

Bild 4.16: Modellkörper für Schaufel-Scheibe-Verbindungen

Bei den experimentellen Untersuchungen kommen drei unterschiedliche geometrische Varianten des Modellkörpers zum Einsatz:

- Anstellwinkel  $\alpha = 0^\circ$ ,
- Anstellwinkel  $\alpha = 12^\circ$ ,
- Anstellwinkel  $\alpha = 25^\circ$ .

Die Definition des Anstellwinkels ist aus Bild 4.17 ersichtlich.

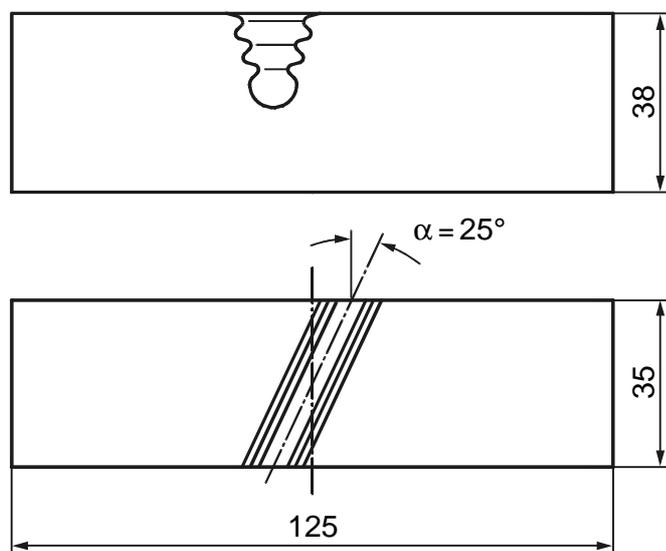


Bild 4.17: Definition des Anstellwinkels

Bei der Fertigung der Modellkörper wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass alle Rohlinge aus demselben Bereich des Halbzeugs entnommen werden. Hinsichtlich des Scheibenwerkstoffs IN 718 bedeutet dies beispielsweise, dass alle Modellkörper denselben Randabstand bei der Entnahme aufweisen, um eine möglichst einheitliche Korngröße zu gewährleisten, siehe Bild 4.18.

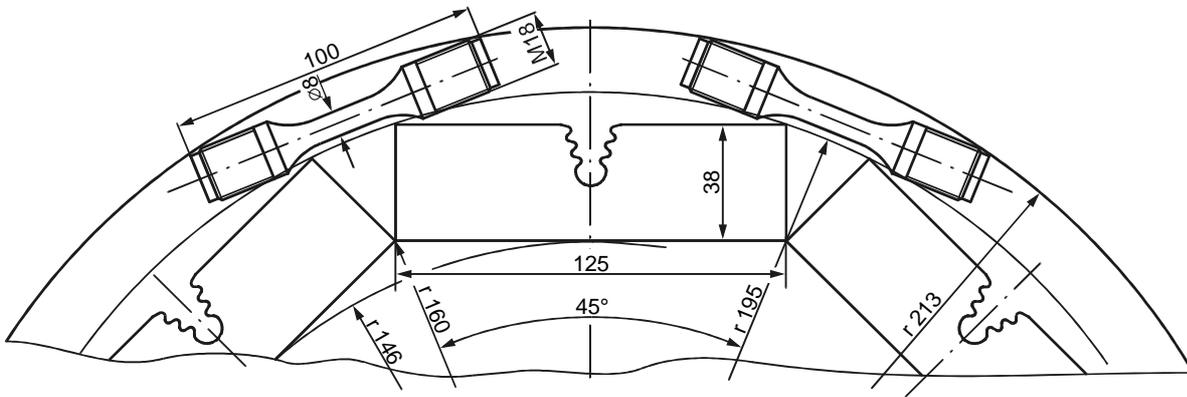


Bild 4.18: Entnahme der Rohlinge aus Halbzeug für IN 718

Darüber hinaus wurden aus den verbleibenden Reststücken die Rohlinge für die Basischarakterisierung entnommen. Um die LCF-Proben nicht aus anderen Bereichen des Halbzeugs entnehmen zu müssen, wurde dabei eine etwas verkleinerte Probenabmessung in Kauf genommen.

### **Versuchseinrichtung**

Zur Abbildung der Beanspruchung von Schaufel-Scheibe-Verbindungen von Gasturbinen mit Hilfe von einfachen Modellkörpern wurde eine spezielle Versuchseinrichtung entwickelt [81], siehe Bild 4.19. Dabei entspricht die Spannung in Schaufelrichtung der Radialspannung, während die Beanspruchung in Balkenlängsrichtung der Tangentialspannung in der Turbine entspricht.

Der mehrachsige komplexe Spannungszustand wird durch eine schwellende Zugbelastung der Schaufel, die Übertragung der Belastung auf die Scheibe durch die Kontaktstellen sowie durch eine möglichst günstige Anordnung der Lager erzeugt. Durch eine zusätzliche statische Vorspannkraft  $F_v$  kann die Wechselwirkung zwischen benachbarten Schaufeln insofern berücksichtigt werden, als auf diese Weise ein Teil der erzielten Aufbiegung der Scheibe wieder rückgängig gemacht wird. Dies entspricht im Prinzip den teilweise behinderten Verformungen in Gasturbinen infolge der Wechselwirkung der Schaufeln untereinander. Die konstante Vorspannkraft wird dabei durch einen Hydraulikzylinder aufgebracht, der eine maximale Kraft von  $F_v = 50 \text{ kN}$  ermöglicht.

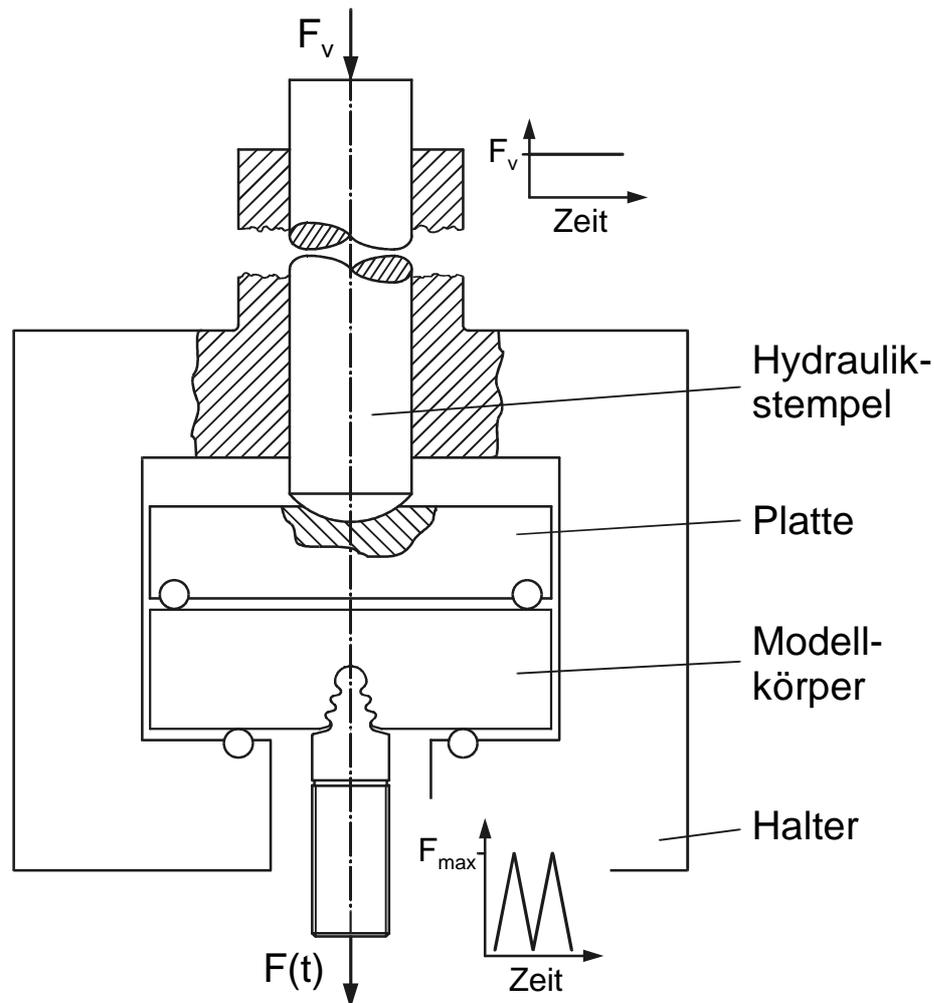


Bild 4.19: Versuchsvorrichtung für LCF-Versuche an Modellkörpern

Die Position der Rollen zur Einleitung der Vorspannkräfte bzw. als Lager sind das Ergebnis umfangreicher Parameterstudien mit FE-Berechnungen. Es konnte gezeigt werden, dass unter Beachtung der vorliegenden Randbedingungen die im Versuchsstand realisierte Lösung sowohl bezüglich der Lage der höchstbeanspruchten Stelle als auch im Hinblick auf die erzielbaren Spannungsgredienten die beste Übereinstimmung mit der Beanspruchung von Gasturbinen liefert [81].

### **Durchführung der LCF-Versuche**

Zur Durchführung der LCF-Versuche stehen zwei servohydraulische Prüfmaschinen (Hersteller: Walter & Bai bzw. Schenck) mit einer maximalen Prüflast von 500 kN zur Verfügung. Die Unterlast an der Schaufel beträgt bei sämtlichen Versuchen  $F_{\min} = 5 \text{ kN}$ . Die Schaufellast wird kraftkontrolliert mit 20 kN/s bei rampenförmigem zeitlichen Verlauf aufgebracht. Die Temperatur wird bei den Experimenten bei 550 °C direkt auf dem Modellkörper gemessen, wobei die maximale Abweichung  $\pm 1,5 \text{ °C}$  beträgt.

Bei Raumtemperatur wurden die Dehnungen in der Scheibe mit konventionellen DMS-Rosetten gemessen, während bei 550 °C kapazitive Hochtemperatur-DMS (HT-DMS) eingesetzt wurden. Bedingt durch die vergleichsweise große Messlänge des HT-DMS sind Messungen der Verformungen in Balkenlängsrichtung nur in einiger Entfernung von den hochbeanspruchten Stellen möglich, siehe Bild 4.20. Zusätzlich wurden bei einigen Versuchen auch Verschiebungen in der Schaufel erfasst.

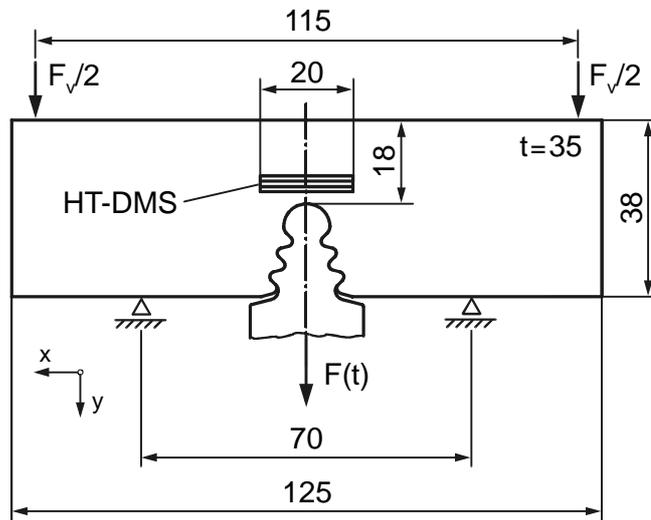


Bild 4.20: Wichtige geometrische Abmessungen des Modellkörpers

Der Einbau des Modellkörpers in die Versuchsvorrichtung sowie die Instrumentierung der Probe mit HT-DMS bei 550 °C ist in Bild 4.21 dargestellt.

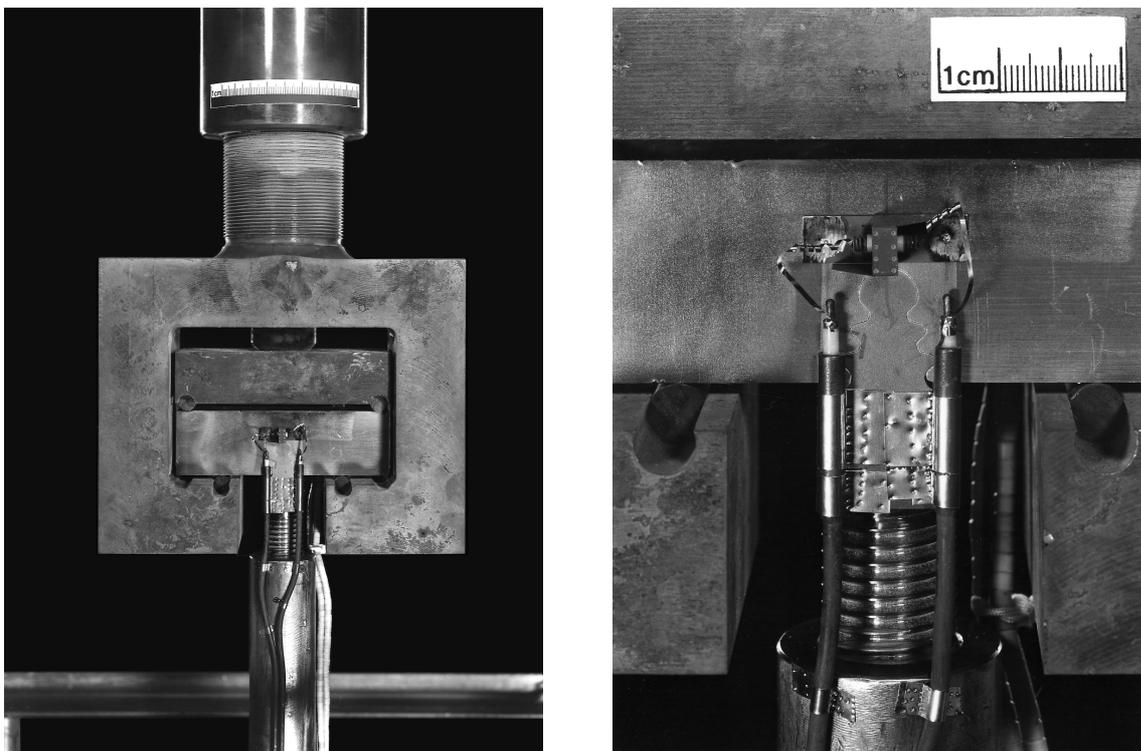


Bild 4.21: Instrumentierung des Modellkörpers mit HT-DMS

Die Feststellung des Anrisses in der Scheibe erfolgte anhand der Dehnungsmessung. Die Bestimmung des technischen Anrisses mit dem HT-DMS ist dabei sehr zuverlässig möglich, wie anhand von metallografischen Untersuchungen an den angerissenen Modellkörpern nachgewiesen werden konnte.

### Ergebnisse: LCF-Versuche ohne Haltezeit

An den Modellkörpern wurden insgesamt 13 LCF-Versuche ohne Haltezeit durchgeführt. Bedingt durch die vorliegende Geometrie und Belastung erfolgte das Versagen bei diesen Versuchen generell in der Scheibe. Einige der Modellkörper wurden dabei bis zum Bruch belastet. Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4.12 zusammengefasst dargestellt.

| Temp.  | Winkel | Probe    | $F_{\max}$ /kN | $F_V$ /kN | $N_A$ | $N_{AG}$ | $N_B$ |
|--------|--------|----------|----------------|-----------|-------|----------|-------|
| RT     | 0°     | MK-0°-1  | 145            | 50        | 13280 | 16960    | ---   |
| 550 °C | 0°     | MK-0°-5  | 96             | 50        | 9815  | ---      | 11576 |
|        |        | MK-0°-8  | 103            | 50        | 7950  | 8664     | ---   |
|        |        | MK-0°-4  | 111            | 50        | 2710  | ---      | 4001  |
|        |        | MK-0°-3  | 127            | 50        | 1395  | ---      | 2500  |
|        |        | MK-0°-2  | 134            | 50        | 1260  | ---      | 1705  |
|        | 12°    | MK-12°-1 | 96             | 50        | 8820  | ---      | 11077 |
|        |        | MK-12°-2 | 110            | 50        | 2630  | 3579     | ---   |
|        |        | MK-12°-6 | 126            | 50        | 1620  | 2550     | ---   |
|        | 25°    | MK-25°-1 | 95             | 50        | 31400 | 33591    | ---   |
|        |        | MK-25°-4 | 103            | 50        | 11380 | 14564    | ---   |
|        |        | MK-25°-2 | 110            | 50        | 5200  | 7310     | ---   |
|        |        | MK-25°-3 | 126            | 50        | 1740  | 2986     | ---   |

Tabelle 4.12: Versuchsergebnisse LCF-Versuche an Modellkörpern (ohne Haltezeit)

Auf weitere geplante Versuche bei Raumtemperatur wurde zugunsten einer besseren Belegung der Anrisskennlinien bei 550 °C verzichtet. Damit konnte eine für bauteilähnliche Experimente sehr gute statistische Belegung der Anrisskennlinien erreicht werden, die eine verlässliche Bewertung der durchgeführten Versuche ermöglicht. Es lässt sich festhalten, dass insgesamt eine geringe Streuung der Versuchsergebnisse vorliegt.

Die ertragbaren Lastwechselzahlen der LCF-Versuche an den Modellkörpern mit  $12^\circ$  Anstellwinkel sind im Anhang A.19 grafisch dargestellt. Die Anrisskennlinien für die Modellkörper bei  $550^\circ\text{C}$  mit  $\alpha = 0^\circ$  bzw.  $\alpha = 25^\circ$  sind in Bild 4.22 vergleichend dargestellt. Generell ist ersichtlich, dass der Einfluss des Anstellwinkels recht gering ist. Die schräg angestellten Modellkörper weisen dabei bei gleicher Last reproduzierbar eine etwas höhere Lebensdauer als die geraden Profile auf.

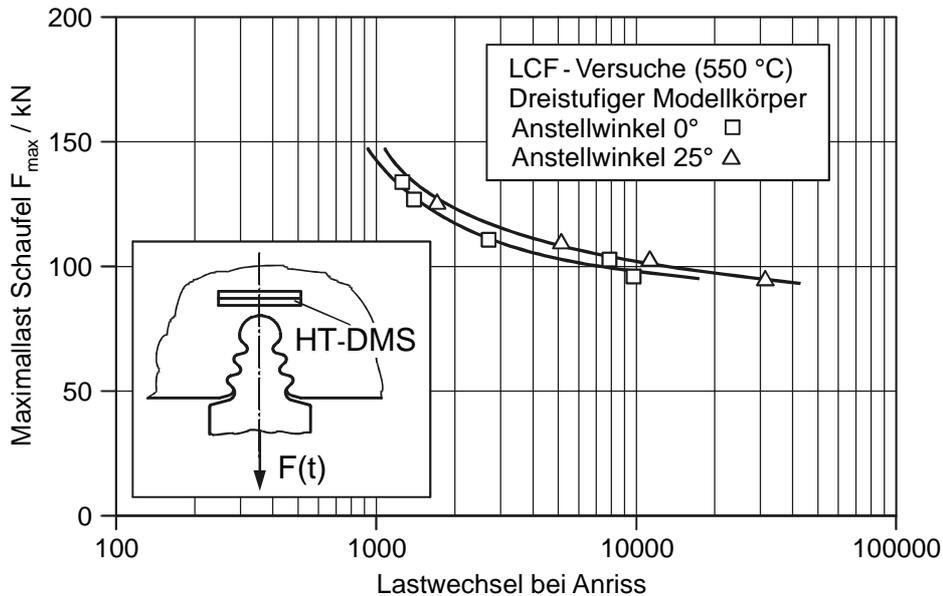


Bild 4.22: Einfluss des Anstellwinkels ( $550^\circ\text{C}$ , ohne Haltezeit)

Der charakteristische Verlauf der Ober- und Unterdehnungen in der Scheibe ist in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl für den Modellkörper MK- $0^\circ$ -2 dargestellt, siehe Bild 4.23.

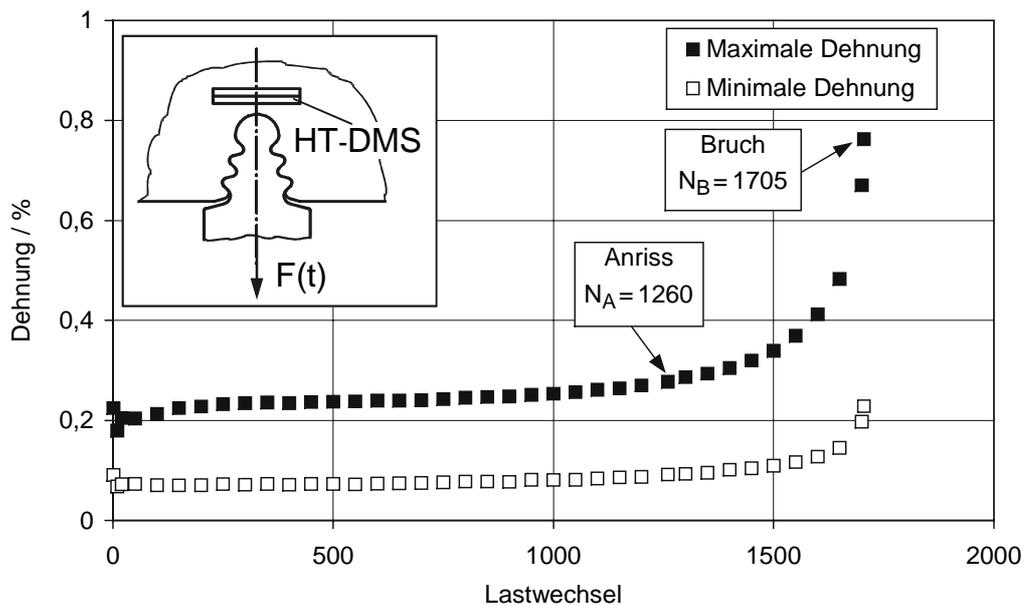
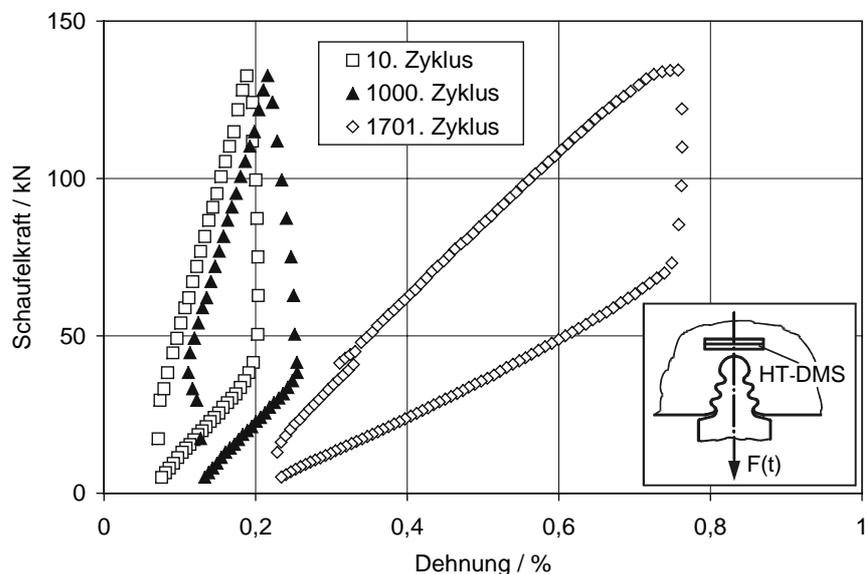


Bild 4.23: Gemessene Dehnungen in der Scheibe (MK- $0^\circ$ -2,  $550^\circ\text{C}$ )

In sämtlichen LCF-Versuchen war eine geringfügige Dehnungszunahme durch die Entfestigung des Scheibenwerkstoffs IN 718 während der ersten Lastwechsel zu beobachten. Daran schloss sich ein quasistabiler Bereich an, bis nach Anriss des Modellkörpers eine kontinuierliche Dehnungszunahme bis zum Bruch der Probe erfolgte. Bei der Betrachtung der Dehnungen muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Messstelle nicht die höchstbeanspruchte Stelle darstellt.

Im Folgenden werden die bei den LCF-Versuchen auftretenden Hystereseschleifen näher betrachtet. Hierzu werden beispielhaft einige charakteristische Lastwechsel bei 550 °C analysiert, wobei die schwelende Last den Maximalwert  $F_{\max} = 134 \text{ kN}$  erreichte, siehe [Bild 4.24](#). In der vergleichenden Darstellung sind der 10., der 1000. und der 1701. Zyklus aufgetragen.

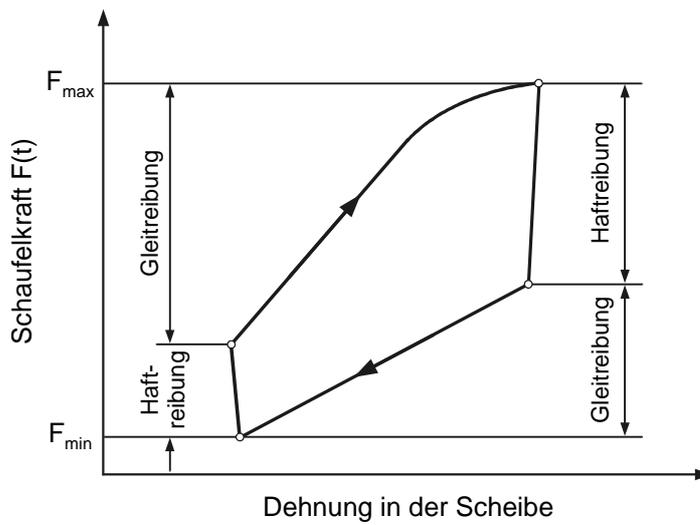


[Bild 4.24](#): Charakteristische Hystereseschleifen (MK-0°-2, 550 °C)

Aus [Bild 4.24](#) ist die kontinuierliche Zunahme der Dehnung mit zunehmenden Lastwechseln ersichtlich. Dabei unterscheidet sich ein typischer stabilisierter Zyklus ( $N=1000$ ) nur unwesentlich von einem der anfänglichen Lastwechsel. Diese Erkenntnis ist von großer praktischer Bedeutung für die Nachrechnung der Experimente, da es zur Ermittlung der für den Anriss maßgeblichen Spannungs- und Verformungsgrößen offensichtlich ausreichend ist, die FE-Analysen nur bis zu einer vergleichsweise niedrigen Lastwechselzahl durchzuführen.

Die beim Durchlaufen einer Hystereseschleife auftretenden Relativbewegungen zwischen Schaufel und Scheibe werden aus der schematischen Darstellung in [Bild 4.25](#) ersichtlich. Bei zunehmender Last wird eine maximale Grenze für die Haftreibungskraft überschritten, Schaufel und Scheibe gleiten bei höheren Lasten aufeinander ab. Bei Lastumkehr finden die entsprechenden Vorgänge auch während der Entlastung

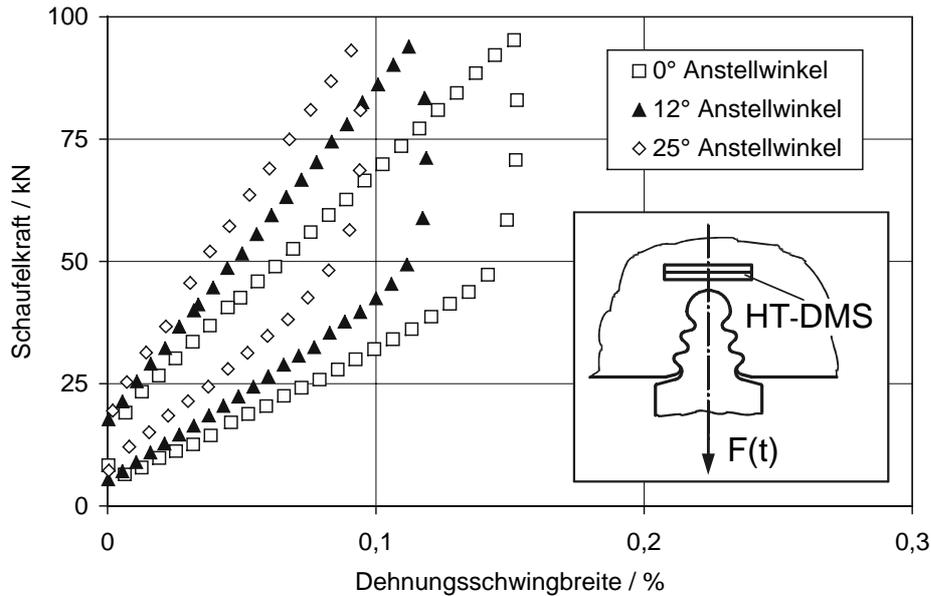
statt. Bis zu einer bestimmten Last haften Schaufel und Scheibe aneinander, wobei die hieraus resultierenden Verformungen in der Scheibe aufgrund der steifen Gesamtstruktur des Modellkörpers außerordentlich gering sind. Schließlich beginnt erneut ein Gleitvorgang zwischen Schaufel und Scheibe, die Dehnungsänderungen in der Scheibe werden betragsmäßig größer. Die Verformungen in der Schaufel sind dagegen weitestgehend unabhängig von den aktuellen Reibungszuständen. Die Erkenntnisse über die auftretenden Relativbewegungen konnten durch numerische Untersuchungen bestätigt werden, siehe Kapitel 5.



**Bild 4.25:** Kennzeichnende Hystereseschleifen in der Scheibe (schematisch)

Damit ist es bei den LCF-Versuchen an den Modellkörpern gelungen, die typischen Relativbewegungen einer Schaufel-Scheibe-Verbindung einschließlich der dabei auftretenden Reibungsmechanismen abzubilden. Nach Ausbau der Modellkörper konnten an den Kontaktflächen darüber hinaus auch geringe Anzeichen für Fretting gefunden werden [87]. Ebenso wie bei realen Turbinen ist dadurch jedoch kein signifikanter Einfluss auf das Versagensverhalten zu erwarten.

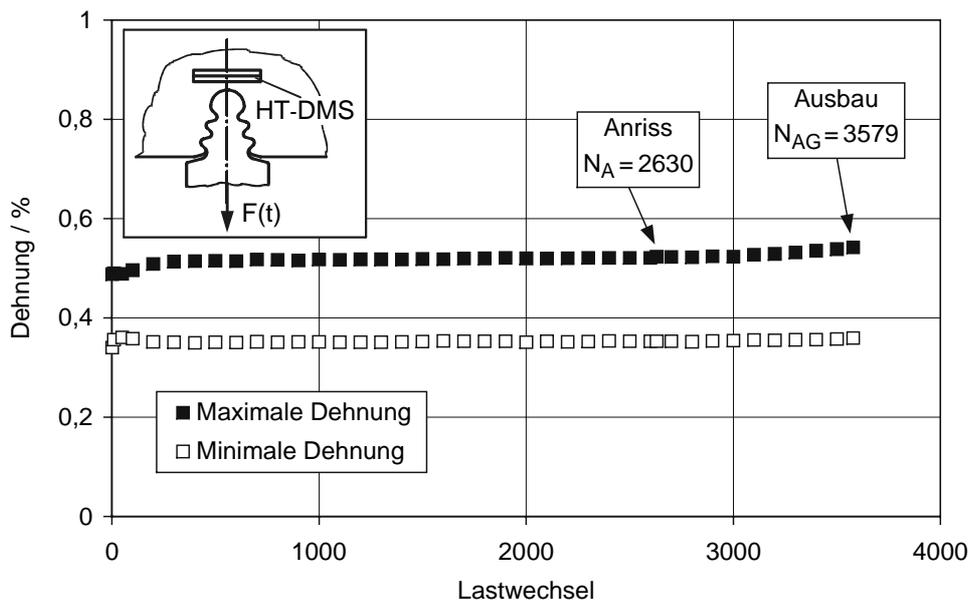
Der Einfluss des Anstellwinkels ist am Beispiel der LCF-Versuche mit der maximalen Schaufellast  $F_{\max} = 96 \text{ kN}$  bei  $550 \text{ °C}$  dargestellt, siehe [Bild 4.26](#). Es zeigt sich, dass die im Versuch gemessenen Dehnungsschwingbreiten mit zunehmendem Anstellwinkel abnehmen. Dies bestätigt die aus den Anrisskennlinien abgeleitete Erkenntnis, dass mit zunehmendem Anstellwinkel höhere Anrisslastwechselzahlen erreicht werden. Allerdings sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich bei schräg angestellten Schaufeln die höchstbeanspruchte Stelle infolge von Zusatzbeanspruchungen geringfügig verändert. Dies bedeutet, dass der Betrag der gemessenen Dehnungsschwingbreiten nicht allein für das Festigkeitsverhalten ausschlaggebend ist, sondern auch die Höhe der Spannungen im Hinblick auf eine Beeinflussung des Festigkeitsverhaltens durch Mittelspannungen eine wesentliche Rolle spielt.



**Bild 4.26:** Einfluss des Anstellwinkels auf die Hystereseschleifen

Weitere Ergebnisse der LCF-Versuche ohne Haltezeit sind im [Anhang A.20](#) bis [Anhang A.22](#) dargestellt. Es zeigt sich, wie bereits erwähnt, dass nach wenigen Lastwechseln ein quasistabiler Zustand erreicht wird, der bis zum Anriss des Modellkörpers repräsentativ für die Beanspruchung in der Scheibe ist.

Darüber hinaus wurden an einigen Modellkörpern metallografische und fraktografische Untersuchungen durchgeführt. Eine besondere Stellung nimmt dabei der LCF-Versuch an dem Modellkörper MK-12°-2 ein, bei dem der Versuch nur wenige Lastwechsel nach dem Anriss gestoppt und die Probe ausgebaut wurde, siehe [Bild 4.27](#).



**Bild 4.27:** LCF-Versuch MK-12°-2 (550 °C,  $F_{max} = 110$  kN)

Das Versagen trat bei den Modellkörpern typischerweise zwischen dem Kerbgrund der Scheibe und dem ersten Zapfen der Tannenbaumkonstruktion auf, siehe Bild 4.28. Die transkristallin verlaufenden Risse erreichten bei diesem Modellkörpern eine Länge von maximal 1,2 mm. Diese vergleichsweise geringe Risslänge beim Ausbau der Probe zeigt die hohe Zuverlässigkeit der Anrisserkennung mit dem HT-DMS. Ebenfalls ist in Bild 4.28 die inhomogene Mikrostruktur des Schmiedewerkstoffs IN 718 zu erkennen.

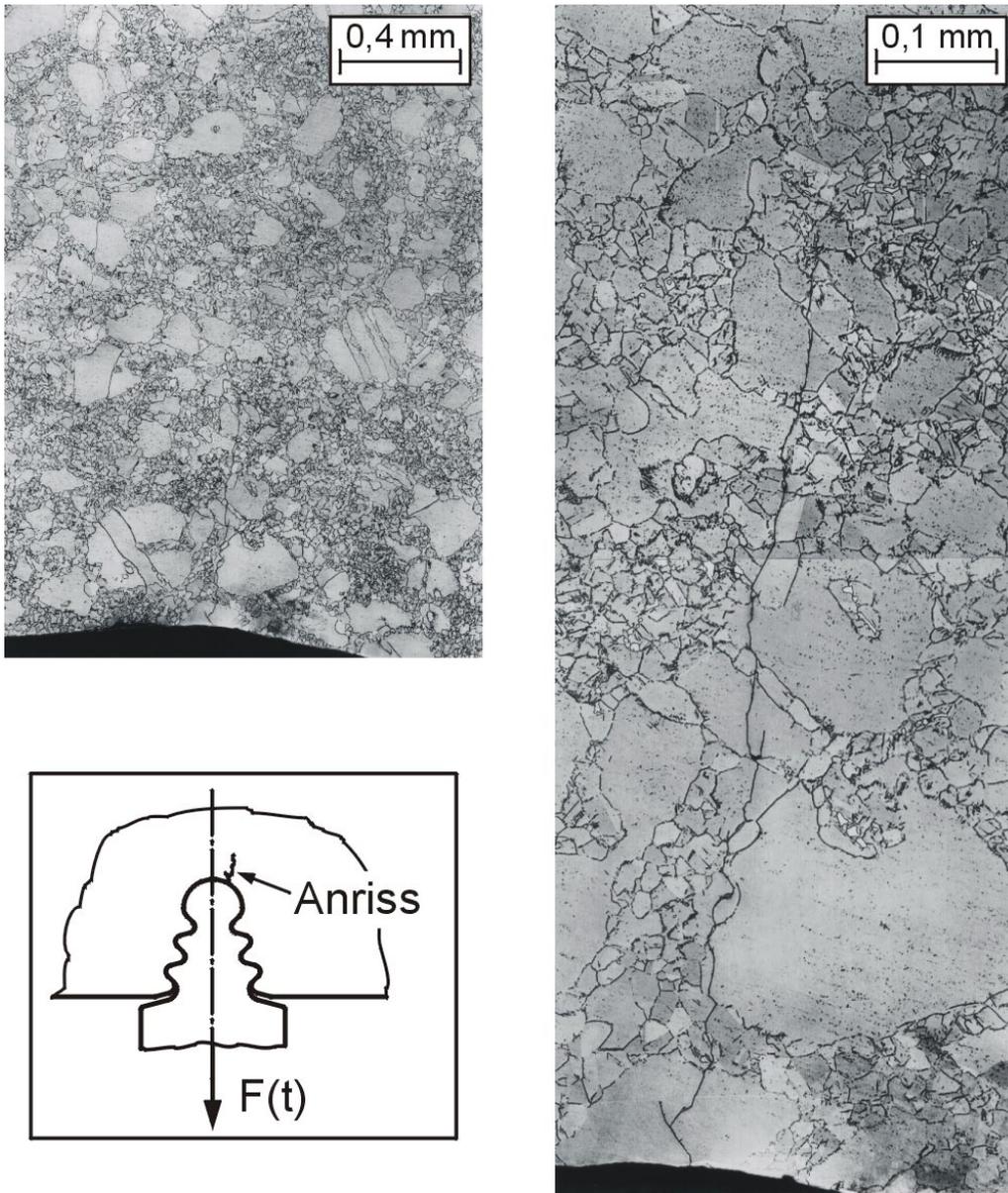


Bild 4.28: Rissbildung am Modellkörper MK-12°-2

Der ausgebaute Modellkörper wurde aufgebrochen und die Bruchhälften im Rasterelektronenmikroskop untersucht. In der REM-Aufnahme, Bild 4.29, lassen sich die Bereiche des Schwingrisses bzw. des Laborbruchs identifizieren. Im rechten Teilbild sind die für Ermüdungsschädigung charakteristischen Schwingstreifen zu erkennen.

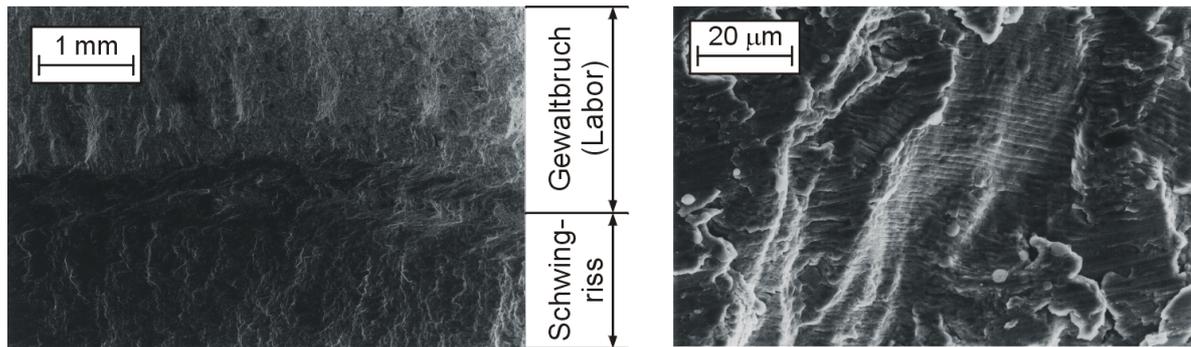


Bild 4.29: REM-Aufnahmen der Bruchfläche von MK-12°-2

Der bei Raumtemperatur geprüfte Modellkörper MK-0°-1 wurde ebenfalls im Labor aufgebrochen und im Rasterelektronenmikroskop eingehend untersucht. Bedingt durch die außerordentlich hohe Festigkeit des IN 718 bei RT erfolgte der Rissfortschritt mit sehr niedriger Geschwindigkeit, wobei der Schwingriss eine maximale Länge von etwa 0,6 mm erreichte. In Bild 4.30 ist ein Riss mit 0,2 mm Risslänge dargestellt, wobei in der vergrößerten Darstellung im rechten Teilbild Schwingstreifen erkennbar sind.

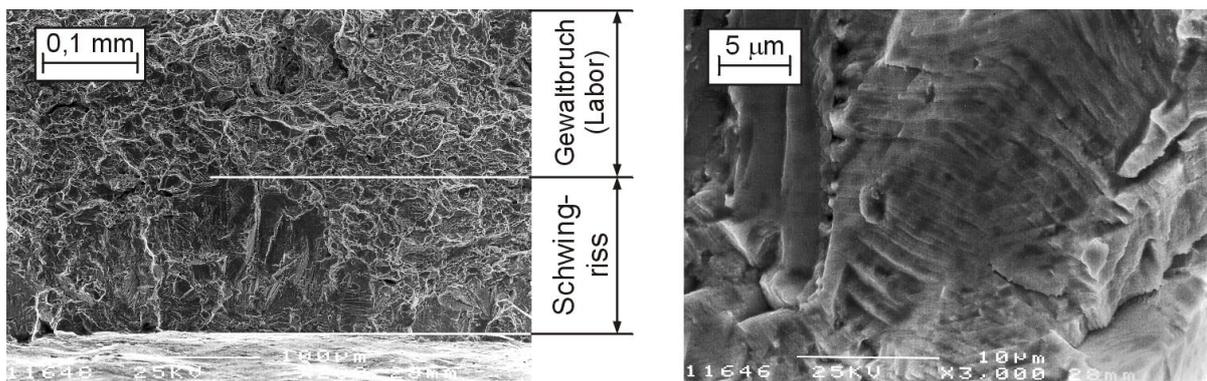


Bild 4.30: Bruchfläche MK-0°-1 (Versuchstemperatur: RT)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei den LCF-Versuchen ohne Haltezeit an den Modellkörpern sowohl bei RT als auch bei 550 °C zyklisches Versagen auftrat, wobei in beiden Fällen das Risswachstum transkristallin erfolgte. Damit konnte gezeigt werden, dass die Schädigung in diesen Versuchen auf Ermüdung zurückzuführen ist.

### **Versuchsergebnisse: LCF-Versuche mit Haltezeit**

Die einfachste Möglichkeit zur experimentellen Realisierung von Kriechermüdungsbeanspruchungen besteht in der Durchführung von LCF-Versuchen mit Haltezeit. Insgesamt wurden vier LCF-Versuche mit Haltezeit bei 550 °C an den Modellkörpern durchgeführt. Die Haltezeit betrug jeweils  $t_{HZ} = 20$  min bei Maximallast, siehe Bild 4.31.

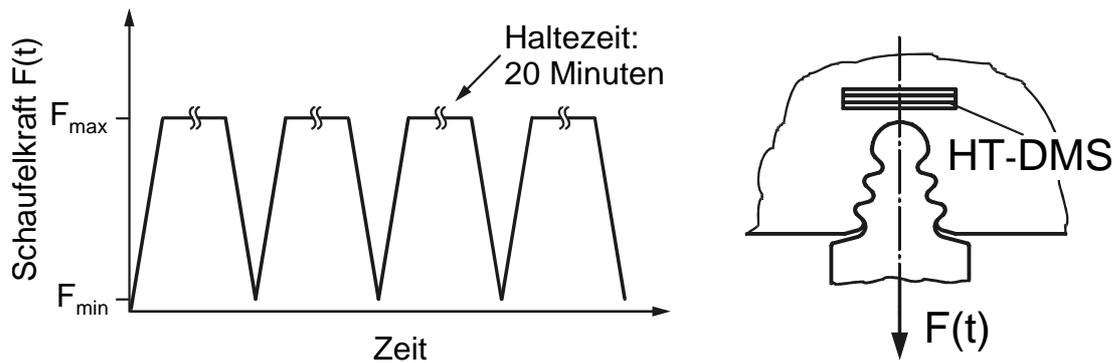


Bild 4.31: Zeitlicher Verlauf der Schauffellast bei den LCF-Versuchen mit Haltezeit

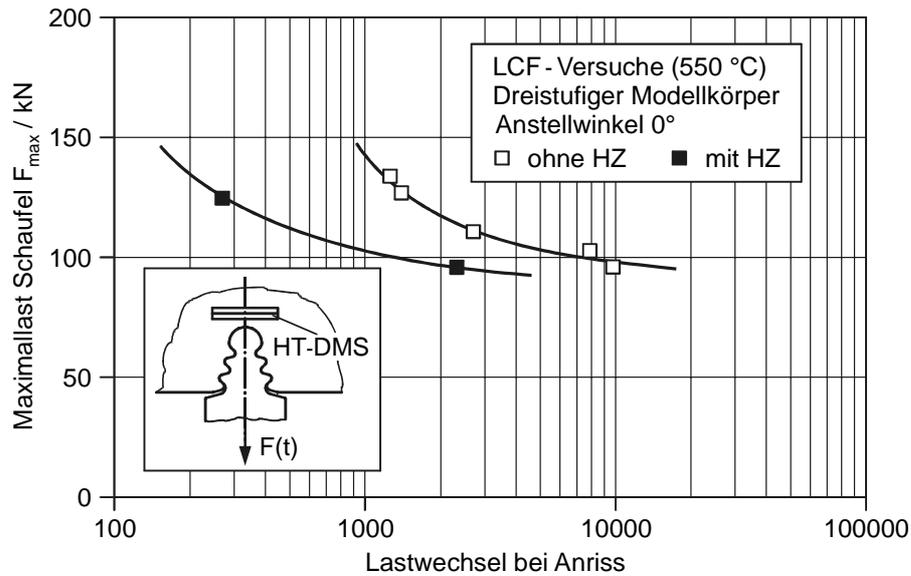
Die wichtigsten Ergebnisse aus den LCF-Versuchen sind in Tabelle 4.13 zusammengefasst. Die Höhe der Maximallast wurde dabei jeweils an die Experimente ohne Haltezeit angepasst. Die längste Versuchsdauer beträgt dabei 873 h bei einem LCF-Versuch mit  $F_{\max} = 95 \text{ kN}$ .

| Winkel     | Probe             | $F_{\max} / \text{kN}$ | $F_V / \text{kN}$ | $N_A$ | $N_{AG}$ | Versuchszeit |
|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------|----------|--------------|
| $0^\circ$  | MK- $0^\circ$ -6  | 125                    | 50                | 270   | 322      | 107 h        |
|            | MK- $0^\circ$ -7  | 95                     | 50                | 2320  | 2620     | 873 h        |
| $12^\circ$ | MK- $12^\circ$ -5 | 127                    | 50                | 440   | (517)    | 336 h        |
|            | MK- $12^\circ$ -7 | 111                    | 50                | 1910  | 2222     | 741 h        |

Tabelle 4.13: Versuchsergebnisse LCF-Versuche MK (550 °C, mit Haltezeit)

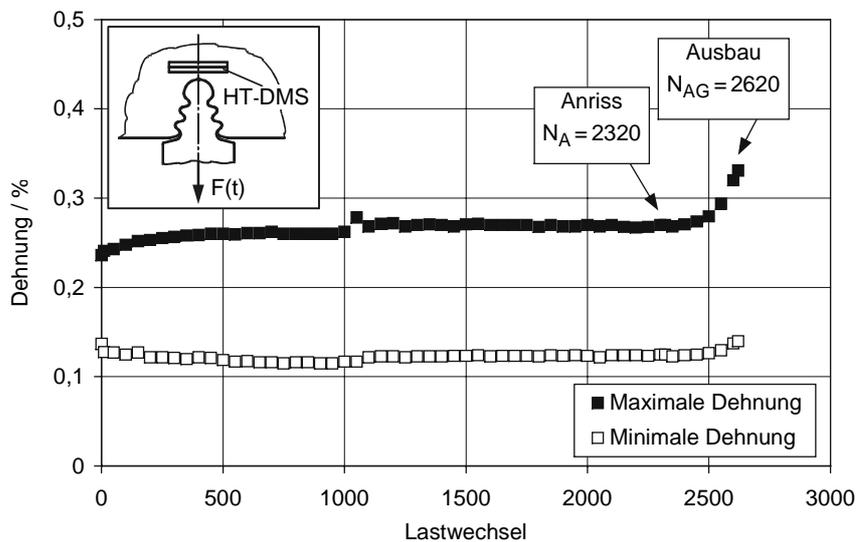
Bei LCF-Versuchen mit Haltezeit wirkt sich der schwellende Belastungsverlauf insofern signifikant auf das Versagensverhalten aus, da bei Zeitstandbeanspruchungen die absolute Höhe der Spannungen das Schädigungsverhalten primär beeinflusst, während bei zyklischer Beanspruchung die absolute Höhe der Spannungen, zumindest bei LCF-Beanspruchungen, nur sekundär im Hinblick auf die Bewertung der Mittelspannungen von Interesse ist.

Erwartungsgemäß kommt es deswegen bei den schwellenden Belastungen mit Haltezeit zu einer deutlichen Reduktion der Lebensdauer. Die Anrisskennlinien für den Modellkörper mit  $0^\circ$  Anstellwinkel sind in Bild 4.32 grafisch dargestellt. Analog dazu sind im Anhang A.23 die Anrisskennlinien für die Modellkörper mit dem Anstellwinkel  $\alpha = 12^\circ$  veranschaulicht.



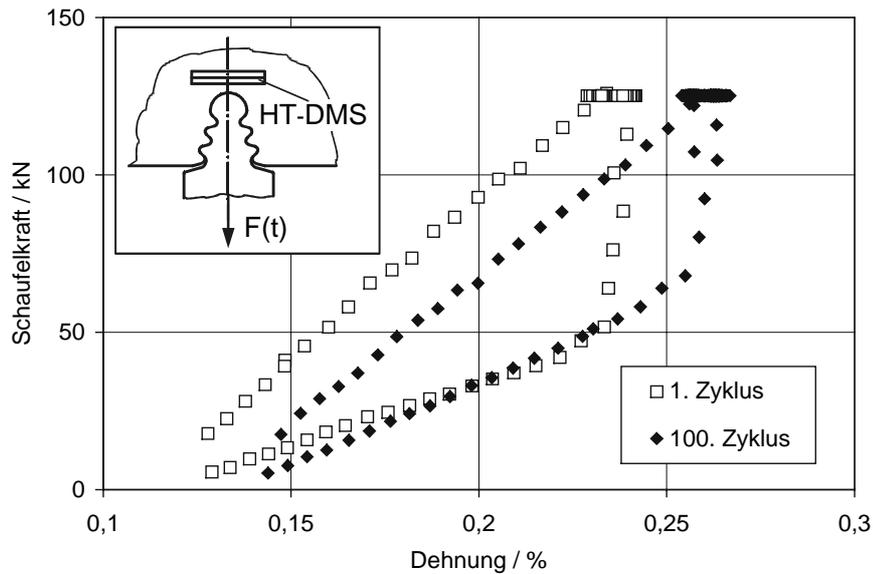
**Bild 4.32:** Einfluss der Haltezeit auf die Lebensdauer (MK-0°, 550 °C)

Bei den Versuchen mit Haltezeit tritt das Versagen ebenfalls generell in der Scheibe auf. Der charakteristische Verlauf der maximalen und minimalen gemessenen Dehnungen in der Scheibe sind beispielhaft für den Versuch an dem Modellkörper MK-0°-7 dargestellt, siehe [Bild 4.33](#). Wie auch schon bei den Experimenten ohne Haltezeit hat sich die Bestimmung der Anrisslastwechselzahl unter Verwendung des HT-DMS als geeignet erwiesen. Zusätzlich sind in [Anhang A.24](#) die gemessenen Dehnungen für den LCF-Versuch an der Probe MK-12°-7 dargestellt.



**Bild 4.33:** Dehnungen im LCF-Versuch mit Haltezeit (MK-0°-7, 550 °C)

Als Beispiel sind die gemessenen Hystereseschleifen für den LCF-Versuch am Modellkörper MK-12°-5 dargestellt, siehe [Bild 4.34](#). Offensichtlich traten dabei selbst bei der hohen Maximallast  $F_{max} = 127$  kN an der Messstelle nur vergleichsweise geringe Kriechdehnungen während der Haltezeiten auf.

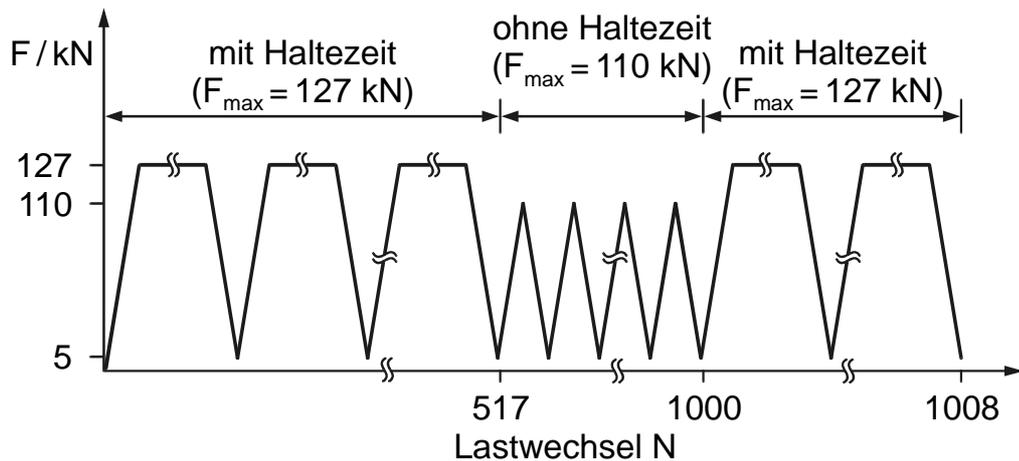


**Bild 4.34:** Hystereseschleifen bei LCF-Versuch mit Haltezeit

Die deutliche Reduzierung der Lebensdauer in den durchgeführten Haltezeitversuchen (etwa Faktor 5) lässt darauf schließen, dass das Versagen nicht mehr allein auf die zyklische Beanspruchung zurückzuführen ist. Vielmehr ist es offensichtlich zu relevanten Zeitstandschädigungen bzw. zu Schädigungsanteilen infolge der Interaktion von Ermüdungs- und Kriechbeanspruchungen gekommen, die zusätzlich zur Schädigung durch reine Ermüdungsbeanspruchung wirksam wurden. Zur weiteren Untersuchung dieser Fragestellung wurden metallografische und fraktografische Analysen durchgeführt.

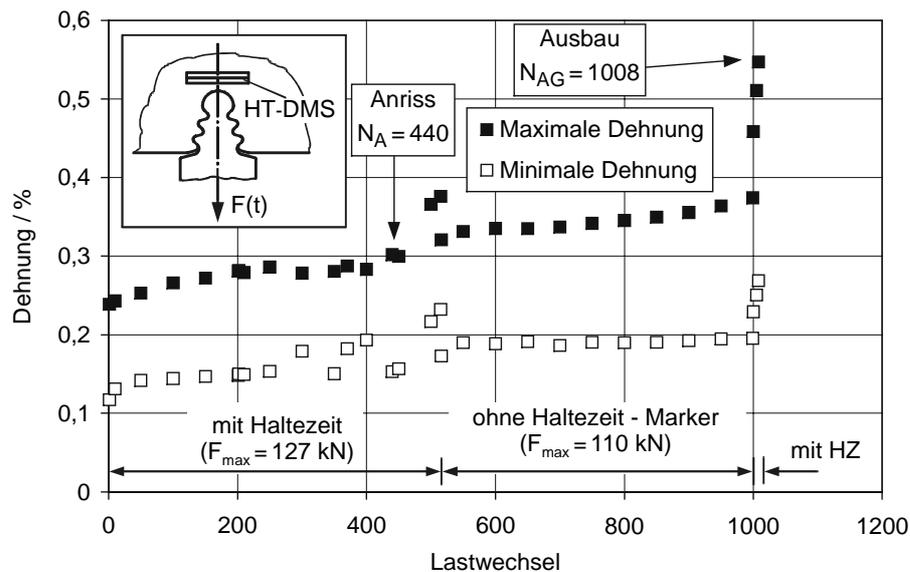
Eine Möglichkeit zur Kennzeichnung von Bruchflächen, besteht in der Verwendung der sogenannten Marker-Technik [88]. Üblicherweise werden dabei nach Anriss der Probe einige Zyklen mit etwas geringerer Maximallast durchgeführt, um einen charakteristischen Verlauf der Bruchfläche zu erzeugen. Häufig wird diese Vorgehensweise in Verbindung mit Risswachstumsuntersuchungen angewandt.

Im Rahmen der durchgeführten LCF-Versuche mit Haltezeit bietet es sich an, die Markierung der Bruchfläche durch Belastungen des Modellkörpers ohne Haltezeit zu erreichen. In dieser Arbeit wurde hierzu die Probe MK 12°-5 eingesetzt. Der Verlauf der Schaufellast in diesem Versuch in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl ist in Bild 4.35 dargestellt.



**Bild 4.35:** Schaufellast im LCF-Versuch am Modellkörper MK-12°-5

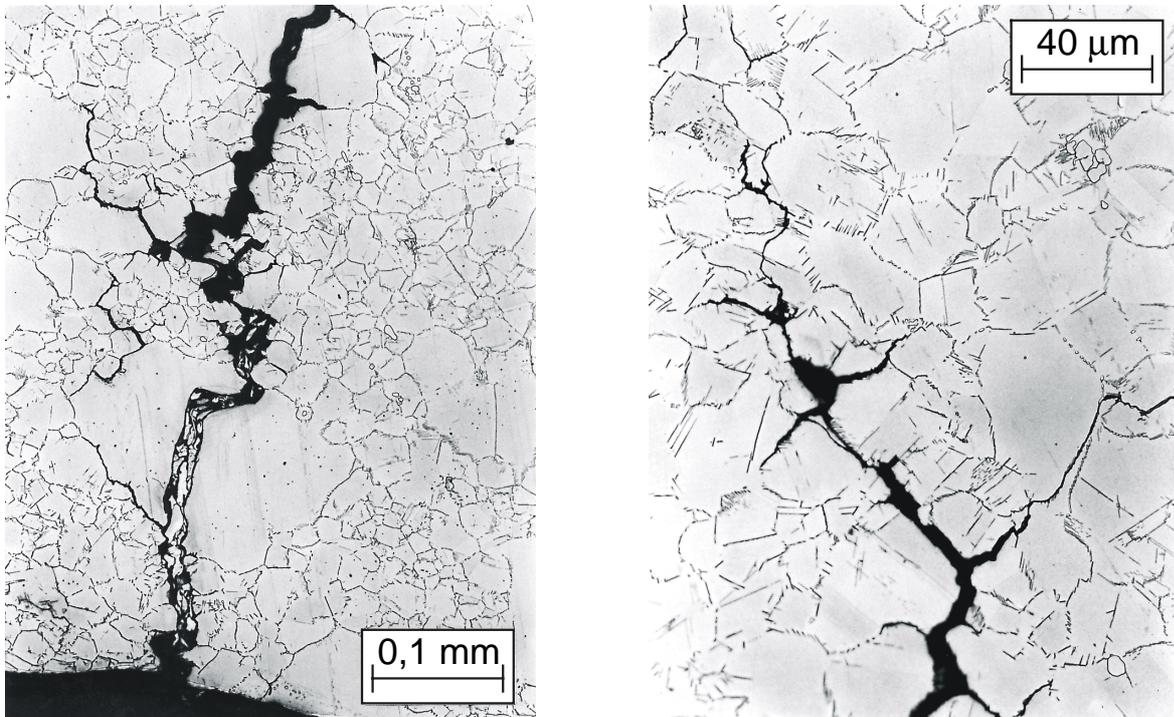
Die Grundidee dieser Vorgehensweise besteht darin, dass nach Anriss der Probe ( $N_A = 440$ ) einige Lastwechsel bei verminderter Last ohne Haltezeit durchgeführt werden, um auf der Bruchfläche die unterschiedlichen Bereiche der Rissverweiterung (Kriechermüdung, Ermüdung) identifizieren zu können, siehe [Bild 4.36](#).



**Bild 4.36:** Dehnungen bei Anwendung der Marker-Technik (MK-12°-5, 550 °C)

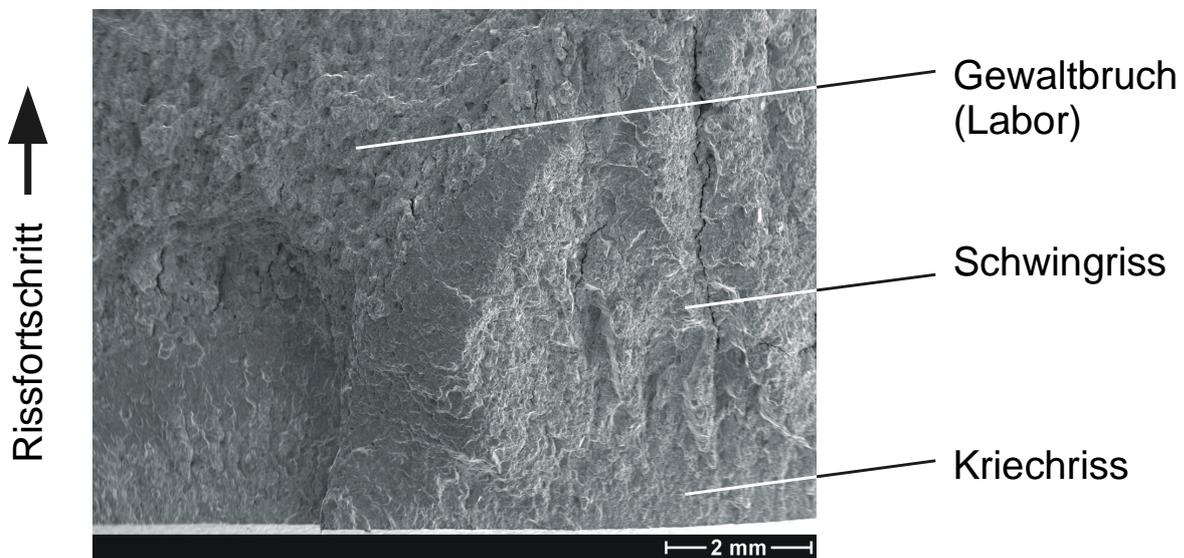
Der Dehnungsverlauf in Bild 4.36 zeigt, dass nach Anreißen des Modellkörpers im regulären Haltezeitversuch eine deutliche Zunahme der gemessenen Dehnungen festzustellen ist. Bei Erreichen des 517. Lastwechsel wurde der Versuch zunächst gestoppt. Es zeigt sich, dass nach Fortsetzung des Versuchs ohne Haltezeit auch bei reduzierter Last Rissfortschritt erfolgte, da die Dehnungen weiterhin kontinuierlich zunahm. Zum Ende des Versuchs wurden noch einige Lastwechsel mit Haltezeit durchgeführt, bis bei  $N_{AG} = 1008$  der Modellkörper ausgebaut wurde.

Die Lage des Risses ist mit der Risslage bei den LCF-Versuchen ohne Haltezeit identisch. In den geätzten metallografischen Schliffen in [Bild 4.37](#) sind im Bereich der Rissinitiierung in der Nähe der Oberfläche vorwiegend interkristalline Rissstrukturen zu erkennen. Der Rissfortschritt entlang der Korngrenzen ist insbesondere gut an Nebenrissen zu beobachten, wie im rechten Teilbild beispielhaft dargestellt ist.



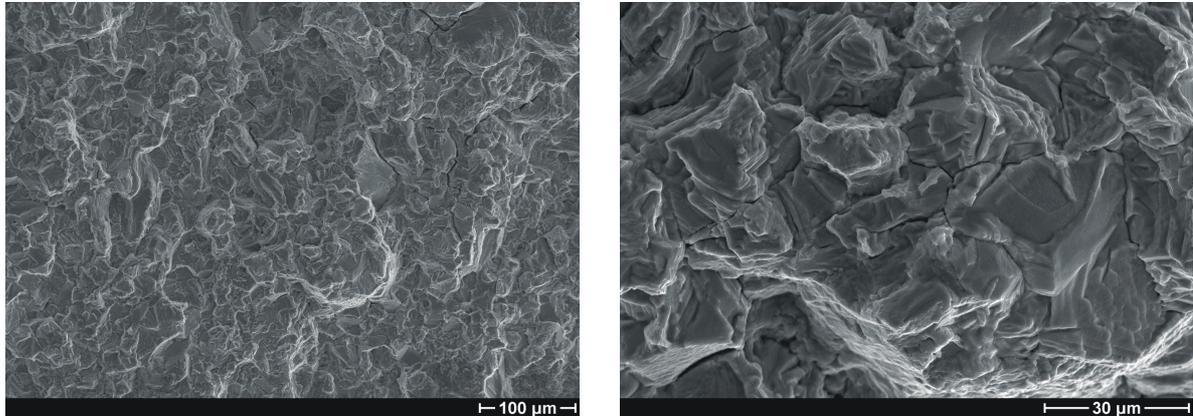
[Bild 4.37](#): Rissbildung am Modellkörper MK-12°-5

Die REM-Aufnahme dieser Bruchfläche zeigt, dass sich die resultierenden Anteile aus Kriechermüdungs- und Ermüdungsschädigung sowie der Laborbruch eindeutig unterscheiden lassen, siehe [Bild 4.38](#).



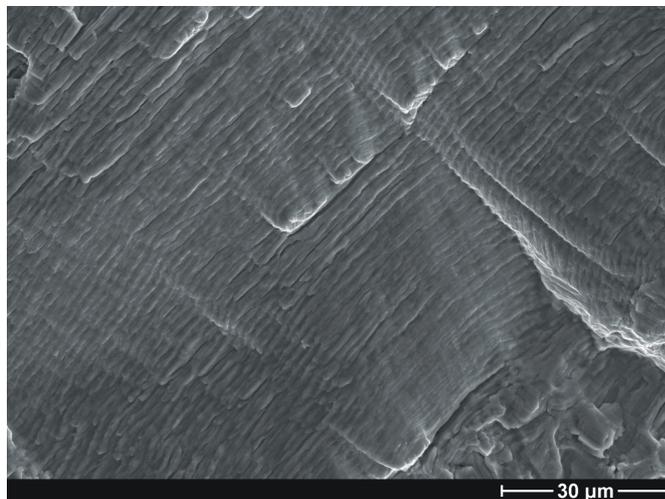
[Bild 4.38](#): Bruchfläche Modellkörper MK-12°-5

Der Bereich der Rissinitiierung des Kriechrisses zeigt vorwiegend interkristalline Strukturen, siehe [Bild 4.39](#). Insbesondere im rechten Teilbild sind dabei deutliche Anzeichen für die Schädigung der Korngrenzen zu erkennen.



[Bild 4.39](#): Interkristalline Strukturen MK-12°-5

Im Anschluss an den Bereich des Kriechrisses sind Schwingstreifen erkennbar, die aus der Markierungsbelastung ohne Haltezeit resultieren, siehe [Bild 4.40](#). Damit wird die Dehnungszunahme während der Markierungszyklen auch werkstoffmechanisch gesehen erklärbar.



[Bild 4.40](#): Markierung der Bruchfläche durch Schwingstreifen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit Hilfe der Marker-Technik eine charakteristische Kennzeichnung der Bruchfläche möglich ist. Damit konnten die maßgeblichen Schädigungsursachen in den LCF-Versuchen mit Haltezeit (Kriechermüdung) bzw. in den LCF-Versuchen ohne Haltezeit (Ermüdung) in Verbindung mit metallografischen und fraktografischen Analysen eindeutig zugeordnet werden.