



Deutscher Verband für  
Materialforschung und  
-prüfung e.V.

# **DVM-Bericht 1681**

## **Erneuerbare Energien – Herausforderungen für die Werkstofftechnik**

**DVM-Tag 2014**



08. + 09. Mai 2014  
Berlin



DEUTSCHER VERBAND FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG e.V.  
Gutshaus, Schloßstraße 48, 12165 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 811 30 66 · Fax: +49 (0)30 811 93 59  
office@dvm-berlin.de - www.dvm-berlin.de

## **DVM-Bericht 1681**

# **Erneuerbare Energien – Herausforderungen für die Werkstofftechnik**

**DVM-TAG 2014**

08. + 09. Mai 2014  
Berlin

# HERAUSFORDERUNGEN AN SCHMIEDE- UND GUSSKOM- PONENTEN IN WINDENERGIEANLAGEN

M. Decker, M. Eiber, S. Rödling

IABG mbH, Ottobrunn

## Zusammenfassung:

Kraftübertragende Schmiede- und Gusskomponenten in Windkraftanlagen stellen durch die hohen Belastungen, dicke Bauteilquerschnitte und die geforderte Ausfallsicherheit besondere Herausforderungen an die betriebsfeste Auslegung und Absicherung. Im vorliegenden Beitrag werden spezifische Einflüsse auf die Festigkeit solcher Komponenten dargestellt. Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse wird die Nutzung örtlicher Festigkeitskennwerte vorgeschlagen. Dies mündet in Anregungen zu einem integralen Absicherungskonzept aus experimenteller Kennwertermittlung, rechnerischem Nachweis und Qualitätssicherung. Zudem wird auf die Bedeutung der durchgängigen Begleitung der Prozesse durch metallographische Analysen eingegangen.

**Stichwörter:** Windenergie, Gießen, Schmieden, Festigkeit, Qualitätssicherung

# CHALLENGES FOR FORGED AND CAST COMPONENTS IN WINDTURBINES

## Abstract:

Cast or forged components within the drive train of wind turbines show large dimensions, are subject to high loads and must fulfill high levels of reliability. This generates challenges for the process of a durable design and validation. In this paper, specific influences on the strength of these components are shown. To cover these influences, the use of local strength criteria is proposed. An integral concept for design and validation using experimental values, computational analysis and quality control is shown, integrating metallographic analyses throughout the process.

**Keywords:** Wind energy, casting, forging, strength, quality assurance

## Einleitung

Neben optimaler Aufstellung, Dimensionierung und Anlagenführung ist die sichere Auslegung von Windkraftanlagen gegen die im Betrieb auftretenden Lasten ausschlaggebend für einen wirtschaftlichen Betrieb. Der Trend geht zu größeren Anlagen, wobei sich eine Zunahme der jährlichen Ausfallrate mit steigender Leistung zeigt [1]. Ca. 36% der Schäden an Windkraftanlagen beruhen auf Bauteildefekten, 63% der Störungen führen zu Anlagenstillstand von durchschnittlich 6 Tagen [2]. Wegen der eingeschränkten Zugänglichkeit ist insbesondere bei Off-Shore Anlagen eine Minimierung der Schadfälle und der damit verbundenen Ausfallzeiten von großer wirtschaftlicher Bedeutung für die Betreiber.

Neben der Sicherstellung eines zuverlässigen Anlagenbetriebs ist auch eine Reduktion der Entwicklungs- und Herstellkosten von Bedeutung. Mit zunehmendem Wettbewerb steigt die Wichtigkeit effizienter Methoden für Auslegung, Nachweis und qualitätsgesicherter Produktion, um bei optimaler Werkstoffausnutzung Kostenvorteile sicher realisieren zu können.

Der vorliegende Beitrag beruht auf Arbeiten, die im 1. DVM-Workshop Energietechnik erstmalig vorgestellt und diskutiert wurden [3]. Er soll Aspekte der Auslegung und Nachweisführung von Schmiede- und Gussbauteilen in Windenergieanlagen aufzeigen, die aus Sicht der Autoren in derzeitigen Regelwerken nur bedingt berücksichtigt werden, wodurch zum einen der Werkstoff nicht optimal ausgelastet, zum anderen Schäden nicht sicher vermieden werden können.

### **Festigkeitsnachweis für Komponenten in Windkraftanlagen**

Die betriebsfeste Dimensionierung von Windkraftanlagen sowie der Nachweis der geforderten Betriebsfestigkeit im Einsatz stellen besondere Herausforderungen an das Konzept der Nachweisführung. Im Fokus dieses Beitrags stehen Schmiede- und Gusskomponenten im Antriebstrang. Hier müssen bei niedrigen Drehzahlen große Leistungen mit hohen Drehmomenten übertragen werden. Wegen der Größe der Bauteile sowie der hohen Lasten ist ein experimenteller Betriebsfestigkeitsnachweis mit sehr großem Aufwand verbunden und kann wirtschaftlich sinnvoll nur als ergänzender Nachweis eingesetzt werden, wenn zuvor eine rechnerische oder experimentelle Betriebsfestigkeitsbewertung der einzelnen Komponenten erfolgt ist. Wegen der Möglichkeit der Kopplung an FE-Ergebnisse hat sich für die rechnerische Festigkeitsanalyse die Bewertung auf Basis örtlicher Spannungen oder Dehnungen durchgesetzt.

Schon 1977 wurde in [4] darauf hingewiesen, dass für eine Bewertung der Anrisslebensdauer auf Basis örtlicher Beanspruchungen technologische Einflüsse wie Oberflächenbeschaffenheit, Eigenspannungen und örtlich veränderliche Werkstoffkennwerte berücksichtigt werden müssen. In beispielweise [5] werden einige Effekte durch technologischen Größenfaktor, Rauheitsfaktor und Randschichtfaktor behandelt. Der technologische Größenfaktor wird dabei auf den gesamten Bauteilquerschnitt angewendet. Damit kann der Einfluss von unterschiedlichen Zuständen des Gefüges über den Bauteilquerschnitt nicht berücksichtigt werden. Insbesondere bei großen Schmiede- und Gussbauteilen muss hiervon aber ausgegangen werden. In [6] werden zusätzliche Angaben zu Herstellparametern und der Forderung nach z.B. Freiheit von Lunkern, nichtmetallischen Einschlüssen etc. ergänzt, welche jedoch nicht genauer spezifiziert werden und deren Einfluss nicht quantitativ bewertet wird.

Für eine sichere Bauteilbemessung nach diesen Richtlinien muss ein konservativer Ansatz gewählt werden, der den schlechtest anzunehmenden Werkstoffzustand für das gesamte Bauteilvolumen annimmt. Unter Biegung und Torsion treten an der Oberfläche sowie in den oberflächennahen Bereichen eines Bauteils höhere örtliche Beanspruchungen auf als im Kern. In Kerben wird dieser Effekt noch deutlich verstärkt. Wenn nun die geforderten Festigkeitskennwerte aus den Beanspruchungen in den hoch beanspruchten Bereichen festgelegt werden, führt diese in den meist deutlich größeren niedrig beanspruchten Bereichen zu Werkstoffausnutzung und Überdimensionierung.

Im Folgenden werden Einflüsse auf die örtliche Schwingfestigkeit aufgezeigt, die bei Schmiede- und Gusskomponenten berücksichtigt werden sollten, um ein Optimum an Werkstoffausnutzung und Ausfallsicherheit zu erzielen. Außerdem werden Anregung zur Integration der Metallographie und Schadensanalyse in den Auslegungs- und Nachweisprozess gegeben.

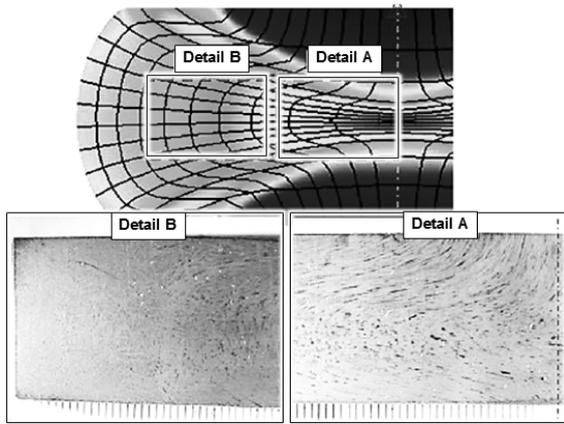
### **Festigkeitsbewertung Schmiedekomponenten**

Die Materialausnutzung und Zuverlässigkeit von geschmiedeten Bauteilen kann optimiert werden, wenn die herstellbedingten Einflüsse auf die lokalen Werkstoffeigenschaften berücksichtigt werden. Zu Oberfläche und Randzone liegen umfangreiche Untersuchungen vor (z.B. [7], [8]). Diese werden in Richtlinien für den Festigkeitsnachweis bereits berücksichtigt und werden in diesem Beitrag nicht näher behandelt, obwohl aus Sicht der Autoren auch hier Möglichkeiten zur Optimierung bestehen.

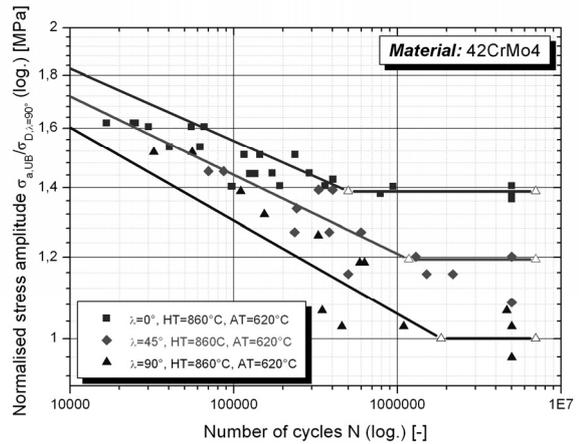
Im Ausgangsmaterial für Schmiedebauteile liegen in der Praxis Ungängen in Form von Seigerungen und nichtmetallischen Einschlüssen vor. Durch den Schmiedeprozess wird der Werkstoff örtlich sehr unterschiedlich verformt. Dies führt zu lokal veränderlichem Gefüge, da die Seigerungen dadurch unterschiedlich deformiert und ausgerichtet werden (Bild 1). Bild 2 zeigt beispielhaft die Schwingfestigkeit von glatten Rundproben aus 42CrMo4, die unter verschiedenen Winkeln  $\lambda$  zu den Seigerungen aus Schmiedestücken entnommen wurden [9]. Die Werte wurden auf die Schwingfestigkeit senkrecht zur Seigerungsrichtung ( $\lambda = 90^\circ$ ) bezogen und zeigen einen Anstieg der technischen Dauerfestigkeit um 40% für Proben, die parallel zur Seigerungsrichtung entnommen wurden. Dieser Einfluss sollte bei der Ermittlung der Schwingfestigkeitskennwerte und der Übertragung auf das Bauteil berücksichtigt werden.

Bild 3 zeigt Spannung-Dehnungs-Kurven von 42CrMo4 nach der Wärmebehandlung mit unterschiedlichen Anlasstemperaturen. Ähnliche Einflüsse zeigen sich auf die Schwingfestigkeit, wobei eine Korrelation zur Mikrohärtigkeit besteht [9]. Diese Effekte der Wärmebehandlung sind in der Auslegung und Qualitätssicherung zu berücksichtigen. Um die positiven Effekte sicher auszunutzen zu können, ist eine detaillierte Dokumentation und Überwachung der Herstellparameter erforderlich.

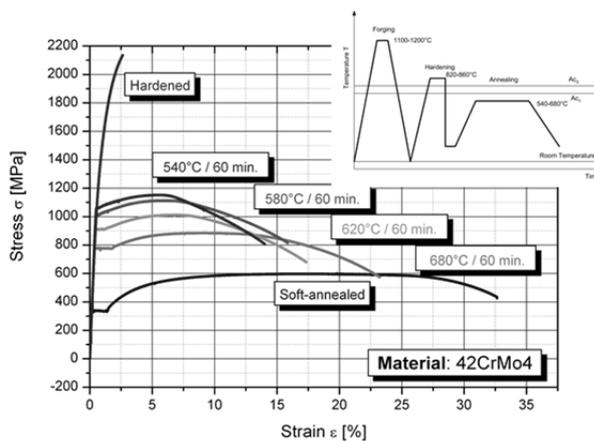
Nichtmetallische Einschlüsse aus der Herstellung des Schmiederohlings können insbesondere bei höherfesten Werkstoffen zu Ausfällen unter zyklischer Belastung führen. Bild 4 zeigt beispielhaft Ergebnisse aus Schwingfestigkeitsversuchen an Fahrzeugtragfedern. Von 25 Prüflingen versagte ein Prüfling nach verhältnismäßig geringer Schwingzahl bei einer Lastamplitude, bei der auch Durchläufer auftraten. Das Versagen konnte fraktographisch auf einen nichtmetallischen Einschluss zurückgeführt werden. Zahlreiche Ergebnisse in [10], [11] und laufenden Untersuchungen der Autoren zeigen die Präsenz dieser Einschlüsse in den meisten untersuchten Werkstoffen und Bauteilen. Sie treten mit einer bestimmten Größenverteilung über das gesamte Werkstoffvolumen auf und können in Abhängigkeit von Einschlussgröße und örtlicher Beanspruchung rissinitiiierend wirken. In [12] wird der Zusammenhang zwischen Einschlussgröße und lokal ausnutzbarer Schwingfestigkeit bruchmechanisch hergeleitet und beschrieben (Bild 5) sowie eine Möglichkeit aufgezeigt, diese durch zyklische Versuche sicher zu detektieren und durch statistische Auswertung als Grundlage für eine Qualitätsrichtlinie zu verwenden (Bild 6).



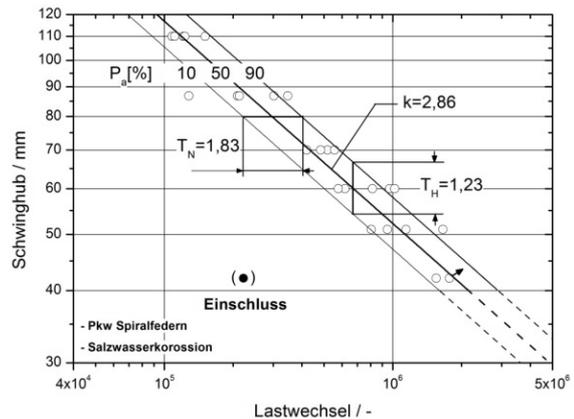
**Bild 1:** Einfluss des Umformgrades auf die örtliche Mikrostruktur (oben: Umformsimulation, unten: Gefüge) [9]



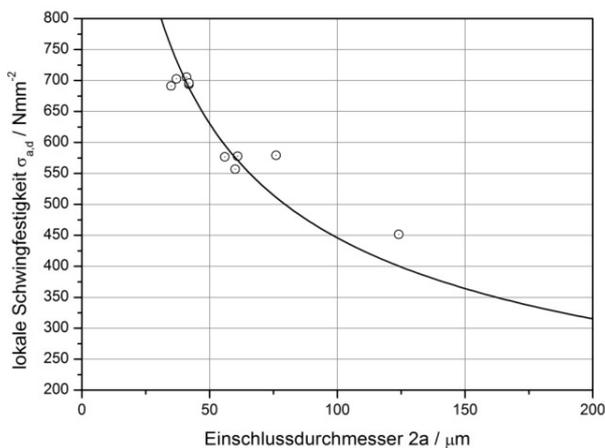
**Bild 2:** Einfluss der Probenorientierung auf die Schwingfestigkeit ( $\lambda$  = Winkel der Probenlängsachse zur Seigerungslage) [9]



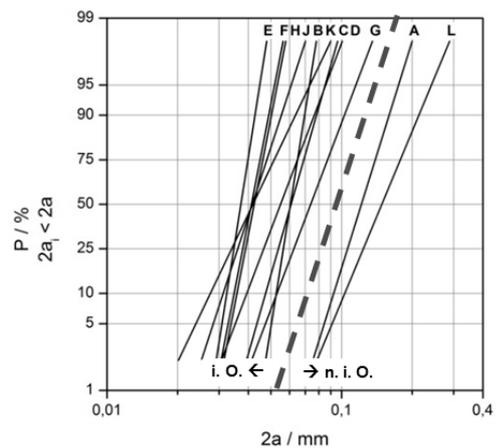
**Bild 3:** Einfluss der Wärmebehandlung auf die statische Festigkeit [9]



**Bild 4:** Einfluss von nichtmetallischen Einschlüssen auf die Schwingfestigkeit [10]



**Bild 5:** Einfluss der Einschlussgröße auf die ausnutzbare lokale Schwingfestigkeit hochfester Stähle [12]



**Bild 6:** Größenverteilung von Fehlstellen in Hochfesten Stählen unterschiedlicher Stahlhersteller „A“ – „L“ [11]

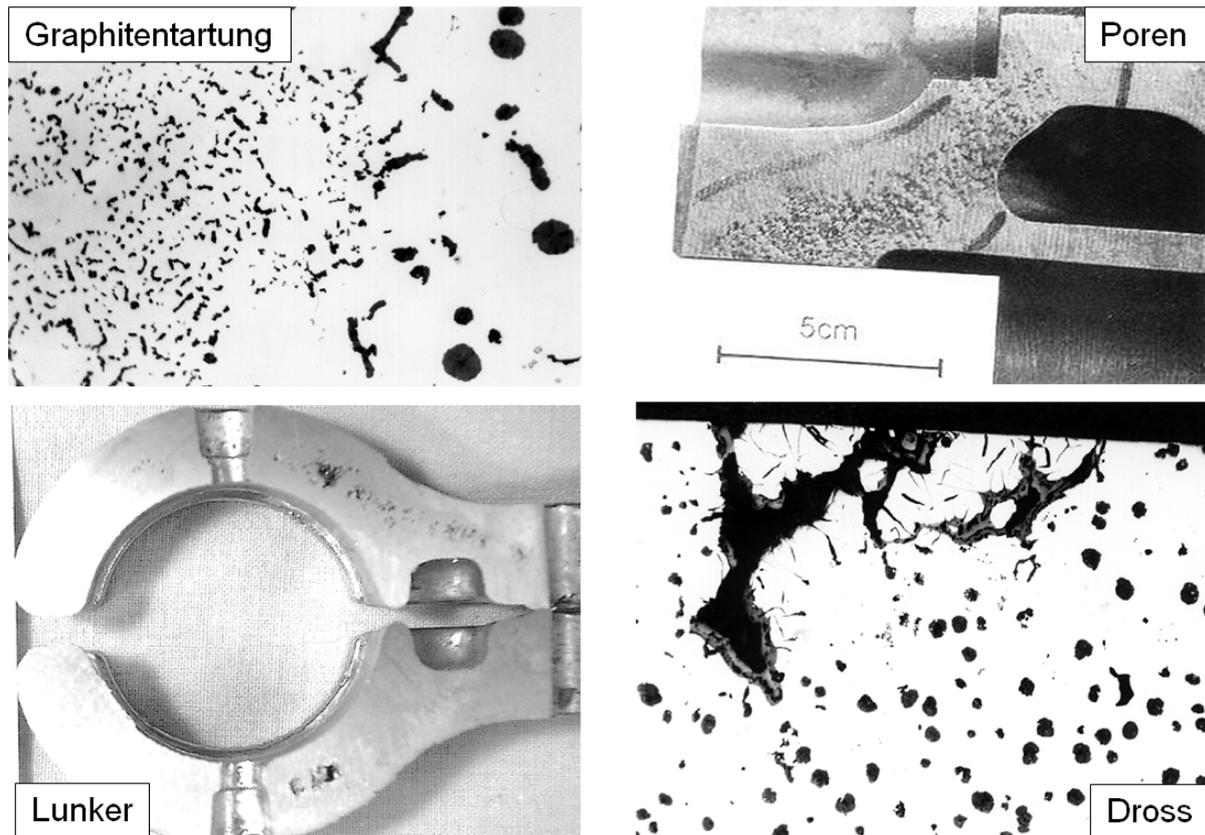
## Festigkeitsbewertung Gusskomponenten

In der aktuellen Auslegung von dickwandigen Gussbauteilen wird oft von einem linearen Zusammenhang zwischen Dehngrenze oder Zugfestigkeit und den Schwingfestigkeitseigenschaften ausgegangen. Dieser Zusammenhang lässt sich gut an ideal gegossenen Probestäben zeigen. Versuche an Proben aus Bauteilen, die in einem seriennahen Prozess hergestellt wurden, zeigen aber oft zusätzliche Einflüsse, die die Schwingfestigkeit deutlich stärker beeinflussen als die statischen Kennwerte. Bei dickwandigen Gussbauteilen können vereinzelte Gefügeungängen in Form von Poren oder großen Graphitkugeln auftreten. Bei nahezu unveränderter statischer Festigkeit kann die Schwingfestigkeit deutlich reduziert sein, besonders bei höherfesten Gusswerkstoffen. In aktuellen Richtlinien zur rechnerischen Bewertung der Betriebsfestigkeit wie [5] wird dies durch Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Wenn diese den Einfluss für höherfeste Gusswerkstoffe abdecken, sind sie für duktile und niedriger feste Gusswerkstoffe tendenziell zu scharf, so dass das Potential des Materials nicht optimal ausgenutzt werden kann.

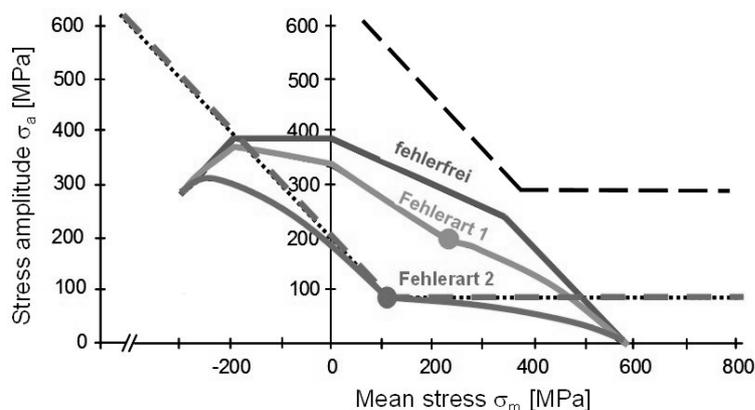
Gerade bei dickwandigen Gussbauteilen sind die hochbeanspruchten Bereiche, in denen eine hohe Schwingfestigkeit sichergestellt werden muss, relativ klein im Vergleich zum Gesamtvolumen des Bauteils. Große Volumenbereiche sind oft nur sehr gering beansprucht. Zur Reduzierung der Ausschussquoten und damit zur Verbesserung der Betriebswirtschaftlichkeit in der Produktion von Windenergieanlagen ist deshalb die Frage interessant, an welchen Stellen im Bauteil und in welcher Größe Gefügedefekte wie Chunky-Graphit, Dross oder auch einzelne Lunker (vgl. Bild 7) aus Sicht der Betriebsfestigkeit tolerierbar sind. Zur Beantwortung dieser Fragestellung kann mit relativ geringem Aufwand eine Materialdatenbasis durch an Bauteilen entnommene Proben ermittelt werden, welche folgende für die Betriebsfestigkeit wichtigen Haupteinflussgrößen beschreibt:

1. **Mittelspannungsempfindlichkeit:** Je größer ein Gefügedefekt ist, desto eher kann dieser als Initialriss aufgefasst werden, dessen Verhalten sich bruchmechanisch beschreiben lässt. Aus der linear elastischen Bruchmechanik sind Mittelspannungsempfindlichkeiten bekannt, welche deutlich höher liegen als jene von defekt- bzw. ungängenfreien Werkstoffen. Für defekt- bzw. ungängenbehaftete Werkstoffe ist damit eine Mittelspannungsempfindlichkeit zu erwarten, die von der Ausprägung der Ungängen abhängt und zwischen diesen Grenzen liegt. Für die rechnerische Betriebsfestigkeitsbewertung auf Basis örtlicher Beanspruchungen kann dies durch Gefügefehler- bzw. Ungängenart-spezifische Haigh-Diagramme berücksichtigt werden (Bild 8), die experimentell ermittelt und metallographisch mit den Fehlern bzw. Ungängen korreliert werden.
2. **Stützwirkung:** Je nach Gefügefehler bzw. -ungänge kann sich auch der Effekt der Stützwirkung signifikant ändern. Wenn für einen fehler- und ungeängenbehafteten Werkstoff bereits Wöhlerlinien und Haigh-Diagramme an ungekerbten Proben unter axialer Zug-Druck-Belastung vorliegen, kann die Aussagegüte der Berechnung bereits durch eine zusätzliche Wöhlerlinie unter Biegebelastung mit geringem Aufwand deutlich verbessert werden. Unterschiedliche Modelle zur Berücksichtigung der Stützwirkung werden ausführlich in [13] diskutiert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ausschussquote gesenkt und die Materialausnutzung gesteigert werden kann, indem für unterschiedliche Gusswerkstoffklassen spezifische Datensätze je nach Gefügeart bzw. Gefügefehler ermittelt werden. Durch die Berücksichtigung der örtlichen Festigkeitskennwerte lässt sich zudem die Genauigkeit der rechnerischen Betriebsfestigkeitsbewertung gegenüber z.B. [5] verbessern. Richtlinien renommierter Zertifizierungsgesellschaften wie [6] sehen anwendungsspezifische Auslegungsrichtlinien grundsätzlich vor und eröffnen damit den erforderlichen Spielraum zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Windenergieanlagen.



**Bild 7: Fehlstellen in Gusskomponenten**



**Bild 8: Gefügeengängen- bzw. Gefügeartspezifische Haigh-Diagramme (schematisch)**

## Qualitätssicherung

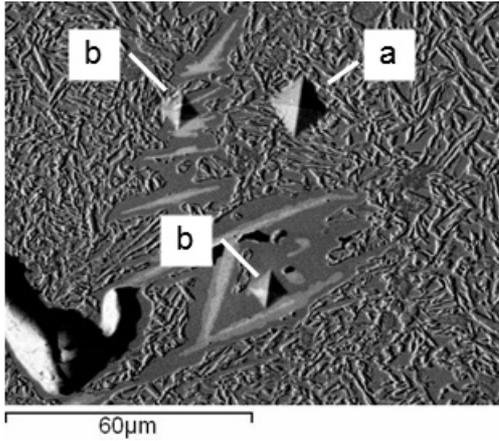
Für eine sichere Bewertung der Schwingfestigkeit von Bauteilen auf Basis von Ergebnissen aus Schwingfestigkeitsversuchen an Proben muss sichergestellt sein, dass die ermittelten Kennwerte auf das Bauteil übertragbar sind. Hierzu ist es zweckmäßig aber noch nicht verbreiteter Standard, diese Kennwertermittlung durch metallographische Untersuchungen zu begleiten und die Ergebnisse zu korrelieren. Insbesondere bei Bauteilen mit großen Abmessungen müssen hier auch die ggf. unterschiedlichen Zustände über die Bauteildicke erfasst werden und in die Bewertung einfließen.

Zur Qualifizierung von Gusswerkstoffen sollte die Mikrostruktur in den unterschiedlichen Bereichen der Komponenten durch eine metallografische Untersuchung mit lichtmikroskopischer Gefügedokumentation und bildanalytischer Auswertung bewertet werden. Dabei ist das Vorhandensein von Fehlstellen wie Rissen, Poren oder Lunkern ebenso zu untersuchen wie die Größenverteilung des Graphits, die Nodularität bei sphärischer Graphitbildung sowie die Ausbildung der Gefügematrix und etwaiger intermetallischen Phasen (Bild 9). Durch eine qualitative und quantitative Ergebnisdarstellung sind Unterschiede gut vergleichbar und können zur Werkstoffqualifizierung herangezogen werden. Dadurch ist eine anforderungsgerechte Werkstoffspezifizierung möglich.

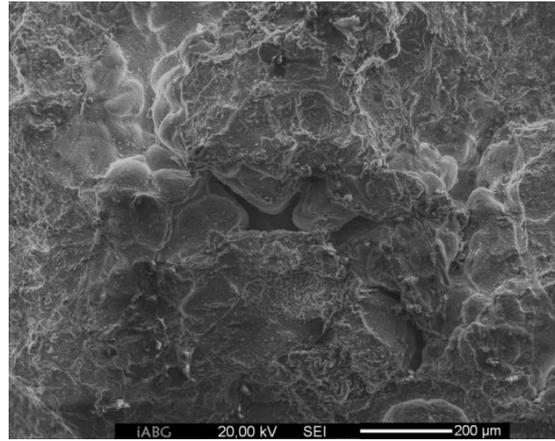
Bei großen Gusskomponenten kann so untersucht werden, ob über den Bauteilquerschnitt eine für die örtliche Beanspruchung geeignete Mikrostruktur vorhanden ist. Umfangreiche Untersuchungen der Autoren zeigen, dass sich aufgrund von örtlich unterschiedlichen Abkühlbedingungen in dickwandigen Gusswerkstoffen örtlich unterschiedliche Gefügestrukturen ausbilden können und man nicht von einer einheitlichen Mikrostruktur ausgehen kann. Randbereiche können entartete Graphitstrukturen zeigen, während im Kernbereich eine den Festigkeitsvorgaben entsprechende Mikrostruktur vorliegt (Bild 11).

Die rasterelektronenmikroskopische Bewertung von Bruchflächen an Proben aus Schwingfestigkeitsversuchen zeigt die bruchauslösenden Effekte wie z.B. Oberflächendefekte, Lunker, Seigerungen oder nichtmetallische Einschlüsse (Bild 10). Aus der Größenbestimmung der rissinitiierenden Elemente kann die Angabe eines erforderlichen Reinheitsgrades des Werkstoffes abgeleitet werden und in die Werkstoffspezifikation des Bauteils einfließen.

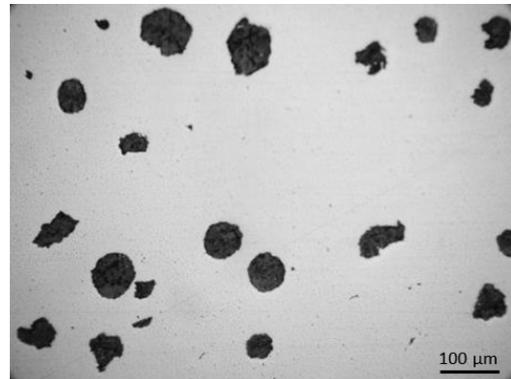
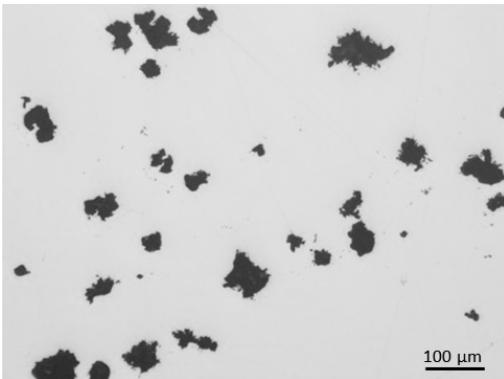
Mit zerstörungsfreien Prüfmethoden können Bauteile an ihrer Oberfläche und in ihrem Volumen auf Fehlstellen überprüft werden. Bei der Volumenprüfung von großen Bauteilen oder Komponenten ist eine Bewertung detektierter Anzeigen jedoch oft sehr schwierig, da hierfür optimale Prüfbedingungen und eine genaue Kenntnis aller Werkstoffeigenschaften erforderlich sind. Zudem führen komplexe Geometrien häufig zu Scheinanzeigen, welche fehlinterpretiert werden können. Oft zeigt sich, dass Abnahmevorschriften zur maximal zulässigen Ungänzengröße nicht auf das gesamte Bauteil anwendbar sind und somit nicht für eine Qualitätsprüfung herangezogen werden können. Hier gilt es, neben der Optimierung der Werkstoffeigenschaften sowie der Verfahren zur Festigkeitsbewertung auch die Methoden der Qualitätssicherung kritisch zu überprüfen, weiterzuentwickeln und gemäß ihren Möglichkeiten in den Absicherungsprozess zu integrieren.



**Bild 9: Mikrohärteeindrücke in Gussmatrix (a) und in einer intermetallischen Phase (b)**



**Bild 10: Lunker innerhalb einer Gussbruchfläche – frei erstarrte Oberflächen**



**Bild 11: ADI-Guss, Graphitusbildung im Bauteilrandbereich (links) und Bauteilmitte (rechts)**

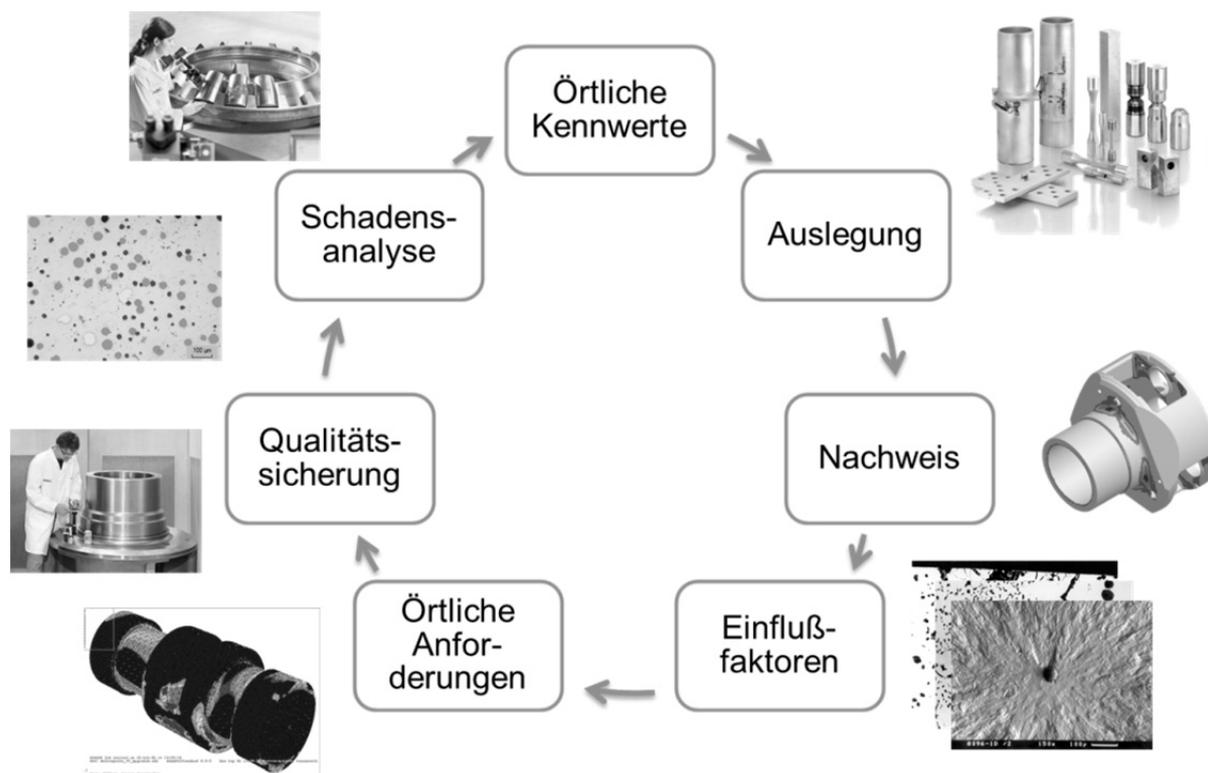
## Schadensfälle

Schäden im Betrieb verursachen Kosten und sind schlecht für das Image. Sie sind aber auch wertvolles Abbild der Vorgänge im Einsatz. Durch strukturierte Schadensanalysen mit Bestimmung der Schadensmechanismen können wichtige Erkenntnisse über die Schadensursachen und möglich Maßnahmen zur Schadensvermeidung gewonnen werden. Diese Erkenntnisse können aber auch zur kontinuierlichen Validierung, Justierung und ggf. Erweiterung der Methoden für Auslegung, Nachweis und Qualitätssicherung eingesetzt werden.

## Integrales Konzept für Auslegung und Absicherung

Die dargestellten Einflüsse auf die lokale Festigkeit großvolumiger Schmiede- und Gussbauteile sowie die Tatsache, dass diese in aktuellen Vorschriften für Auslegung und Nachweis nur teilweise abgebildet sind, verdeutlichen sowohl das Potential als auch die Risiken, die in diesen Komponenten ruhen. Um die dargestellten Erkenntnisse im Sinne einer optimalen Werkstoffausnutzung abgesichert ausnützen zu können, ist in Bild 12 ein integrales Auslegungs- und Absicherungskonzept skizziert. Durch Auslegung und Festigkeitsnachweis auf Basis örtlicher Kennwerte, die mit Bezug zu Lage und Orientierung im Bauteil ermittelt und mit metallographischen Befunden korreliert werden, wird das lokale Potential des Werkstoffs optimal ausgeschöpft.

Festigkeitsmindernde Einflüsse von z.B. Gefügefehlern oder nichtmetallischen Einschlüssen werden experimentell quantifiziert und daraus zulässige Fehlerausprägungen abhängig von den örtlichen Beanspruchungen abgeleitet. Die durchgängige Einbeziehung der metallographischer Methoden ermöglicht eine abgesicherte Übertragung der Ergebnisse aus Probenversuchen auf das Bauteil sowie die Ableitung von Beurteilungskriterien für die Qualitätssicherung. Die strukturierte Analyse von Schäden aus Proben- und Bauteilversuchen sowie aus dem realen Betriebseinsatz ermöglicht zuletzt eine exakte Validierung und Optimierung der eingesetzten Methoden. Bei systematischer Erfassung können auch Befunde aus vergleichbaren Bauteilen einfließen. Dies ermöglicht damit eine fortlaufende Validierung und Optimierung der Maßstäbe über die Bauteile und Generationen hinweg.



**Bild 12: Konzept für die Schwingfestigkeitsbewertung großer Schmiede- und Gussbauteile [3]**

## Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden am Beispiel großvolumiger Guss- und Schmiedebauteile aus dem Antriebstrang von Windkraftanlagen Möglichkeiten aufgezeigt, wie unter Verwendung lokaler und mit metallographischen Befunden korrelierter Festigkeitskennwerte die Werkstoffausnutzung unter Berücksichtigung örtlich veränderlicher Materialparameter erhöht werden kann. Die dargestellten Ergebnisse aus abgeschlossenen und laufenden Untersuchungen zeigen deutliche Einflüsse von z.B. Umformgrad, Gefüge und Materialreinheit auf die Schwingfestigkeit, die aus Sicht der Autoren in aktuellen Richtlinien für Auslegung und Festigkeitsnachweis nur bedingt berücksichtigt werden.

Das vorgestellte integrale Konzept zur Auslegung und Absicherung großvolumiger Guss- und Schmiedebauteile kann anwendungsspezifisch deutliches Optimierungspotential erschließen. Für eine breite Ausnutzung der Effekte und eine Einbindung in allgemeine Regelwerke sind weitere umfangreiche weitere Untersuchungen erforderlich und sinnvoll.

### **Literatur**

- [1] Hahn, B., M. Durstewitz, K. Rohring: Reliability of Wind Turbines, Wind Energie, Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 329-332
- [2] Sensen, E.: Schäden an Windenergieanlagen aus Sicht des Versicherers, VDI-Jahrestagung Schadensanalyse 36, VDI, Düsseldorf, 2010, S. 137-174
- [3] Decker, M., S. Guder, S. Rödling, J. Fröschl: Herausforderungen an Schmiedeguss- und Lagerkomponenten in Windenergieanlagen, DVM Workshop Energietechnik, Stuttgart, 2013
- [4] Bergmann, J., T. Seeger: Über neue Verfahren der Anrißlebensdauer vorhersage für schwingbelastete Bauteile auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen, Z. Werkstofftech. 8, 1977, S. 89-100
- [5] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 5. Ausgabe, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt am Main, 2003
- [6] Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen, Ausgabe 2010, Germanischer Lloyd, Hamburg, 2010
- [7] Siebel, E., M. Gaier: Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile, VDI-Zeitschrift 98, 1956, S. 1715-1723
- [8] Kloos, K.-H.: Einfluss des Oberflächenzustandes und der Probengröße auf die Schwingfestigkeitseigenschaften, VDI Bericht 268 (1976), S. 63-76
- [9] Fröschl, J.: Fatigue behaviour of forged components: Technological effects and multiaxial fatigue, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2006
- [10] Hück, M.: Grundsatzuntersuchung über die Betriebsfestigkeit von Achsfedern am Beispiel der W210-HA-Federn, IABG Bericht B-TA-3903, Ottobrunn, 2003
- [11] Georges, T.: Zur Gewichtsreduzierung von Fahrzeugfedern unter besonderer Beachtung des schwingfestigkeitsmindernden Einflusses bruchauslösender Fehlstellen im Halbzeug Federdraht (Bde. Reihe 5, Nr. 593), VDI Fortschritts-Bericht, 2009
- [12] Rödling, S., J. Fröschl, M. Hück, M. Decker: Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf zulässige HCF-Bemessungskennwerte, Materials Testing 2011 53:7-8, 455-462
- [13] Fröschl, J., M. Decker, W. Eichlseder: Neuer Ansatz zur Bewertung von Stützwirkung und statistischem Größeneinfluss im Auslegungsprozess, Materials Testing 2011 53:7-8, 481-486