstellung durch geeignete Verfahren die maximale Fehlergröße in einem konturnahen Fertigteil sicher zu begrenzen.

Ein **pulvermetallurgischer Prozess** (engl. Powder Metallurgy, PM) nach dem „as HIP“-Verfahren lässt nun eine Verbesserung der Sicherheit durch Begrenzung der Fehlergröße bei niedrigen Kosten erwarten (rechte Folge). Beim „as HIP-Prozess“ handelt es sich um eine PM-Technologie ohne Nachschmieden. Die evakuierte, zum Fertigteil möglichst konturnaher Blechkapsel wird zur Begrenzung der potenziellen Fehlergröße, mit gesiebtmetallpulver der gewünschten Legierung gefüllt. Diese Kapsel wird verschweißt und in einem Autoklaven unter hohen Gasdrücken ( $10^3$  bar) und hohen Temperaturen (um  $1000^\circ\text{C}$ ) komprimiert. Das Pulver sintert dabei zu einem dichten feinkörnigen Rohling. Nach einer eventuellen Wärmebehandlung und dem Entfernen der Kapsel steht das Rohteil für eine zerstörungsfreie Prüfung zur Verfügung. Das feine Korn ergibt optimale Bedingungen für die Ultraschallprüfung (Bild 17.3.1-4). Problematisch hat sich an diesem Verfahren gezeigt, dass sich durch Verunreinigungen des Pulvers beim Handling und Füllvorgang gefährliche, deutlich größere Fehler bilden als es die Maschenweite des Siebs zulassen sollte. Aus diesem Grund werden heute PM-Rohnteile nachgeschmiedet (eng. „**HIP and Forge**“) um die Zerkleinerung und günstige Ausrichtung potenzieller Fehler zu nutzen. Erforderlich sind dafür jedoch Rohteile mit größerem Aufmaß was zusätzliche Kosten für den Schmiedeprozess bedeutet. Damit ist ein Kostenvorteil des ohnehin schon recht teuren PM-Teils (Pulverkosten, Kapsel, hochreine Abfüllung, Autoklav) meist mehr als aufgezehrt.

Die Herstellungstechnologie des Rohteils kann in hohem Maße die Sicherheit der Bauteile beeinflussen.

Wichtiger Entstehungsbereich innerer Werkstofffehler

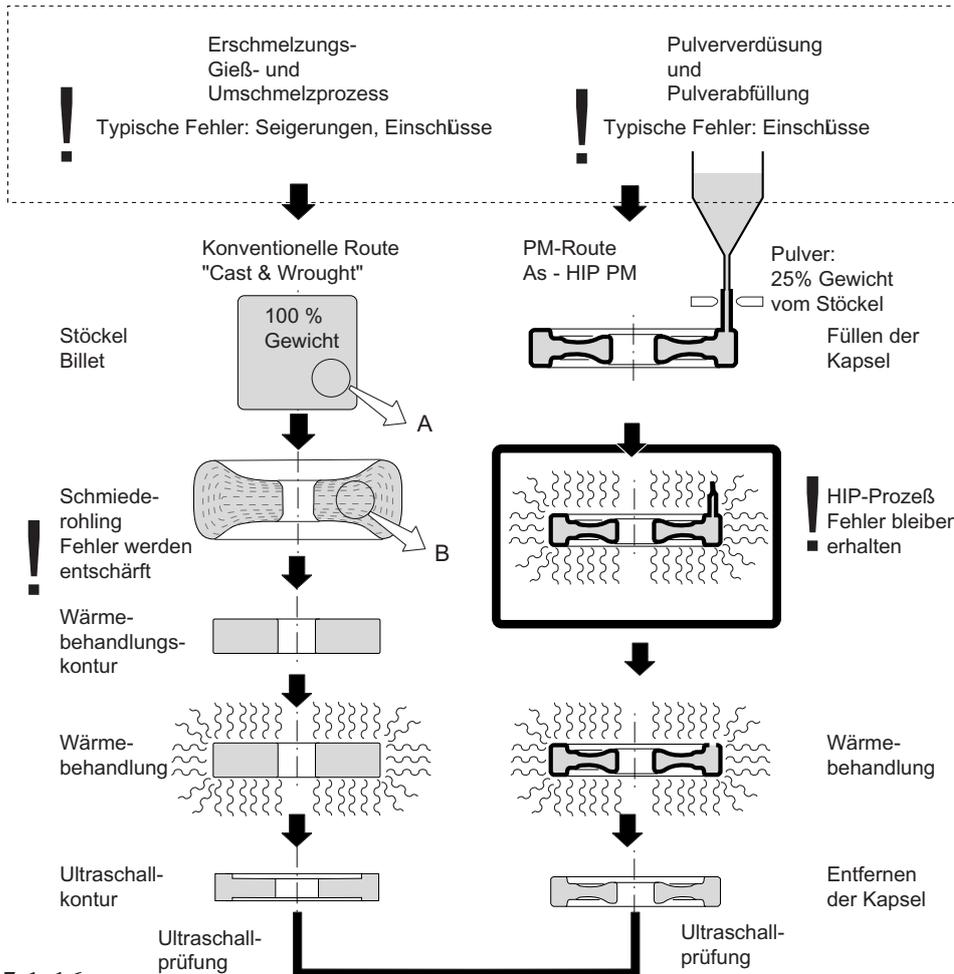
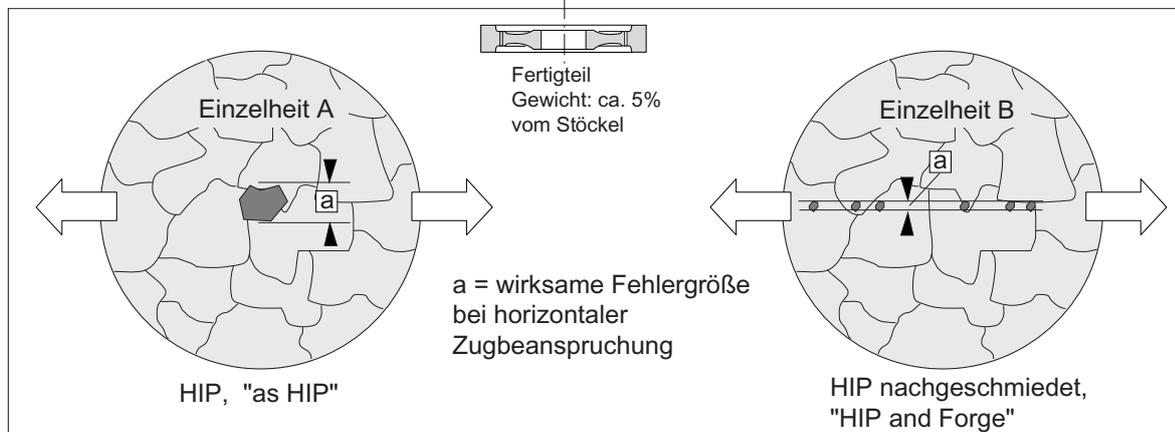
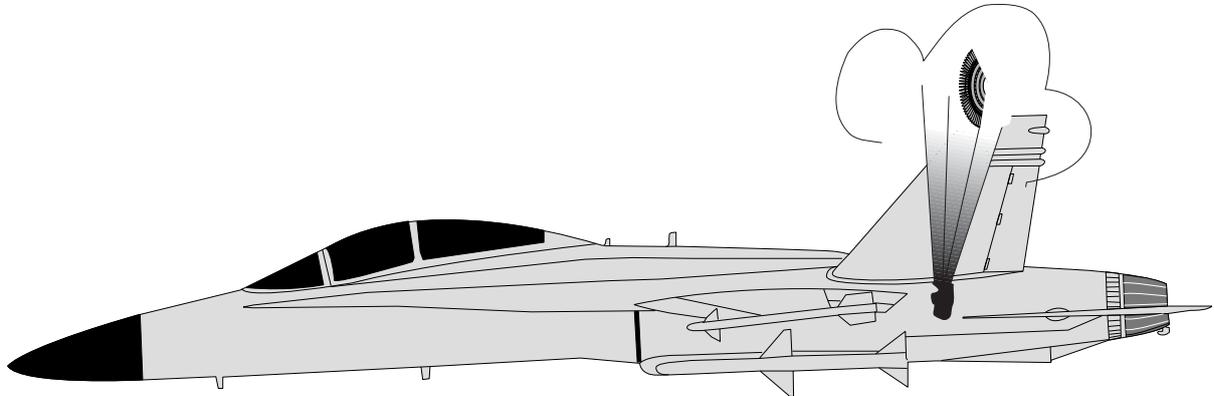


Bild 15.1-16



Bildbeschreibung siehe Seite 15.1-37



### Beispiel 15.1-1:

**Zitat (Lit 15.1-5):** „...After one of its...turbofans suffered a severe surge and turbine failure during climbout, sending pieces of the turbine section into a residential area near the airport...airline officials said yesterday....that the damaged pieces are believed to be from the ‘fourth-stage turbine area’, although the extent of the damage won’t be known until the engine can be inspected...A fatigue crack in the same component led to an uncontained failure and aborted takeoff...prompting the NTSB to call for stepped-up inspections of the fourth-stage low-pressure turbine hub...The investigations focus on the metallurgy of the turbine hub in some older...(engines) and in June NTSB wanted immediate and periodic inspections **of hubs made before 1989 from a single-piece** machined forging of Incoloy 901 alloy.

The hub’s alloy is initially cast as an ingot, and the safety board said that until 1989, cerium and lanthanum were added during the foundry process to deoxidise the alloy. **NTSB linked cerium and lanthanum „inclusions“- areas where the material seeps into otherwise pure casting-**to January engine failure....NTSB noted that dye-**penetrant inspection had failed** to uncover the crack that led to the uncontained failure in January.“

**Zitat (Lit. 15.1-6):** „...The problem is created when the ingot is turned into billets. The cerium and lanthanum rise to the top when the ingot is first cast and waste- which should include those two elements-is lopped of the top. What’s left is then chopped into 20 to 30 forging blanks called mults, and investigators believe that all of the suspect hubs were made from one of the first three mult layers at the top, just below when the waste was removed...NTSB wants to see immediate nondestructive inspections of all ...engines whose components may have been made from one of the top three layers of metal billet...“

**Kommentar:** Dieser Fall steht exemplarisch für viele bekannt gewordene Fälle in unterschiedlichen Triebwerkstypen. Offenbar handelt es sich nur um eine Erschmelzung des Billets ohne mehrmaliges Umschmelzen wie dies heute üblich ist (Bild 15.1-11). Die exakt rückverfolgbare Dokumentation des gesamten Gieß- und Schmiedeprozesses ist von entscheidender Bedeutung für die Eingrenzung suspekter Teile und gezielte Abhilfemaßnahmen. Trotzdem tauchen ähnliche Fehler auch heute noch in Bauteilen im Betrieb auf (Bild 15.2- 21).

**Bild 15.1-17:** Nicht nur das Pulver und der HIP-Prozess, sondern gerade die Herstellung der Kapsel, der Füllvorgang, das Handling und der Transport der Kapseln beeinflusst die Fehlerwahrscheinlichkeit im Fertigteil.

**Die Fehlermöglichkeiten der Arbeitsschritte „A“, „B“, „C“ und „E“ sind in Bild 15.1-18 genauer beschrieben. Deshalb soll hier nur auf „E“ und „F“ näher eingegangen werden.**

**Der Transport und die Lagerung der Aufbewahrungskannen („A“) für das Pulver und/oder gefüllter Kapseln vor dem HIP-Prozess kann zu Seigerungen und ungleichmäßig verteilter Korngröße führen. Entmischungen treten ein, wenn Kapseln oder Kannen in gleichbleibender Lage Vibrationen ausgesetzt sind. Dies kann bei der Lagerung (vibrierender Hallenboden) oder dem Transport (z.B. mit einem Kfz) der Fall sein. Pulverkörner können sich sowohl nach Größe als auch nach eventuellen geringen legierungsbedingten Dichteunterschieden entmischen.**

**Neben der Beeinflussung des Bauteils durch eine unbemerkte Gasaufnahme vor und/oder beim HIP-Prozess (Bild 15.1-18) besteht für das Personal eine besondere Gefahr („F“). Eingeschlossenes Gas das unter hohem Druck steht kann beim Entfernen der Kapsel durch Ätzen oder Zerspanen oder beim Abtrennen des Einfüllstutzens die Kapsel gefährlich aufreißen und/oder Kapselteile abschleudern. Aus diesem Grund wird nach dem erfolgreichen HIP-Prozess zuerst, unter den notwendigen Vorsichtsmaßnahmen, der Einfüllstutzen entfernt.**

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

## Typische Probleme des HIP-Prozesses.

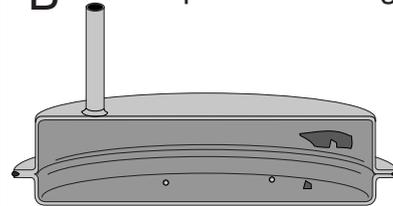
### "A" Pulver:

- Herstellung
- Transport
- Lagerung
- Entnahme

- Pulvergeometrie (spratzig, globular)
- Entmischung
- Oxidation
- Verunreinigungen



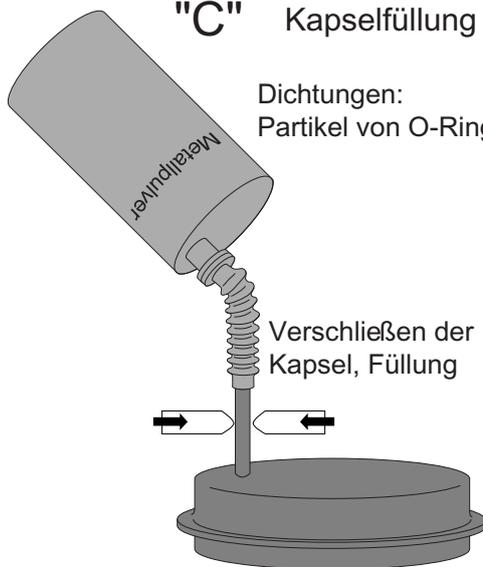
### "B" Kapselherstellung



Verunreinigungen in der Kapsel:  
Zunder, Rost, Schweißperlen  
Bearbeitungsspäne, ungenügende Dichtigkeit.

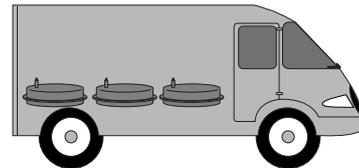
### "C" Kapselfüllung

Dichtungen:  
Partikel von O-Ringen

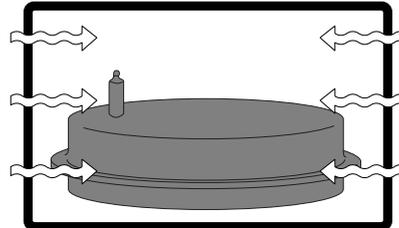


Füllung zu gering, Gasaufnahme,  
Undichtigkeit

Lagerung, Handling, Transport  
der gefüllten Kapsel:  
Entmischung, Undichtigkeit "D"



### HIP-Prozess



Temperatur- und Druckführung  
weichen ab. Undichtigkeit "E"

### "F"

Entfernen der Kapsel: Explosionsgefahr!

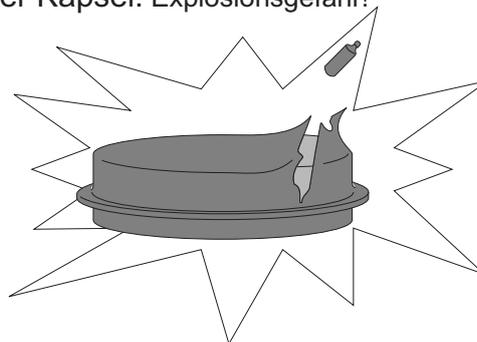
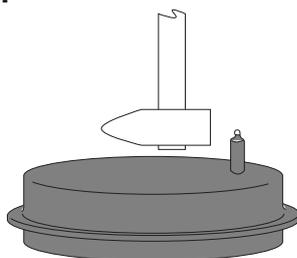


Bild 15.1-17

**Bild 15.1-18:** Auch in Werkstoffen die nach dem „As HIP“-Prozess hergestellt wurden, sind spezifische Fehler zu erwarten (Beispiel 15.2-2 und Bild 15.2-8). Das besondere Problem liegt in **Verunreinigungen des Pulvers**. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durchaus deutlich größere Partikel als es der Maschenweite eines zwischengeschalteten Siebs entspricht in die Kapsel gelangen können (Skizze unten rechts). Dies ist dann der Fall, wenn es sich um längliche Partikel handelt, die erfahrungsgemäß auch längs ausgerichtet durch das Sieb fallen können.

**Fehlstellen als Folge fester, flüssiger und gasförmiger Verunreinigungen** können auf verschiedene Weise entstehen (Skizze oben links):

- Bei der **Pulverherstellung** („1“): Rückstände aus Keramikfiltern, Oxidation, Aufnahme (in Lösung gehen oder in Poren) von Gasen. Diese können später beim HIP-Prozess zu **thermisch induzierter Porosität** (eng. Thermally Induced Porosity) führen (Lit.15.1-15).
- Im **Lagerbehälter** (Kanne, „2“): Verunreinigungen, Oxidation von reaktiven Pulvern wie Titan.
- Beim **Füllen der Kapseln** („3“):
  - Abrieb aus Leitungen (Elastomere),
  - Verunreinigungen in den Leitungen
  - Abrieb von Dichtungen an Leitungen und Ventilen
- **Verunreinigungen in der Kapsel** („4“):
  - Rückstände von Ätz- und Reinigungsmitteln
  - Schweißperlen
  - Rost

Erfahrungsgemäß können so sehr unterschiedliche Fehlstellen im Bauteil entstehen (Skizzen oben rechts):

- **Reaktive metallische Verunreinigungen** die sich durch Diffusion ausgleichen. Das betroffene Volumen kann deutlich größer als das ursprüngliche Fremdpartikel sein.
- **Reaktive organische Partikel:** Der Kohlenstoff in diesen Verbindungen, aber auch andere Bestandteile wie Schwefel, können mit dem Basismetall reagieren. Eine verglichen mit dem

Verunreinigungspartikel relativ große Karbidseigerung kann so entstehen.

- **Harte spröde nichtmetallische Partikel:** Typisch sind ausgebrochene Partikel eines keramischen Filters durch den die Schmelze vor der Zerstäubung läuft. Möglich sind auch Pulver ( $Al_2O_3$ ) einer abrasiven Reinigungsbehandlung der Kapsel oder der Einfüllrohre. Es kann sich sowohl um lose zurückgebliebene Partikel, als auch um solche die in der Oberfläche stecken geblieben sind (Beladungseffekt), handeln.

- **Weiche metallische, nicht reaktive Partikel:** Verschlepptes Fremdpuver oder Abrieb und Späne.

- **Gas:** Wie bereits erwähnt, kann das Metallpulver beim Erschmelzen und Verdüsen Gas aufnehmen. Das Gas dehnt sich unter den hohen Temperaturen des HIP-Prozesses aus und lässt Poren entstehen. Ähnliche fein verteilte Gasporen (Argon) können sich bilden („5“), wenn die Kapsel beim HIP-Prozess (Skizze unten links) zumindest zeitweise undicht war (Lit. 15.1-15).

Kann Luft zu reaktivem Metallpulver (z.B. Titan) in den Lagerbehälter oder die nicht ausreichend evakuierte Kapsel eindringen, können Pulveroberflächen oxidieren und Schwachstellen (Bindefehler) bilden.

Entstehung von Werkstoffehlern beim "As HIP-Prozeß".

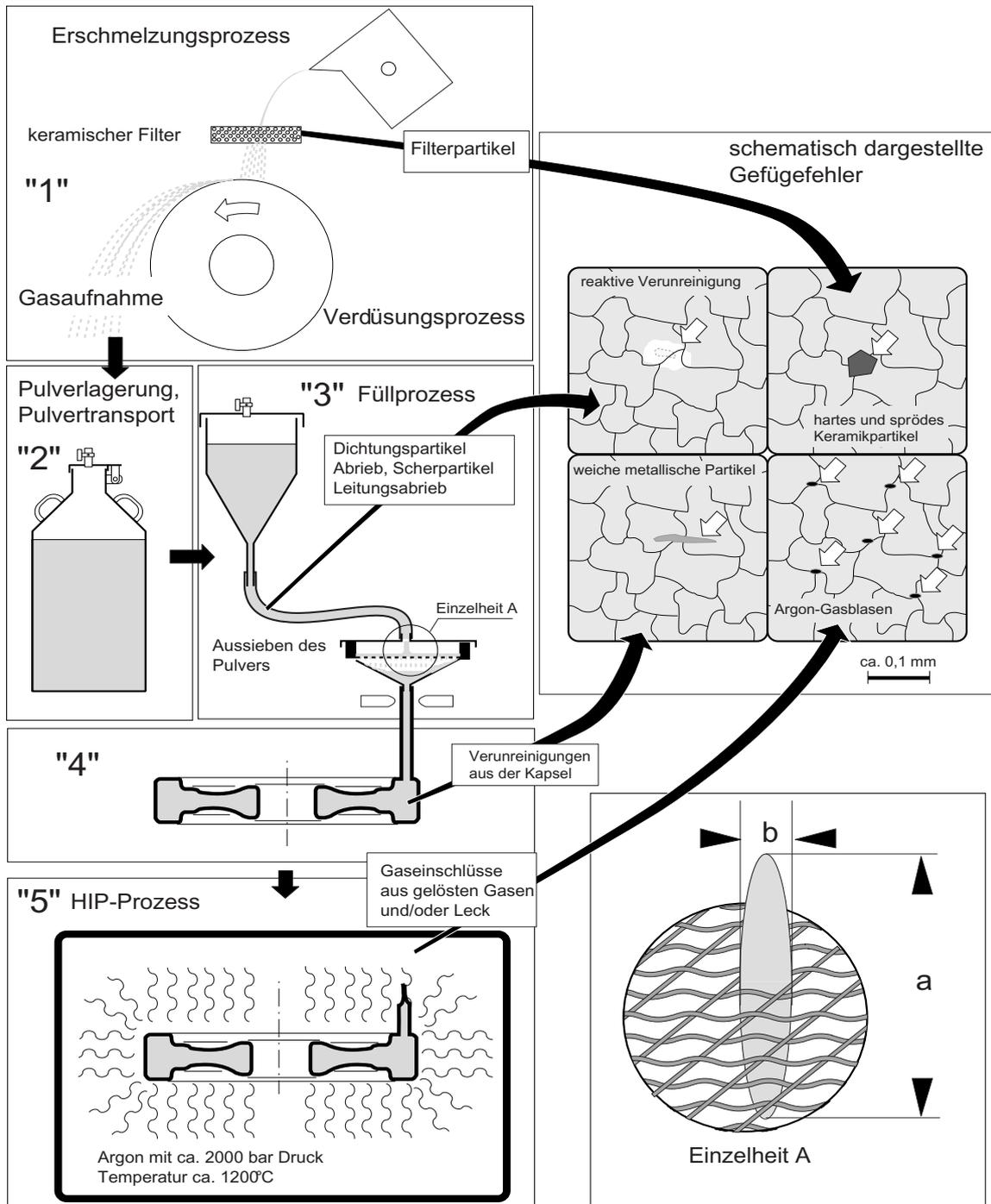


Bild 15.1-18

**Bild 15.1-19 (Lit 15.1-18):** Zur **Festigkeitssteigerung** werden Eisenbasislegierungen und Superlegierungen auf Ni- und Co-Basis gewöhnlich einer **Wärmebehandlung** unterzogen (Aushärtung, Gefügeoptimierung). Wärmebehandlungen treten auch bei vielen Fertigungsprozessen als integraler Vorgang auf. Typische Beispiele sind Schweißen, Löten, Gießen, Diffusionsverfahren (z.B. Beschichten), Schmieden, HIP, Warmverformen und -richten. Auch die Aufheizung bei Bearbeitungsschritten wie Zerspanung und Funkenerosion ist ein verwandter Vorgang.

Risse können von einer Wärmebehandlung (**Warmbehandlungsrisse**) auf unterschiedliche Weise ausgelöst werden. Im Angelsächsischen spricht man von „fire cracking“, „strain age cracking“, oder „stress (relieve) cracking“ (siehe auch Bild 16.2.1.3-12). Diese Begriffe beinhalten offenbar auch Warm- bzw. Heißrisse (Bild 15.1-8).

Die Rissbildung erfolgt interkristallin, d.h. es handelt sich um ein Aufreißen der Korngrenzen. Das **erfolgt häufig während der Aufheizphase (Diagramm oben)**, was jedoch meist schwer nachweisbar ist. Längere Glühzeiten nach der Rissbildung „verwischen“ Indizien im Gefüge. Für gezielte Abhilfemaßnahmen ist es aber von großer Bedeutung, den **Zeitpunkt der Rissbildung im Warmbehandlungszyklus** zu kennen. So lassen sich wichtige Schlüsse auf schadensursächliche Einflüsse ziehen. Die Auswertung und Bewertung einer solchen Rissbildung erfordert viel **Erfahrung**. Diese sollte den Warmbehandlungsprozess mit Ofenanlage, Kühlgaszuführung, Temperaturüberwachung, Chargiergestellen, sowie die betroffenen Bauteile und Werkstoffe einschließen.

Die Bildung von Warmbehandlungsrissen wird in erster Linie von drei Haupteinflüssen ausgelöst bzw. begünstigt:

- Zug(eigen)spannungen, insbesondere im Oberflächenbereich.
- Ein versprödet wirkendes Gefüge,

- Kerben (Band 3, Bild 13-18)

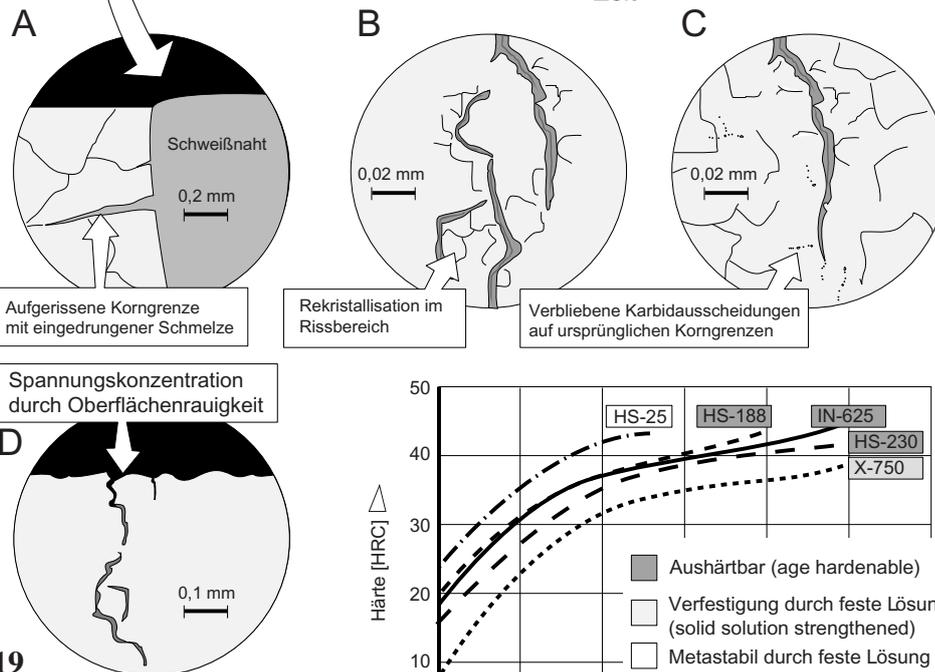
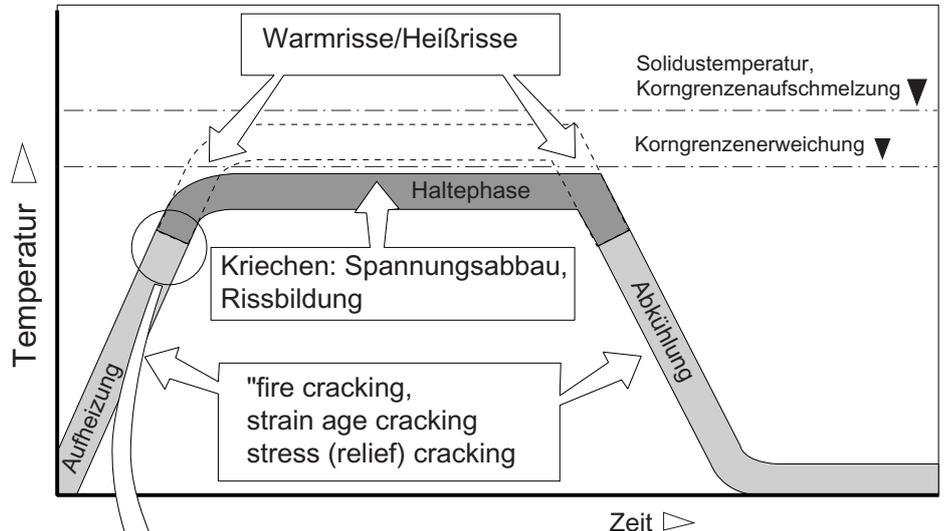
**Zug(eigen)spannungen:** Diese entstehen in den meisten Fällen durch Wärmespannungen auf Grund von Temperaturgradienten. Dass hohe Zugeigenspannungen in der **Abkühlungsphase** besonders im **Oberflächenbereich** auftreten ist einsichtig. Das Aufheizen erzeugt im heißeren Oberflächenbereich plastisches Stauchen. Beim Abkühlen entstehen dann, soweit die Stauchung nicht in der Phase konstanter Temperatur durch Kriechen abgebaut wurde, hohe Zugspannungen (Mechanismus der Thermoermüdung). Warum aber offenbar auch **in der Aufheizphase im Oberflächenbereich hohe Zugspannungen** auftreten ist weniger plausibel. Dass dies so ist beweisen typische metallografische Befunde (Details A,B,C) an Schweißungen. Insbesondere bei hoch konzentrierter Energieeinbringung für Laser- und Elektronenstrahlschweißungen (Detail „A“, Lit. 15.1-15) erfährt in der kurzen Aufheizzeit die deutlich kältere, aber schon thermisch geschwächte, direkt benachbarte Zone hohe Zugspannungen. Die Korngrenzen reißen auf und es kann zum **Eindringen von Schmelze in den Riss**, als typisches Merkmal, kommen (Bild 16.2.1.3-25). Aushärten und Lösungsglühen von Legierungen wie Waspalloy und C 263 beeinflusst die Bildung der  $\gamma$ -Phase und geht mit Volumenänderungen einher. Der Effekt ist von der Legierungszusammensetzung abhängig. Im Bereich scharfer **Querschnittsprünge**, z.B. an Schweißungen mit einem zum umgebenden Material **unterschiedlichen Aushärtungsstatus**, kann dies zu hohen Zugspannungen führen.

Wird nicht das gesamte Bauteil gleichmäßig erwärmt, können Wärmespannungen plastische Verformungen (z.B. **Verformen, Oberflächenbearbeitung**) erzeugen. Für den Zeitpunkt einer Rissbildung ist deshalb auf etwaige Veränderungen solcher Einflüsse zu achten.

Wird z.B. die **Bearbeitung der Stoßflächen einer Elektronenstrahlschweißnaht** auf ein stärker verfestigendes Verfahren umgestellt, kann

# Rohteil- und Halbzeugprobleme: Grundlagen, Ursachen

Temperaturbeeinflusste Rissbildung in Superlegierungen und austenitischen Stählen hat viele Namen. Erstaunlicherweise entsteht sie häufig in der Aufheizphase.



**Bild 15.1-19**

Die Details A,B und C zeigen Merkmale welche auf eine Rissentstehung während der Aufheizphase hinweisen.

dies bereits Ursache für eine Rissbildung sein. **Zeitliche Temperaturverläufe**, die einen Spannungsabbau als Folge eines merklichen Kriecheffekts oder von Rekristallisation nicht zulassen, lassen gefährlich hohe Eigenspannungen erwarten. Die Induzierung von Zug-

eigenspannungen durch **Verformen und Richten** hängt stark von den Prozessbedingungen ab. So ist z.B. die **Reibung zwischen Werkzeug und Bauteil** (Kontaktflächenzustand, Schmiermittel) von großer Bedeutung.

Bauteile aus **unterschiedlichen Werkstoffen** (z.B. Beschichtungen, Schweißpanzerungen) können während der Warmbehandlung Zugspannungen aufbauen. Dies gilt auch für ungeeignete **Glüh- und Positionsrichtungen** (zum Bauteil unterschiedliche Querschnitte und Werkstoffe) die auf das Bauteil einen Zwang ausüben. Verändern sich Temperaturen gegenüber den abgesicherten vorgeschriebenen **Prozessdaten** in Höhe, Verlauf und Gradient beim Aufheiz- und Abkühlvorgang und/oder während der Haltephase, ist mit ungewöhnlichen Spannungen zu rechnen.

Ein Indiz für zumindest zeitweise vorhandene hohe Zugeigenstressungen ist **Verzug** nach der Warmbehandlung. Dieser Verzug lässt auch auf Art, Größe und Richtung der ursächlichen Eigenstressungen schließen.

**Verspröde wirkende Gefüge:** Es handelt sich um Gefügebestandteile welche die Festigkeit des Korninneren deutlich erhöhen und die Korngrenze schwächen. In  **$\gamma$ -aushärtenden Legierungen** können sich beim Aufheizen **im Korninneren schneller Ausscheidungen** bilden. Zumindest vorübergehend erhöht sich damit die Festigkeit deutlich gegenüber der Korngrenze.

So wird die Korngrenze zur Schwachstelle und anfällig für Rissbildung. Einen besonders deutlichen Einfluss hat die **Kaltverfestigung** auf die erzielbare Härte bzw. Festigkeit (Diagramm unten rechts). Die Wirkung der Kaltverfestigung kann bei metastabilen Werkstoffen wie die Co-Legierung HS25 von einer gleichzeitig ausgelösten **Änderung der Kristallstruktur** verstärkt werden. Die Fließgrenze wird angehoben, und die plastische Verformbarkeit abgesenkt.

Auch die **Bildung spröder Phasen** kann den Festigkeitsunterschied zwischen Korninnerem und Korngrenze verstärken und Risse begünstigen. Einige Ausscheidungstypen im Korn können dieses verfestigen. Andere auf den Korngrenzen schwächend wirken. Dies gilt z.B. für **Karbide** die sich während der Aufheizphase be-

vorzugt auf den Korngrenzen ausscheiden. In Zusammenwirken mit einer Kaltverfestigung kann die Bildung der Karbide beim Aufheizen so beschleunigt werden, dass eine Rekristallisation erst danach erfolgt und so die Wirkung nicht mehr entschärfen kann (Detail „C“).

**Weitere spröde Phasen** sind Laves-Phase und  $\sigma$ -Phase. Sie benötigen jedoch zur Bildung eine ausreichende Haltezeit bei geeigneter Temperatur. Metastabile Legierungen bilden die  $\mu$ -Phase auf Korngrenzen.

**Kerben:** Sie erhöhen örtlich die Spannungen. Meist handelt es sich um geometrische Kerben wie Bohrungen, Nuten und Innenecken. Schweißübergänge und Querschnittssprünge haben einen vergleichbaren Effekt.

Erfahrungsgemäß können bereits scheinbar ungefährlich kleine **Bearbeitungsriefen** und Überlappungen als Rissstarter wirken (Detail „D“) so auch Korngrenzenangriff durch **Oxidation oder Ätzworgänge**.

## Literatur zu Kapitel 15.1

- 15.1-1** P. Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 26 - 39, Seite 163.
- 15.1-2** Metals Handbook Ninth Edition, „Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, ASM, 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 314-343.
- 15.1-3** Metals Handbook Ninth Edition, „Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, ASM, 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 381-388.
- 15.1-4** L.A. Jackman, G.E. Maurer, S. Widge, „New Knowledge About ‘White Spots’ in Superalloys“, Zeitschrift „Advanced Materials & Processes“, 5/93, Seite 18-25. (2695).
- 15.1-5** „Fourth-stage turbine failure is second for Delta this year“, Zeitschrift, „Aerospace Daily“, 16. August, 1996, Seite 243.
- 15.1-6** „Suspect Foundry Process Prompts NTSB Call for JT8D Inspections“, Zeitschrift, „Aerospace Propulsion“, June 6, 1996, Seite 4
- 15.1-7** „F-18 Fighter Crashes in England“, Zeitschrift, „Aviation Week & Space Technology“, September 15 (1980), Seite 20.
- 15.1-8** NTSB, „Aircraft Accident Report“, NTSB-AAR-72-9, 1972.
- 15.1-9** „General Electric Introduces PM Superalloys in its F404 Engine“, Zeitschrift, „PM Powder Met“, 12 (1980), 4, Seite 507.
- 15.1-10** „General Electric F-404 Redesign“, Zeitschrift, „Interavia AirLetter No. 9649“, December 12, 1980, Seite 1-3.
- 15.1-11** J.L. Bartos, „P/M Superalloys for Military Gas Turbine Applications“, „Powder Metallurgy in Defense Technology“ Volume 4, Proceedings of the 1979 P/M in Defense Technology Seminar, Yuma, Arizona, Seite 81-112.
- 15.1-12** N.A. Wilkinson, „Forging of 718 - The Importance of T.M.P.“, „Superalloy 718- Metallurgy and Applications“, Edited by E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989, Seite 119-133.
- 15.1-13** L.G. Hosamani, W.E. Wood, J.H. Devletian, „Solidification of Alloy 718 During Vacuum Arc Remelting With Helium Gas Cooling Between Ingot and Crucible“, „Superalloy 718- Metallurgy and Applications“, Edited by E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989, Seite 49-57.

- 15.1-14** K.O. Yu, J.A. Domingue, „Control of Solidification Structure in VAR and ESR Processed Alloy 719 Ingots“, „Superalloy 718- Metallurgy and Applications“, Edited by E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989, Seite 33-48.
- 15.1-15** R.L. Dreshfield, „Defects in Nickel-Base Superalloys“, Zeitschrift „Journal of Metals“, July 1987, Seite 16-21.
- 15.1-16** A.Barussaud, Y. Desvallees, J.Y. Guedou, „Control of the Microstructure in Large Titanium Discs. Application to the High Pressure Compressor of the GE90 Aeroengine“, Zeitschrift „Titanium ‘95: Science and Technology“, Seite 1599-1608.
- 15.1-17** D.L. Klarstrom, „Heat Treat Cracking of Superalloys“, Zeitschrift „Advanced Materials & Progress“, 4/1996, Seite 40EE- 40GG.
- 15.1-18** „Feingussfehlstellen, Zulässigkeit von Fehlstellen in Feingussbauteilen bei thermisch-mechanischer Wechselbeanspruchung“, FVV-Vorhaben 696, Heft 723, 2001.

## Empfohlene allgemeine Fachliteratur

- ASM Handbook „Volume 4“**, „Heat Treating“, ASM,1998, ISBN 0-87170-379-3, Seite 907-912 Wärmebehandlung von Ni-Legierungen; Seite 913-923 Wärmebehandlung von Titanlegierungen.
- ASM Handbook „Volume 7“**, „Powder Metal Technologies and Applications“, ASM,2002, ISBN 0-87170-387-4, Seite 167-178 Herstellung von Ni-Basis Pulver; Seite 603-620 HIP-Prozess.
- ASM Handbook „Volume 14“**, „Forming and Forging“, ASM,1998, ISBN 0-87170-007-7, Seite 61-144 Schmiedeverfahren; Seite 261-266 Schmieden von Nickellegierungen; Seite 267-287 Schmieden von Titanlegierungen; Seite 831-831 Umformen von Nickellegierungen; Seite 938-848 Umformen von Titanlegierungen.
- ASM Handbook „Volume 15“**, „Casting“, ASM,1998, ISBN 0-87170-007-7, Seite 393-425 VAR-,ESR-Prozess; Seite 538-543 HIP; Seite 544--553 Gussfehler; Seite 815-823 Gießen von Nickellegierungen; Seite 824--835 Gießen von Titanlegierungen.
- 15.1-2 Metals Handbook Ninth Edition, „Volume 11** „Failure Analysis and Prevention“, ASM,1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 314-343 Fehler in Schmiedeteilen, Seite 344-410 Fehler in Gussteilen.