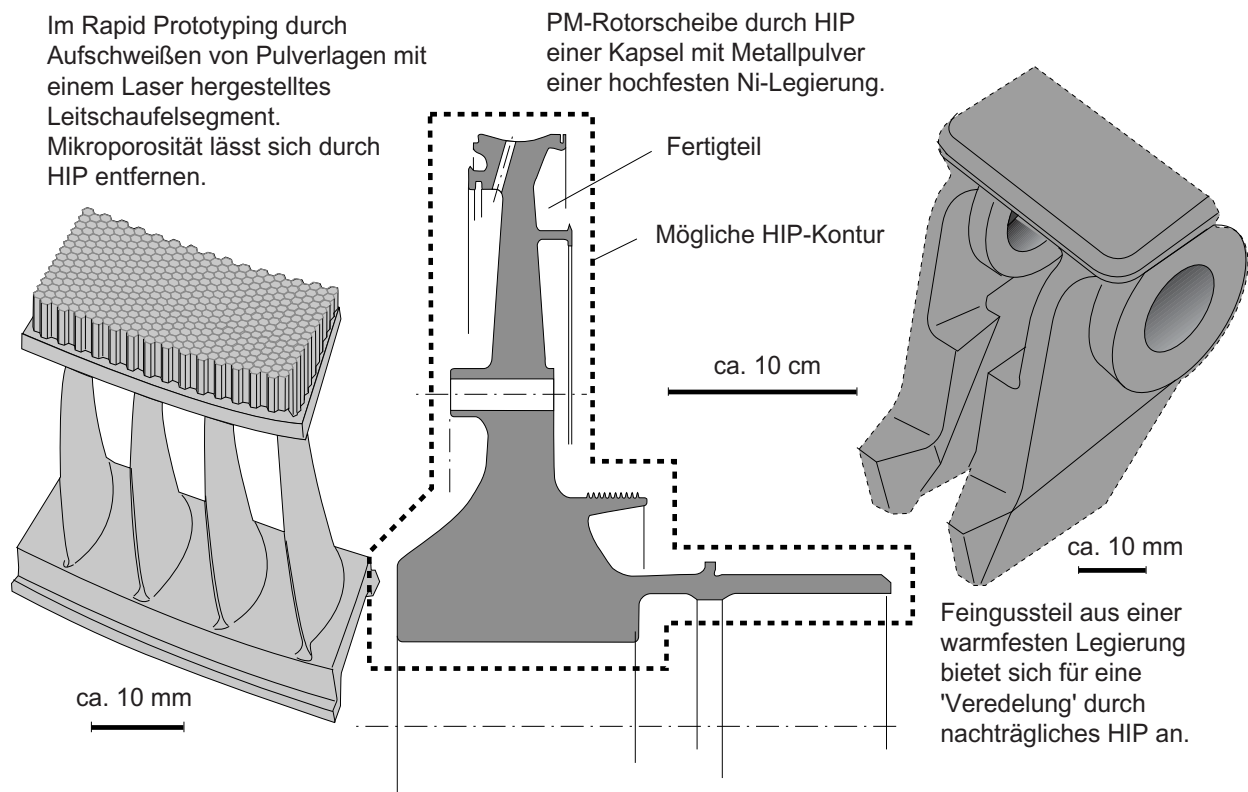


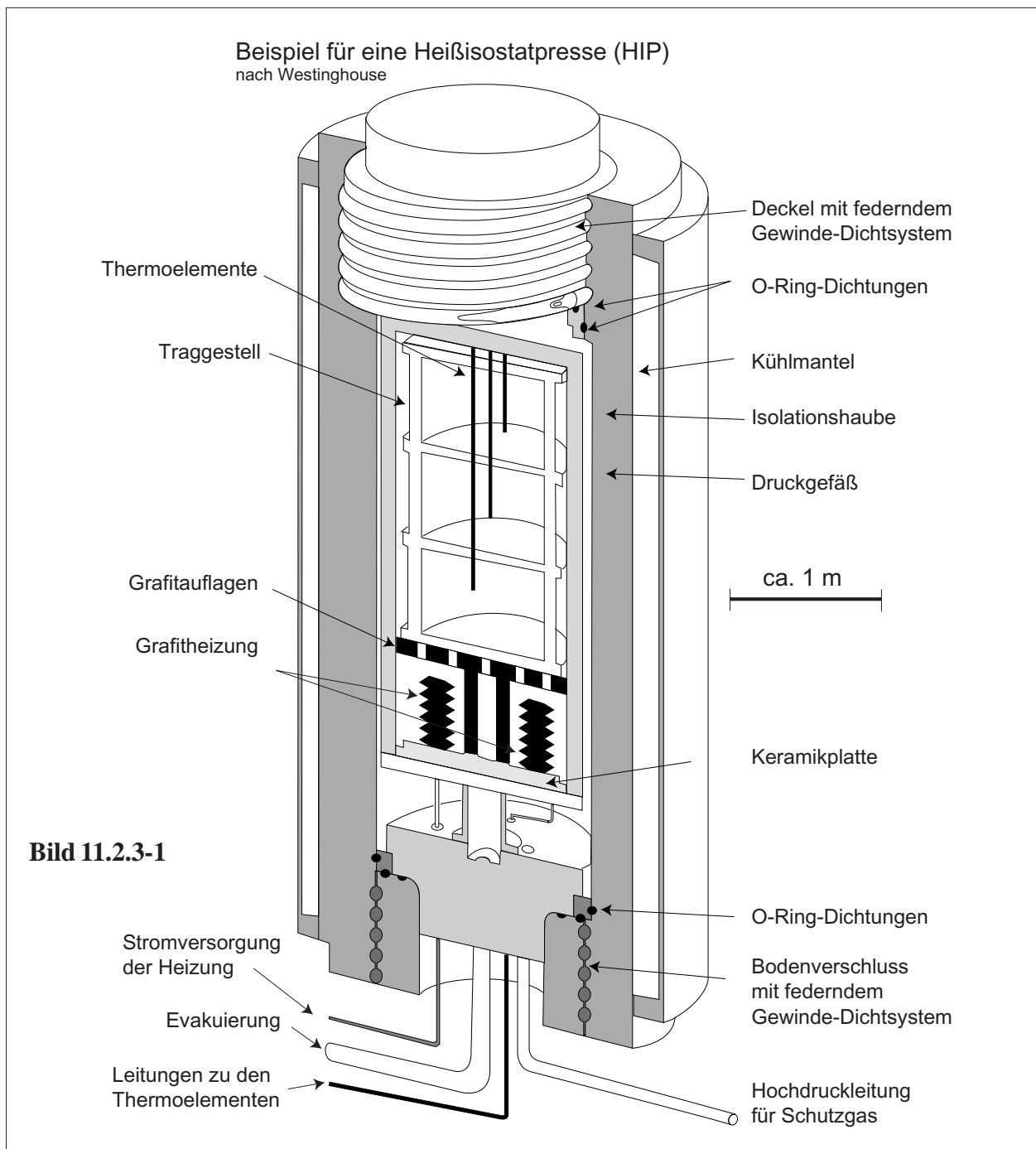
11.2.3 Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP). Dichte, hochfeste pulvermetallurgische Bauteile Qualitätsverbesserung von Gussteilen



Heiß-Isostatisches Pressen (HIP, engl. hot isostatic pressing) soll hier gesondert behandelt werden. Es hat das besondere Potenzial gerade für Bauteile des **Leichtbaus hohe Festigkeit bei hoher Sicherheit** zu realisieren. Dazu werden die Teile bzw. Kapseln in einen **Autoklaven** (Bild 11.2.3-1) gebracht. Darin können werkstoffspezifische Prozesstemperaturen bis deutlich über 1000°C und Drücke bis 2000 bar wirken. Unter diesen Bedingungen schließen sich nach außen geschlossene Hohlräume. Weisen diese eine **metallische Oberfläche** auf (z.B. Schrumpflunker), kommt es zu einer **Diffusionsverschweißung**. Das Verfahren eignet sich sowohl für **hochqualitative Gussteile** als auch **hochfeste pulvermetallurgische Teile**, die in der Lage sind **Schmiedeteile zu ersetzen**. Mit der Möglichkeit konturnahe Teile herzustellen, wird sowohl die Ressourcenschonung unterstützt (Zerspanungsvolumen minimiert) als auch gerade für den **Leichtbau** in Gefüge und Gestaltung optimale Bauteile zu realisieren. Eine eher exotische Anwendung ist die Herstellung **faserverstärkter** (z.B. SiC) **metallischer Werkstoffe** (z.B. Titanlegierung). Durch HIP-Nachverdichten ist es möglich, hochfeste dichte **Werkstoffe mit neuen Verfahren** wie **Rapid Prototyping** (Laseraufschmelzen von Metallpulver) herzustellen, wenn diese geschlossene innenliegende Fehlstellen aufweisen. Darüber hinaus ist auch die Anwendung bei **Schweißungen** möglich, um innere Fehler wie Poren und Warmrisse zu schließen. Über den pulvermetallurgischen Weg bietet HIP die Möglichkeit **neuer Werkstoffe** bzw. **Legierungen** wie intermetallische Phasen, die wegen der geringen Verformbarkeit und/oder Affinität zur Umgebungsatmosphäre für einen Schmiedeprozess ungeeignet sind.

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Eine besonders interessante Anwendung ist die **Regeneration von Heiteilen** wie Turbinenschaufeln (Kapitel 11.2.3.1). So lassen sich durch HIP Kriechporen schließen und mit der gleichzeitigen Wärmebehandlung die Gefüge dem Neuteilzustand anzunähern (Bild 11.2.3.1-2.1 und Bild 11.2.3.1-2.2).



Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Bild 11.2.3-1 (Lit. 11.2.3-3 und Lit. 11.2.3-4): Diese Skizze zeigt den Aufbau eines häufigen **HIP-Pressentyps**. Derartige Anlagen gibt es mit Innendurchmessern im 10-cm bis **Meterbereich**. Die einstellbaren Innendrucke können deutlich **über 1000 bar** und die **Temperaturen weit über 1000°C** liegen. Sie müssen natürlich **auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt** sein. Bei geeigneter Ausstattung lässt sich auch eine anschließende **beschleunigte Abkühlung** realisieren. Die aufwändige Anlage zusammen mit dem Schutzgas- (Argon) und dem Energieverbrauch macht das Verfahren nicht billig. Für den jeweiligen Fall muss deshalb die **Rentabilität** geprüft werden. Das **Abdampfen von Grafit** der Heizung kann zugängliche Oberflächen beeinflussen. Falls Bedenken bestehen (**Aufkohlung**), ist eine geeignete Abdeckung erforderlich.

Bild 11.2.3-2: Steigende Leistungskonzentration und Wirkungsgrade moderner Maschinen, insbesondere des Leichtbaus, führen zu höheren Belastungen der Bauteile. Damit werden tolerierbare **Schwachstellen** (kein unzulässiges zyklisches Risswachstum) immer kleiner. Seriengeeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren (in erster Linie Ultraschallprüfung) sind bereits an ihren Grenzen angelangt (Band 4, Bild 17.3.1-2 und Bild 17.3.1-3.1). 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 11.3-11). 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 Umfor-

mung durchaus beachtenswert. Der relativ grobkonturierte Schmiederohling muss bei der Fertigteilerstellung 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 Fertigteile 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 Fertigteile möglichst konturnahe 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°C) komprimiert. Das Pulver sintert dabei zu einem dichten feinkörnigen Rohling. Nach einer eventuellen Wärmebehandlung und dem Entfernen der Kapsel steht das Rohteile für eine zerstörungsfreie Prüfung zur Verfügung. Das feine Korn ergibt optimale Bedingungen für die Ultraschallprüfung (Band 4, 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-Rohteile 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.

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

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

Wichtiger Entstehungsbereich innerer Werkstofffehler

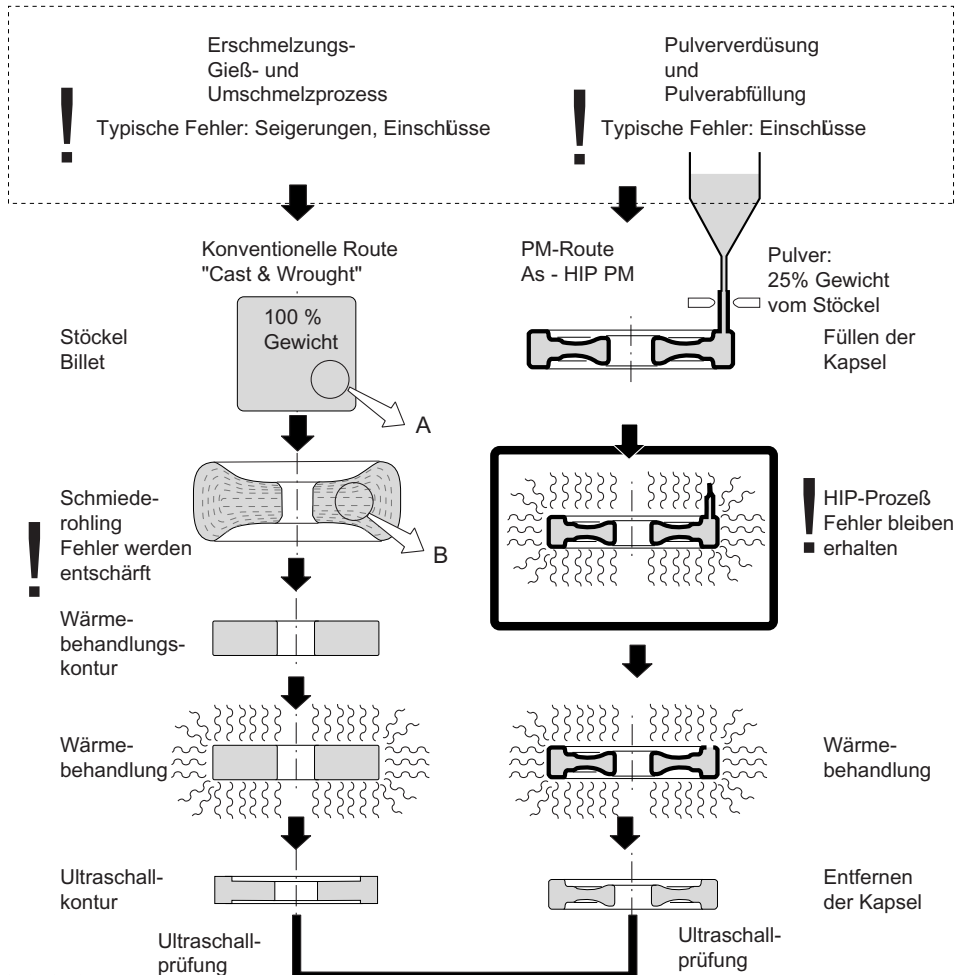
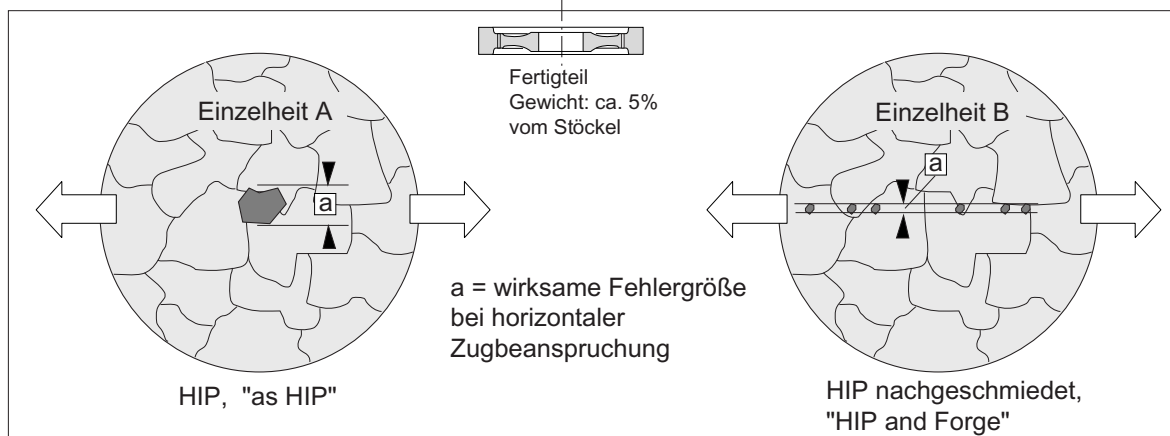


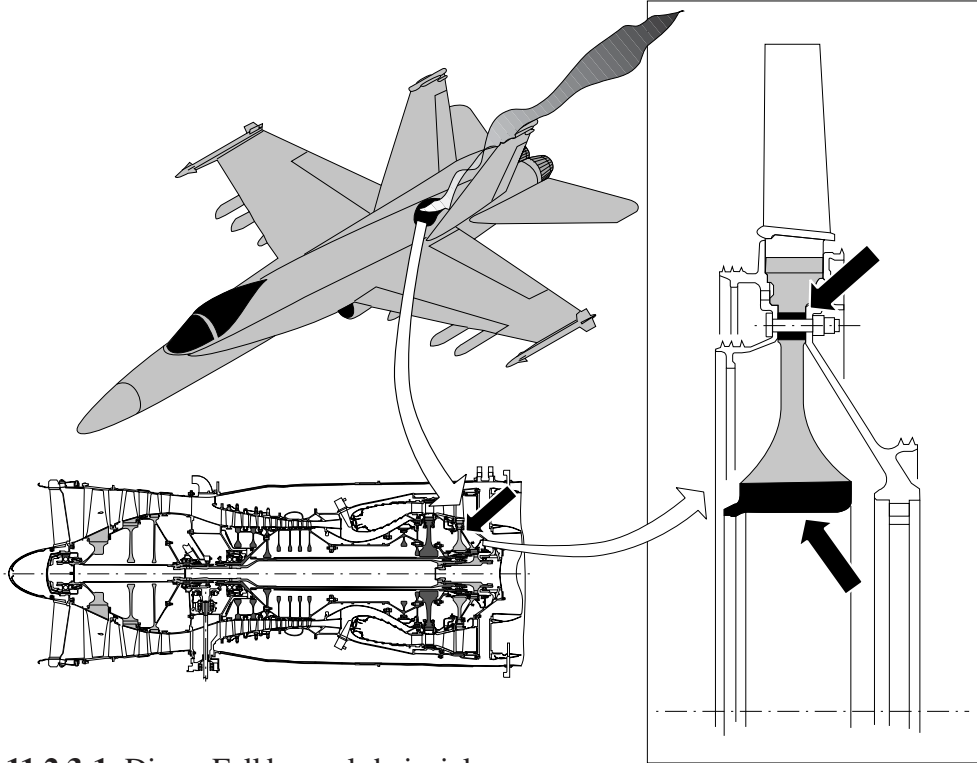
Bild 11.2.3-2



Bildbeschreibung siehe Seite 11.2.3-3

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Das vorläufige(?) Ende einer revolutionären Technologie.



Beispiel 11.2.3-1: Dieser Fall kann als beispielhaft für die Risiken der Einführung neuer Technologien in hochbeanspruchten Serienkomponenten gelten. Der dargestellte Fighter befand sich in der Erprobung. Es kam zum **Bruch der ND-Turbinenscheibe** und nachfolgendem Absturz. Wahrscheinliche Schadensursache war ein **LCF-Bruch**, der von einem kritisch hoch beanspruchten Bereich ausging (Pfeile im Detail rechts). Der Triebwerkstyp war in seiner Leistung deutlich verbessert worden. Die wegen der Einstufigkeit hochbeanspruchte Niederdruckturbinen erhielt eine Scheibe aus besonders festem („**ultra-high tensile strength**“, Lit 11.2.3-7) Werkstoff. Es handelte sich um einen pulvermetallurgischen Werkstoff in der „as HIP“-Version, d.h. nicht nachgeschmiedet. Diesen Werkstoff zeichnet sehr feines gleichmäßiges Korn aus. Nachteile des Gefüges waren **Kerbempfindlichkeit, niedrige Risszähigkeit und schneller Rissfortschritt**. Die Gefahren einer derartigen Kombination von

schadensbegünstigenden Effekten sollte jedem der Technologien entwickelt als wichtige Erfahrung dienen.

Es darf vermutet werden, dass wegen der hohen Beanspruchung, eine Risswachstumsphase nur äußerst schwer beherrschbar war. Der große Vorteil des PM-Werkstoffs war neben der hohen Festigkeit das äußerst preisgünstige „as HIP“-Verfahren zu einer endkonturnahen Halbzeugform. Dieser Fertigungsprozess verwendet eine hohle Blechform (Kanne), die mit Metallpulver im Vakuum gefüllt und dicht verschweißt wird (Lit. 11.2.3-8). Eine so gefüllte Kapsel wird in einem Autoklav, der sog. Heißisostatpresse (engl. hot isostatic pressing = HIP) unter hohem Argondruck (>1000 bar) und hohen Temperatur zu einem dichten Werkstoff verpresst. Anschließend wird die Kapsel entfernt.

Ein solcher Schaden kann leicht das, zumindest vorläufige, Ende einer Technologie sein.

Typische Probleme des HIP-Prozesses.

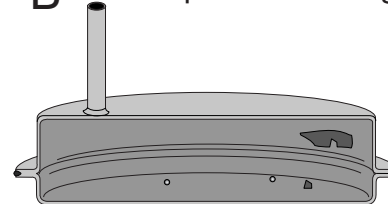
"A" Pulver:

- Herstellung
- Transport
- Lagerung
- Entnahme

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

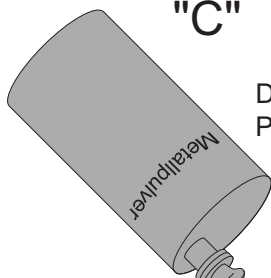


"B" Kapselherstellung

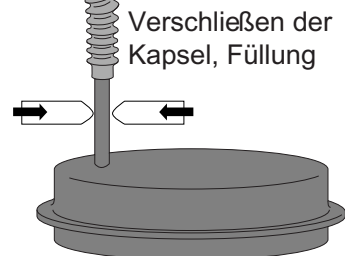


Verunreinigungen in der Kapsel:
Zunder, Rost, Schweißperlen
Bearbeitungsspäne, ungenügende Dichtigkeit.

"C" Kapselfüllung

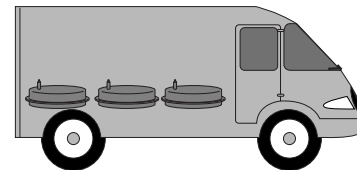


Dichtungen:
Partikel von O-Ringen

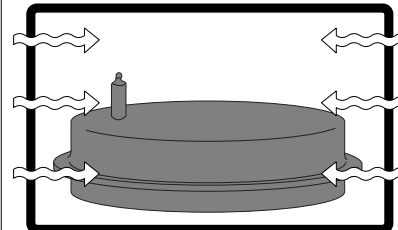


Füllung zu gering, Gasaufnahme,
Undichtigkeit

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



HIP-Prozess



Temperatur- und Druckführung
weichen ab. Undichtigkeit "E"

"F"

Entfernen der Kapsel: Explosionsgefahr!

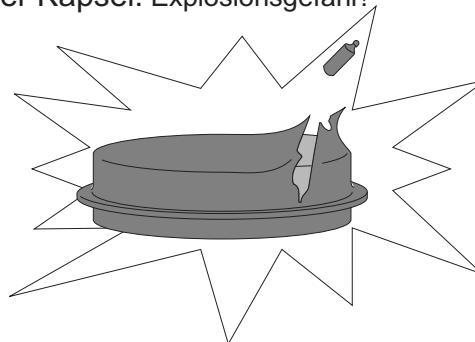
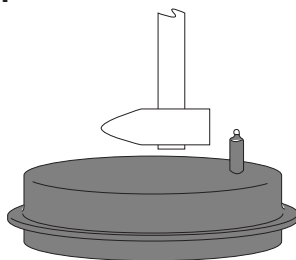


Bild 11.2.3-3

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Bild 11.2.3-3: 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 11.2.3-4 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 11.2.3-1) 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.

Bild 11.2.3-4: Auch in Werkstoffen die nach dem „As HIP“-Prozess hergestellt wurden, sind spezifische Fehler zu erwarten (Beispiel 11.2.3-1 und Bild 11.2.3-2). Das besondere Problem liegt in **Verunreinigungen des Pulvers**. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durchaus deutlich größere Partikel, als es der Maschenweite ei-

nes 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** (engl. Thermally Induced Porosity) führen (Lit.11.1-15).
- 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

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Entstehung von Werkstofffehlern beim "As HIP-Prozeß".

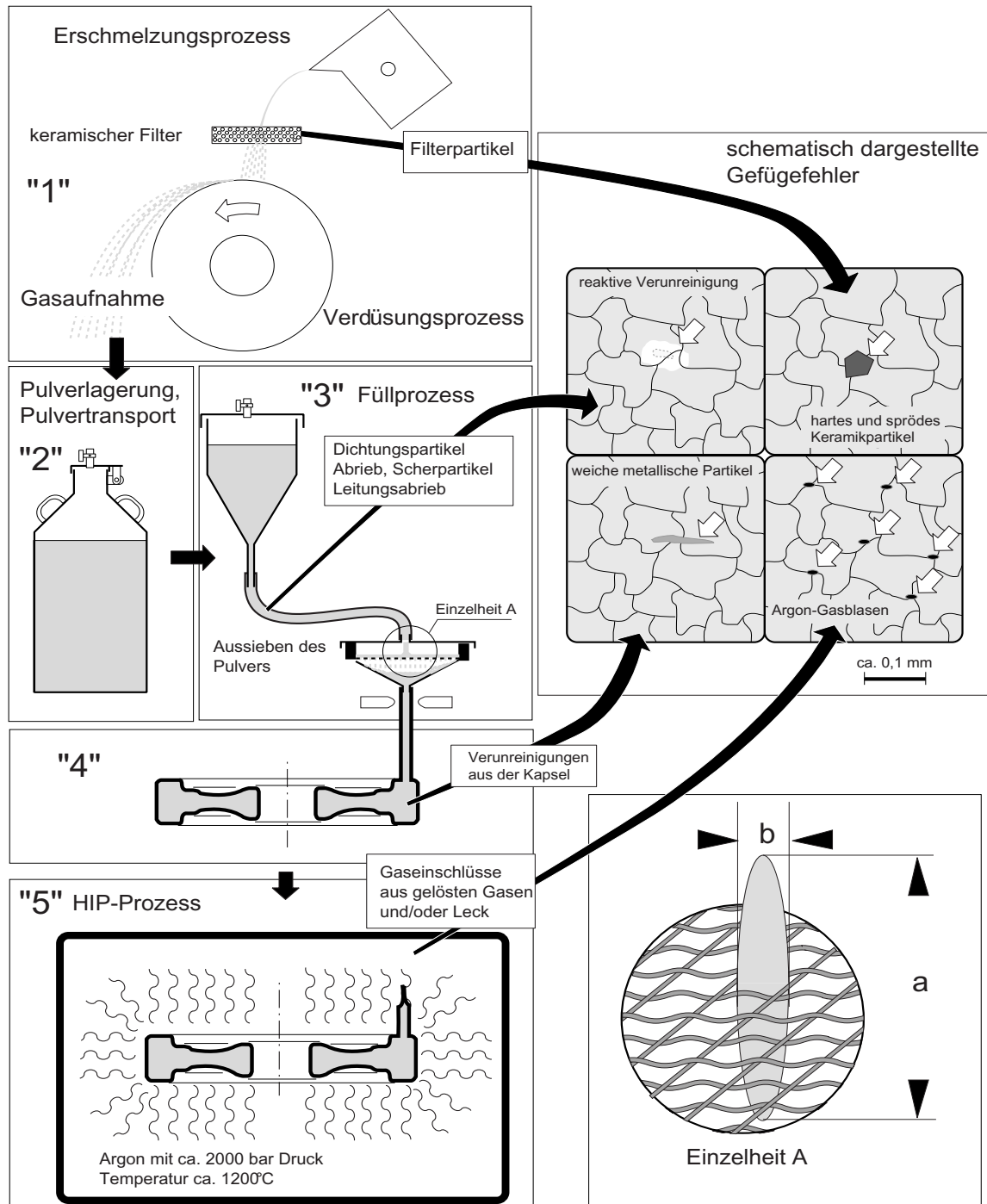


Bild 11.2.3-4

(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.

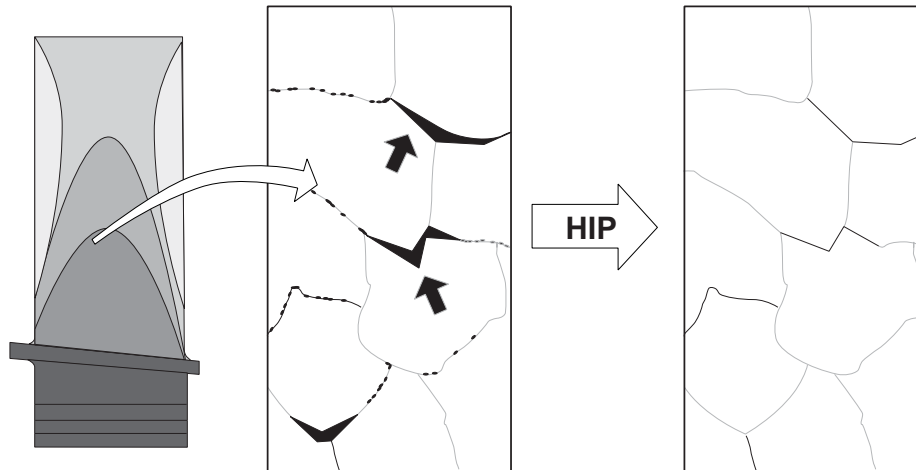
Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

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

- **Gase:** *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. 11.1-15).*

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.

11.2.3.1 Regeneration kriechbeanspruchter Heiteile durch HIP



Heiisostatpressen (engl. Hot Isostatic Pressing = HIP, Bild 11.2.3-1) lässt sich als ein Regenerationsverfahren für kriechgeschdigte Heiteile anwenden. Dabei werden **innere Fehler wie Kriechporen und Mikrorisse** unter hohem äußeren Gasdruck und bei hoher Temperatur zusammengedrückt und verschweißt (Bild 11.2.3.1-1).

Das Verfahren wird auch bei innerer Gussporositt von Neuteilen (11.2-8 und Bild 11.3-9), Schweifehlern in der Neuteilfertigung und bei Reparaturen (Schweißen, Löten) sowie als Diffusionsschweiverfahren (Bild 12.2.1.3.5-1 und Bild 12.2.1.3.5-3) angewendet.

Ein zusätzlicher, regenerativer Effekt kann durch die **gleichzeitige Wärmebehandlung** entstehen. Dabei werden Nachteile „gealterter Gefüge“ wie eine **Vergrößerung und ungünstige Orientierung der Gammastrich-Aushärtungsphase rückgängig gemacht**. Im günstigen Fall lässt sich die Kriechlebensdauer mit akzeptabler Streuung wieder in die Nähe des Neuteiles anheben (Bild 11.2.3.1-2.1 und Bild 11.2.3.1-2.2).

Die **Voraussetzungen** für eine „HIP-Regeneration“ sind bei weitem nicht in allen Fllen betriebsgeschdigter Heiteile gegeben. Haben sich bereits Fehler zur Oberfläche geöffnet, ist deren Schließung prinzipbedingt nicht mehr möglich.

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Bild 11.2.3.1-1 (Lit. 11.2.3-3 und Lit. 11.2.3-4): Heiß Isostatisches Pressen (engl. Hot Isostatic Pressing = HIP) ist ein Verfahren bei dem man Bauteile in einem Autoklaven mit Gas unter hohem Druck und Temperatur beaufschlagt (Bild 11.2.3-1 und Band 1 Bild 5.3.2-12). Dabei werden nach außen geschlossene (gasdichte) Fehlstellen plastisch zusammengedrückt. Sind die Flächen der Trennung ausreichend sauber, verschweißen/sintern sie zusammen. Dieser Effekt lässt sich für die Reparatur von Teilen mit innerer Schädigung (Kriechen) nutzen.

Das Kriechen von Heißeilen läuft gewöhnlich über innere **Porenbildung** (Kriechporen, engl. creep voids, Band 1 Kapitel 5.3.2) und Mikrorissbildung. Solange es dabei nicht zur nach außen offenen Rissbildung kommt, sind diese mikroskopischen Fehlstellen oxidfrei. Sie können **durch Diffusionsverschweißen/Sintern beim HIP-Prozess vollkommen verschwinden**. Leider zeigen bei weitem nicht alle Heißeilwerkstoffe unter typischen Betriebsbedingungen diese Schädigungsform. Gerade die Gusslegierungen von Turbinenschaufeln weisen eine deutlich weniger ausgeprägte Kriechporenbildung als Schmiedelegierungen auf. Sie findet man nur noch in Turbinenschaufeln alter Triebwerkstypen.

Die hohe HIP-Temperatur wirkt **gleichzeitig als Wärmebehandlung**. Diese kann im Betrieb verändertes Gefüge (z.B. Orientierung und Vergrößerung der Aushärtungsphase) verbessern. Eine **HIP-Regeneration** kann durchaus erfolgreich sein und kommt in Einzelfällen zum Einsatz (Bild 11.2.3.1-2.1/-2.2). Für Turbinenschaufeln aus einer Schmiedelegierung ließ sich die nutzbare Lebensdauer bei akzeptabler Streuung deutlich verlängern (Lit. 11.2.3-1). Es wurde jedoch beobachtet, dass mit einem erneuten **beschleunigten Anfangskriechen** (Bild 11.2.3.1-2.2 und Band 1 Bild 5.3.2-3), vergleichbar Neuteilen, zu rechnen ist.

Eine HIP-Regeneration birgt aber auch **potenzielle Risiken**:

- Zur Oberfläche hin **offene Fehlstellen** können nicht geschlossen werden. Dies ist besonders zu berücksichtigen, wenn es sich um hohle Teile handelt. Hierzu gehören **gekühlte Turbinenschaufeln** (Bild 11.2.3.1-2.1). Bei Ihnen muss man mit einer **Rissbildung durch Thermoermüdung in den Kühlluftbohrungen** rechnen (Band 1 Bild 5.4.2.1-9). Diese Mikrorissbildung ist oft nicht ausreichend sicher mit serieneegneten ZfP-Verfahren nachzuweisen.

- Fehlstellen die mit Reaktionsprodukten, meist dünnen **Oxidschichten**, belegt sind, ermöglichen keine Diffusionsverschweißung. Die Fehlstelle wird zwar zugedrückt, ihre **schädigende Wirkung bleibt** aber.

Natürlich ist die Anwendung von HIP zur Regeneration nach ausreichenden Nachweisen bzw. Erprobung vom OEM und den zuständigen Behörden zu genehmigen.

Eine weitere Anwendung der HIP-Behandlung im Reparaturprozess kann nach dem **Hochtemperaturlöten** von Heißeilen (Kapitel 12.2.1.4) oder dem **Reparaturschweißen** erfolgen. Dies kann zum Schließen ausreichend oxidfreier Poren, Risse und Trennungen, die von der Fügung zur Oberfläche abgedichtet sind, dienen.

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Was eine HIP-Behandlung kann und nicht kann.

Probleme



Sulfidationsreste
können verstärkt
schädigen

Fehler die zur Oberfläche
gehen werden nicht
geschlossen:

- Risse
- Poren

besonders heimtückisch
aber häufig ist Rissbildung
in Kühlluftkanälen

belegte, insbesondere
oxidierte Fehlstellen
bleiben

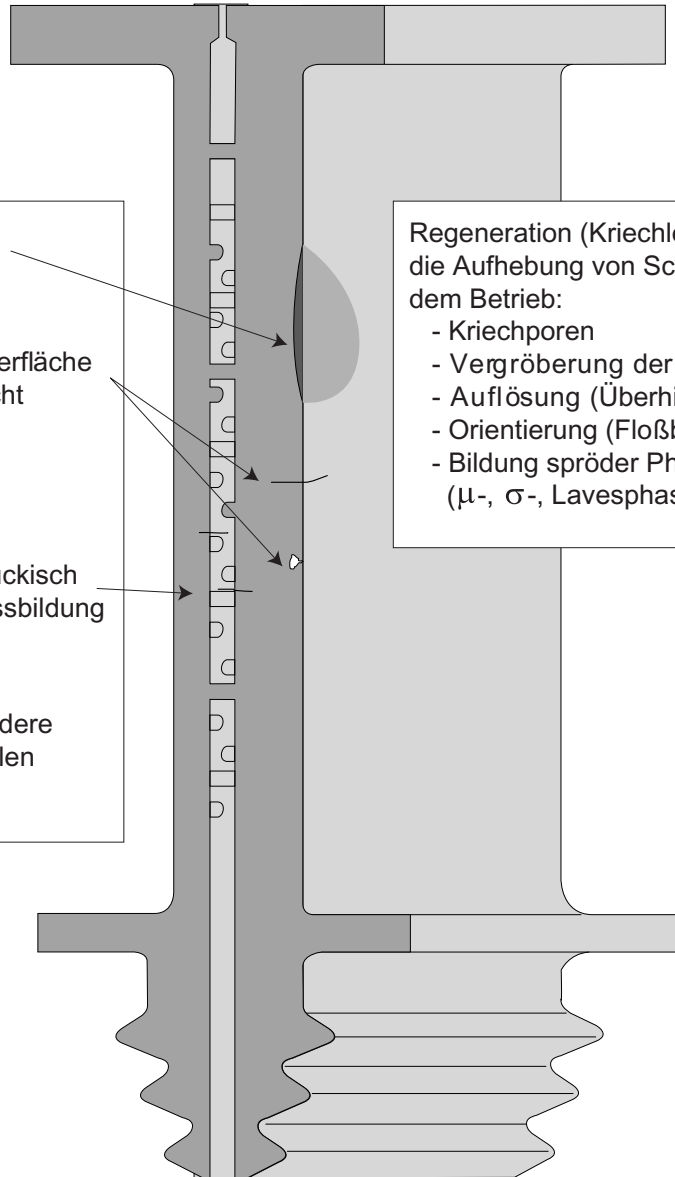
gewünschte
Effekte



Regeneration (Kriechlebensdauer) durch
die Aufhebung von Schädigungen aus
dem Betrieb:

- Kriechporen
- Vergrößerung der γ' -Phase
- Auflösung (Überhitzung) der γ' -Phase
- Orientierung (Floßbildung) der γ' -Phase
- Bildung spröder Phasen
(μ -, σ -, Lavesphase)

Bild 11.2.3.1-1



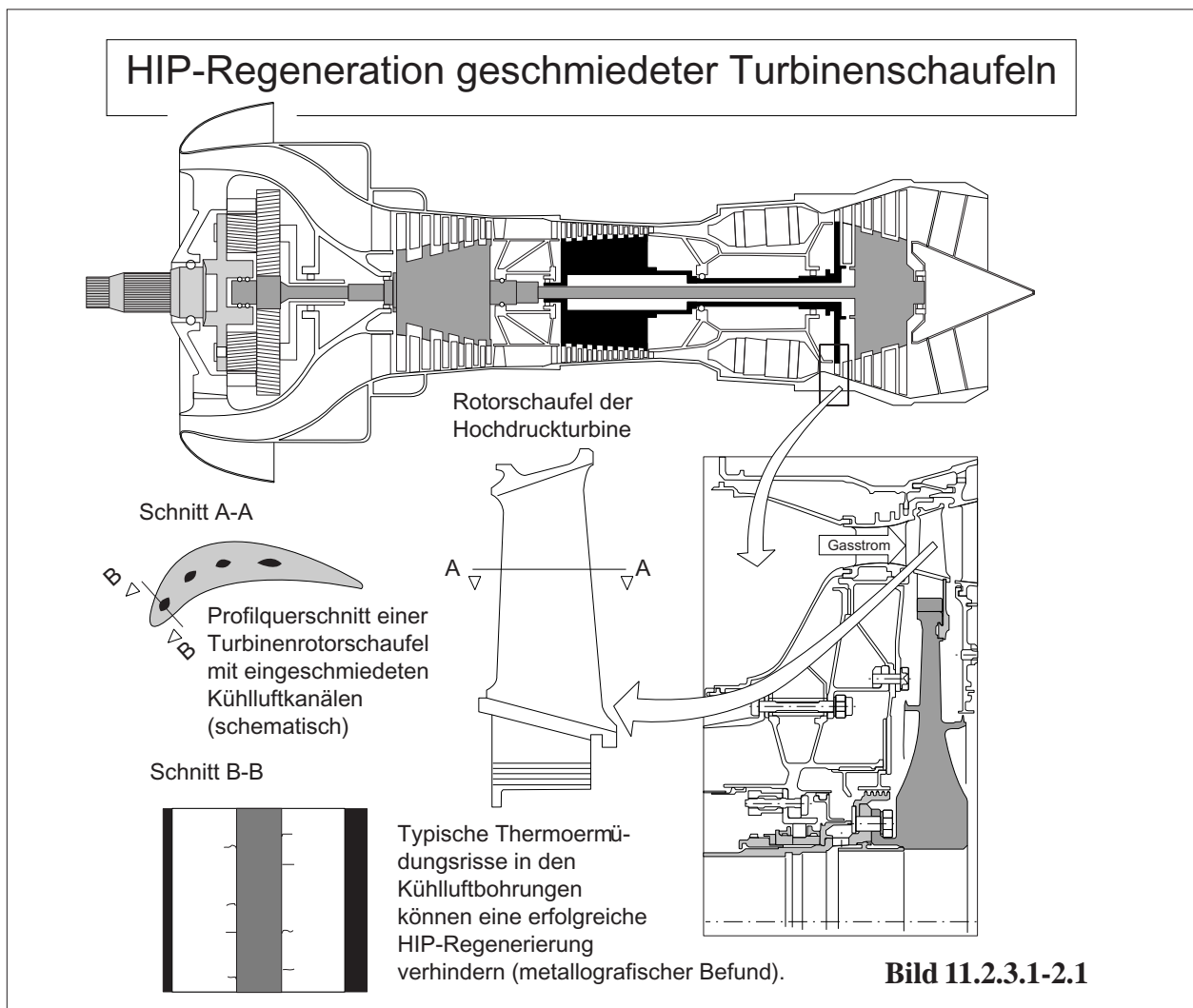
Merksatz: Eine Regeneration durch HIP kann nur dann erfolgreich sein, wenn die Schädigung (Kriechporen, Mikrorisse) **zur Oberfläche geschlossen** ist.

Rohteil- und Halbzeugprobleme: Probleme und Schäden: Heiß-Isostatisches-Pressen (HIP)

Bild 11.2.3.1-2.1 (Lit. 11.2.3-1 und Lit. 11.2.3-2): Es handelt sich um eine seit Jahren erfolgreiche Serienanwendung des HIP-Prozesses zur Regeneration von Turbinenrotorschaukeln (Skizze Mitte). In diesem Fall ist die **Betriebslebensdauer von einer Kriechschädigung durch Porenbildung bestimmt**. Damit eignen sich solche **geschmiedeten Schaufeln** besonders für das Regenerationsverfahren. Voraussetzung ist jedoch, dass sich noch **keine unzulässige Mikrorissbildung im Bereich der inneren Kühlluftkanäle gebildet hat** (Detail unten links). Dies wird an sechs gleichmäßig am Umfang verteilten Schaufeln vor der Regeneration überprüft. Sie werden zerstörend **metallografisch geprüft**. Umfangreiche Erfahrungen und Untersuchungen ermöglichen es, die **Kriechporenbildung als Kriterium der**

Regenerationsfähigkeit zu nutzen (Bild 11.2.3.1-2.2 und Band 1 Bild 5.3.2-7)

Merksatz: Zur Beurteilung der lebensdauerbestimmenden Kriechschädigung muss die Ebene des **metallografischen Schiffs** im **relevanten Bauteilquerschnitt liegen und richtig orientiert** sein.



Die Regeneration von geeigneten Heiteilen erfordert spezifisch abgestimmte Prozessparameter und einen Erfolgsnachweis unter betriebsähnlichen Belastungen.

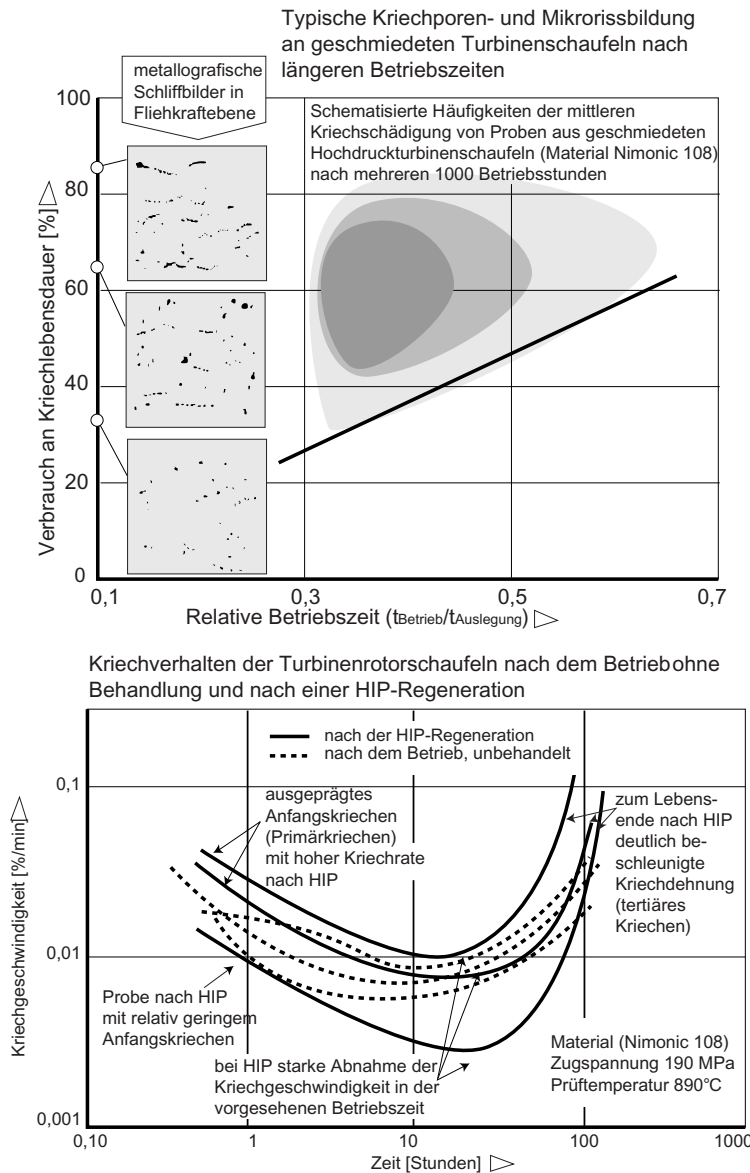


Bild 11.2.3.1-2.2

Bild 11.2.3.1-2.2 (Lit. 11.2.3-1): Das obere Diagramm zeigt typische **Kriechporenbildung** für den in Bild 11.2.3.1-2.1 dargestellten Fall. Man erkennt die Abhängigkeit von der Betriebszeit. Dabei ist die **Streuung typischerweise groß**. Deshalb erfordert die Regenerationsfähigkeit einen **ausreichenden Sicherheitsabstand**.

Im Diagramm unten sind **Versuchsergebnisse** an gelaufenen Schaufeln ohne HIP- und mit

HIP-Regeneration dargestellt. Typisch ist ein **ausgeprägteres Anfangs-(primäres) und tertres Kriechen** der regenerierten Schaufeln. Bei 75% abgelaufener Lebensdauer ließ sich eine **Verlängerung um 50%** erzielen. Diese würde für ein weiteres berholintervall ausreichen. Ein Absinken der Schwingfestigkeit (HCF) oder eine merkliche Versprödung trat nicht auf, obwohl die Aushärtungsphase vom Neuteilzustand abwich.

Literatur zu Kapitel 11.2.3

- 11.2.3-1** H.Huff, J.Wortmann, „Repair and Regeneration of Turbine Blades, Vanes and Discs“, Conference Proceedings AGARD-CP-317, „53rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel“, Noordwijkerhout, the Netherlands, 27 September - 2 October 1981, Seite 13.1-13.7.
- 11.2.3-2** „Heiltherapie für Triebwerks-Leitschaufeln“ (Hochtemperatur-Breitspaltlötverfahren), Zeitschrift „VDI Nachrichten“, Nr. 48/29.November 1985.
- 11.2.3-3** K.L.Cheung, C.C.Leach, K.P.Willett, A.K.Koul, „Rejuvenation of used turbine blades by hot isostatic pressing and heat treatment“, Conference Proceedings AGARD-CP-317, „53rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel“, Noordwijkerhout, the Netherlands, 27 September - 2 October 1981, Seite 10.1-10.6.
- 11.2.3-4** W.J.van der Vet, „HIP-Process, Potentials and Applications“, Conference Proceedings AGARD-CP-317, „53rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel“, Noordwijkerhout, the Netherlands, 27 September - 2 October 1981, Seite 11.1-11.16.
- 11.2.3-5** P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 26 - 39, Seite 163.
- 11.2.3-6** D.Dilba, „Layer by Layer“, Veröffentlichung der Fa. MTU, „Report“ 1/2012, www.mtu.de, Seite 20-25,
- 11.2.3-7** J.L. Bartos, „P/M Superalloys for Military Gas Turbine Applications“, Proceedings Paper des „1979 P/M in Defense Technology Seminar“ der MPIF, Yuma, Arizona, Seite 81-112.
- 11.2.3-8** Zeitschrift „PM Powder Metallurgy“, 12, 1980, 4 Seite 507.

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.

ASM 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.