

Forschungsreport 2011

Abschlussbericht



Erstelldatum: 18.08.2011

Laufzeit: 01.04.2007 – 31.12.2010

Projekt	
FVA Nr. und Kennwort 539I Betriebsfeste Getriebewellen	
Thema: Lebensdauer von einsatzgehärteten Getriebewellen bei Kollektivbelastung	
Projektleiter Industrie	Dr.-Ing. Alfred Sollich
Arbeitskreis	Werkstoffe
Forschungsstelle	
Institutsname: Institut für Festkörpermechanik	Universität:  TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Institutsleitung	Prof. Dr.-Ing. habil. V. Ulbricht
Gruppenleitung	Prof. Dr.-Ing. habil. K.-G. Eulitz
Sachbearbeiter	Dipl.-Ing. Matthias Berner

Das IGF-Vorhaben 15056 BR der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die FVA übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA), Lyoner Str. 18, 60528 Frankfurt/Main



Inhaltsverzeichnis

1 Motivation und Konzept des Vorhabens	2
2 Prüfteile	4
2.1 Geometrie	4
2.2 Wärmebehandlung	4
2.3 Beanspruchungszustand	4
3 Einstufenversuchsreihen	5
3.1 Prinzip der normierten Auswertung	6
3.2 Auswertung der Versuchsreihen	8
4 Betriebslastenversuche	10
4.1 Prüfkollektiverstellung	10
4.2 Auswertung der Versuchsreihen	11
5 Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept	13
5.1 Variationen der Lebensdauerrechnung	13
5.2 Besonderheit bei der Lebensdauerrechnung	15
6 Zusammenfassung	16
Literatur	17

1 Motivation und Konzept des Vorhabens

Die globale Wettbewerbssituation im Maschinen-, Fahrzeug- und Anlagenbau ist dominiert von der Forderung nach Effizienz hinsichtlich der Nutzung abnehmender und damit teurer Rohstoffressourcen. Dabei ist die Verminderung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs im Maschinen- und Anlagenbetrieb eng verbunden mit der Materialeinsparung bei der Baugruppenherstellung.

Um dem zunehmenden Zwang zum Leichtbau bei gleichzeitig abgesicherter Zuverlässigkeit der Baugruppen gerecht werden zu können, ist eine betriebsfeste Bemessung von bisher überwiegend dauerfest ausgelegten Bauteilen nötig. Dabei besteht die Situation, dass vorhandene Konzepte zur rechnerischen Bemessung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, die nur durch experimentelle Untersuchungen zum Verhalten spezifischer Bauteile unter charakteristischer Belastung vermindert werden können. In diesem Sinne ist für eine treffsichere Lebensdauervorhersage die „Relative Miner-Regel“ zur Vordimensionierung heranzuziehen und durch verkürzte experimentelle Nachweise abschließend zu ergänzen [11]. Die dazu benötigten Erfahrungen liegen für einsatzgehärtete Bauteile unter Torsionsbelastung noch nicht vor.

Da trotz der geschilderten Situation gleichzeitig ein Zwang zur Verkürzung von Entwicklungszeiten und zur Verminderung von Entwicklungskosten besteht, sind Erkenntnisse zu möglichen Verkürzungen der Versuche (Omission) und zum Einfluss unterschiedlicher Parameter der Bauteile auf die Lebensdauer unverzichtbar.

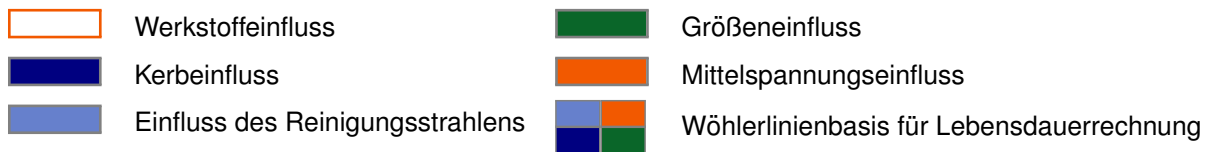
Aus den genannten Gründen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens [1] umfangreiche Einstufen- und Betriebslastenversuche an einsatzgehärteten Wellen unter Torsionsbelastung durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war ein Erkenntnisgewinn zur Auswirkung spezifischer Parameter der Bauteile sowie erforderlicher und möglicher technologischer Maßnahmen auf die dynamische Festigkeit der Wellen. Weiterhin wurde ein Erkenntnisgewinn zur Auswirkung der Prüfkollektive (Kollektivform und -kürzung) auf die Lebensdauer sowie eine Verbesserung der Berechnungsgrundlagen angestrebt.

Konzept des Forschungsvorhabens Im Rahmen des Projektes wurden Einstufen- und Betriebslastenversuche durchgeführt. Die Ableitung spezifischer Aussagen erfolgte anhand eines umfangreichen Prüfprogramms an bauteilähnlichen Proben.

Einstufenversuchsreihen Auf Basis von je 15-20 Einzelversuchsreihen wurden Wöhlerlinien dreier Werkstoffe bei zwei Prüfteildurchmessern mit und ohne Kerbwirkung durch eine Querbohrung ermittelt. Die Wöhlerlinien dienen als Basis der Lebensdauerrechnung sowie zur Bewertung des Werkstoff- und Größeneinflusses, der Kerbwirkung und der Mittelspannungsempfindlichkeit.

Tabelle 1: Versuchsplan Einstufenversuche

Werkstoff		16MnCr5		17CrNi6-6				20MoCr4	
Wellendurchmesser		21 mm		21	35	21	35	21 mm	
Kerbform		Querbohrung	glatt	Querbohrung		glatt		Querbohrung	glatt
Strahlen		ja	nein	ja	ja	ja		ja	
Wöhlerlinie mit 15-20 Versuchen	$R = -1$								
	$R = 0$								



Betriebslastenversuche Die Planung der Betriebslastenversuche orientierte sich an der Tatsache, dass die Auswirkungen der zu untersuchenden Parameter der Bauteile und der Technologie unter Einstufen- und Kollektivbelastung unterschiedlich ausgeprägt sein können. Es wurde der Einfluss der Versuchszeitverkürzung durch Omission (25 %, 50 % und 75 % bzgl. S_D) sowie die Auswirkung zweier unterschiedlicher Kollektive untersucht. Zur ausreichenden statistischen Absicherung der Einzelergebnisse waren vier Einzelversuche für jede Versuchsreihe vorgesehen.

Werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen Die durchgeführten Einstufen- und Betriebslastenversuche an bauteilähnlichen Proben wurden durch metallografische Untersuchungen sowie Härte-tiefen- und Eigenspannungsmessungen begleitet.

Anwendung der experimentellen Ergebnisse auf Berechnungskonzepte Die Lebensdauerberechnungen erfolgten, basierend auf den experimentell ermittelten Wöhlerlinien, nach dem Nennspannungskonzept. Bezüglich der Berechnung stand die Frage nach der günstigsten Modifikation der Miner-Regel, der zutreffendsten Methode der Mittelspannungsbewertung sowie nach anzusetzenden Schädigungssummen für die relative Miner-Regel.

Tabelle 2: Versuchsplan Betriebslastenversuche

Werkstoff		16MnCr5		17CrNi6-6				20MoCr4		
Wellendurchmesser		21 mm		21	35	21	35	21 mm		
Kerbform		Querbohrung		glatt		Querbohrung		glatt		
Strahlen		ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja		
Kollektiv	Omission	Arbeitspakete (durchschnittlich 4-fach belegt)								
1	25 %									
	50 %									
	75 %									
2	25 %									
	50 %									

	Werkstoffeinfluss		Einfluss der Omission
	Größeneinfluss		Kollektiveinfluss
	Einfluss des Reinigungsstrahlens		

2 Prüfteile

2.1 Geometrie

Die Untersuchungen wurden an gekerbten und ungekerbten Hohlwellen zweier Prüfquerschnitte durchgeführt. Die Kerbe entspricht dabei einer mittig in der Probe eingebrachten Querbohrung. Quer- und Längsbohrungen dienen zur Abbildung von Ölführungsbohrungen, wie sie in realen Getriebewellen vorhanden sind. Die Probengeometrien sind unter Angabe der gewählten Abmessungen in Abbildung 1 dargestellt.

2.2 Wärmebehandlung

Entsprechend den Vorgaben für reale Getriebewellen wurden alle untersuchten Proben nach dem selben Programm einsatzgehärtet und anschließend reinigungsgestrahlt.

Im Ergebnis der durchgeführten Härtemessungen wurden für alle Probengeometrien und Werkstoffe einheitliche Randhärten von 750 HV1 sowie einheitliche Härtetiefen von 0.44 mm CHD550 HV1 ermittelt. Bei allen Proben der untersuchten Stähle war in der Härteschicht ein Restaustenitgehalt <30 Vol.-% sowie jeweils kein geschlossenes Carbidnetzwerk festzustellen.

2.3 Beanspruchungszustand

Die Beanspruchungszustände, wie sie sich für die untersuchten Probengeometrien bei Belastung mit einem Torsionsmoment einstellen, sind in Abbildung 2 für den ungestörten sowie den gekerbten Bauteilbereich anschaulich anhand freigeschnittener Oberflächenelemente dargestellt. Im ungestörten Bereich entspricht die Beanspruchung einem reinen Schubspannungszustand, der sich, wie in der

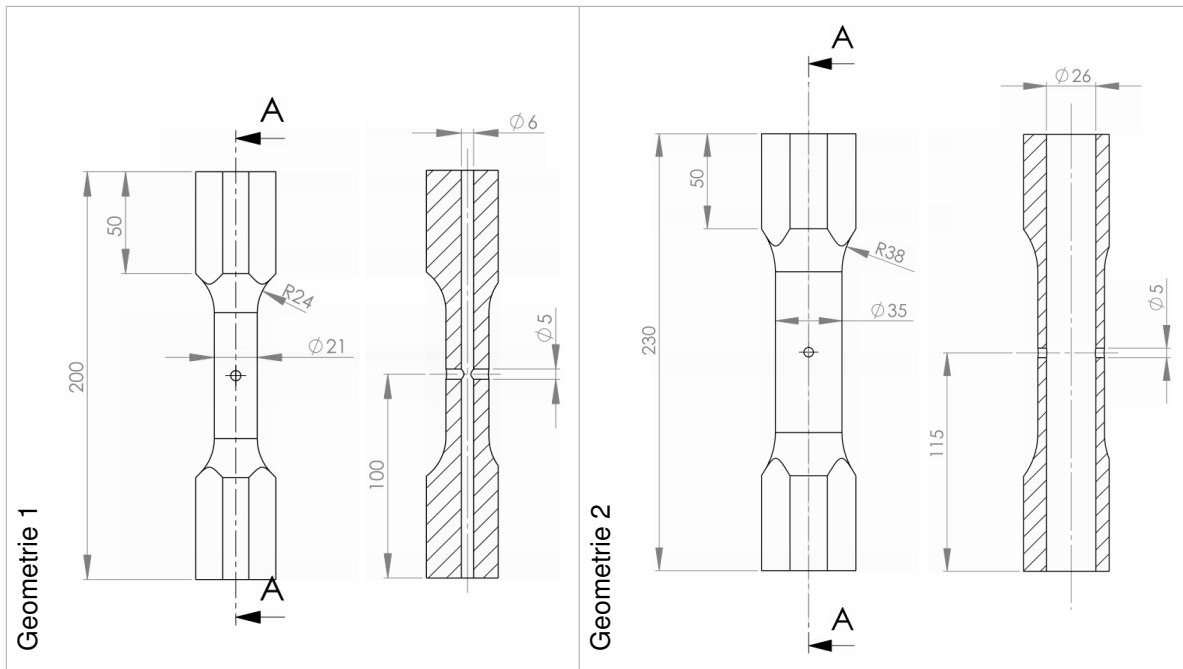


Abbildung 1: Geometrie der untersuchten Proben

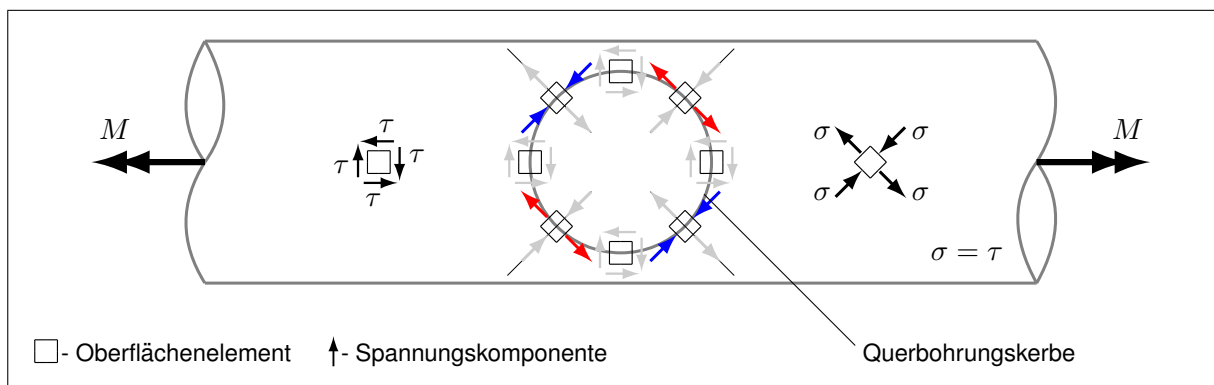


Abbildung 2: Oberflächenspannungszustand einer quergebohrten Welle unter Belastung mit einem Torsionsmoment

Abbildung verdeutlicht, äquivalent als zweiachsiger Normalspannungszustand auffassen lässt. Infolge des freien Randes (Oberfläche der Querbohrung) und der dort zu erfüllenden Gleichgewichtsbedingungen reduziert sich der vorliegende zweiachsige Spannungszustand am Querbohrungsrand auf lokal einachsige Normalbeanspruchungen bzw. verschwinden die Beanspruchungen vollständig. Der Betrag der Normalspannungen am Querbohrungsrand ergibt sich dabei nach NEUBER [10] zu $\sigma_{\max} = 4 \cdot \tau$, wobei τ der Nennspannung S für torsionsbelastete Rundproben entspricht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich am Rand der Querbohrungskerbe infolge der Belastung mit einem Torsionsmoment vier höchstbeanspruchte Punkte ausbilden. Die lokalen Maxima sind alternierend Zug- bzw. Druckbeanspruchungen, deren Vorzeichen durch den Richtungssinn des angreifenden Moments festgelegt sind. Unabhängig vom Vorzeichen der äußeren Last existieren am Querbohrungsrand immer zwei Punkte maximaler Zugbeanspruchung.

3 Einstufenversuchsreihen

Die im Rahmen des Vorhabens abzuleitenden Ergebnisse basieren auf Vergleichen von Schwingfestigkeiten verschiedener Bauteile. Die entsprechenden Schwingfestigkeiten sind durch Wöhlerlinien charakterisiert, denen Versuchsreihen im Zeit- und Dauerfestigkeitsgebiet zugrundeliegen. Die Qua-

lität der ermittelten Ergebnisse ist dabei abhängig von der statistischen Aussagekraft der Versuchsreihen. Mit Ausschreibung des Vorhabens war vorgesehen, Wöhlerlinien auf Basis von jeweils ca. 15 Proben zu ermitteln (vgl. Versuchsplan, Tabelle 1). In der Ausführung wurden 5 bis max. 10 Proben für die Treppenstufenversuche und 10 bis 13 Proben für das Zeitfestigkeitsgebiet verwendet. Aus heutiger Sicht ist dies insbesondere für die Abschätzung der Dauerfestigkeit nicht ausreichend (vgl. Tabelle 3). Um die vorgesehenen Untersuchungen statistisch abgesichert auswerten zu können, hätte der Vertrauensbereich des Mittelwertes abgeschätzt werden müssen. Eine Fortsetzung der Treppenstufenversuche war aufgrund der in begrenzter Anzahl vorhandenen Proben nicht möglich.

Tabelle 3: Aussagekraft des Treppenstufenversuches in Abhängigkeit von der Probenzahl [9]

Anzahl Versuche	Abschätzung
5 - 9	Grobe Abschätzung Mittelwert
13	Mittelwert mit Vertrauensbereich
17	Brauchbarer Wert Standardabweichung
25	Gute Schätzung für Standardabweichung

Der geschilderte Sachverhalt führt zu Problemen bei der Interpretation der interessierenden Einflussgrößen. Infolge der schlechten statistischen Absicherung kann in der Auswertung nicht zwischen Streuung und tatsächlicher Einflussgröße unterschieden werden. Im Ergebnis erhält man Aussagen, die sich teilweise im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich widersprechen und/oder nicht dem bestehenden Erkenntnisstand entsprechen.

Ein Einfluss von Fehlern in der Versuchsdurchführung oder -auswertung konnte nach umfangreicher Prüfung aller möglichen Fehlerquellen ausgeschlossen werden.

Um trotz der bestehenden Situation eine hinreichend abgesicherte Ableitung von Aussagen zu den interessierenden Problemstellungen zu ermöglichen, wurde eine normierte Auswertung aller vergleichbaren Versuchsreihen vorgenommen. Mittels Normierung wurden einheitliche Wöhlerlinienexponenten, Ecklastwechselzahlen und Streuungen für gleichartig beanspruchte Proben der unterschiedlichen Werkstoffe abgeleitet. Eine Übertragung der normierten Größen auf die Einzelversuchsreihen gestattet eine widerspruchsfreie Ableitung von Aussagen zu allen Problemstellungen des Vorhabens.

3.1 Prinzip der normierten Auswertung

Von HAIBACH und OLIVIER wurde die normierte Auswertung zuerst auf Schweißverbindungen angewendet, später auf ungekerbte und gekerbte Formelemente aus Stahl und Al-Legierungen erweitert [4]. Alle neueren Normen machen explizit (Wöhlerliniensysteme) oder implizit (Ausfallwahrscheinlichkeit) davon Gebrauch (EC3 [2], IIW-Richtlinie [8], FKM-Richtlinie [5]). Ziel der normierten Auswertung ist die Ableitung gemeinsamer Wöhlerlinienexponenten, Ecklastwechselzahlen und Streubänder, was durch Normierung aller Versuchsreihen auf ihre Dauerfestigkeit und anschließende gemeinsame Auswertung erfolgt.

Dieses Vorgehen wird hier als ungeeignet angesehen, da gerade die ermittelten Dauerfestigkeiten die statistisch unsichereren Parameter darstellen. Aus diesem Grund erfolgt die Normierung in zwei Schritten, erst für den Zeitfestigkeitsbereich, zur Ableitung des Wöhlerlinienexponenten, und danach für den Dauerfestigkeitsbereich, zur Ermittlung gemeinsamer Ecklastwechselzahlen. Das Prinzip der zweistufigen normierten Auswertung ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Die Erklärungen zur durchgeführten Normierung erfolgen als grafische Interpretation im Koordinatennetz mit logarithmischer Achsteilung.

Ermittlung eines normierten Wöhlerlinienexponenten. Grundgedanke bei der Normierung im Zeitfestigkeitsgebiet ist eine Verschiebung der einzelnen Versuchsreihen auf ein einheitliches Niveau mit dem Ziel der gemeinsamen Regression.

Als Bezug für die relative Verschiebung der Versuchsreihen gegeneinander wird der (logarithmische) Schwerpunkt der Versuchsdaten (\bar{S}_a, \bar{N}) verwendet, der sich unter Berücksichtigung aller Versuchs-

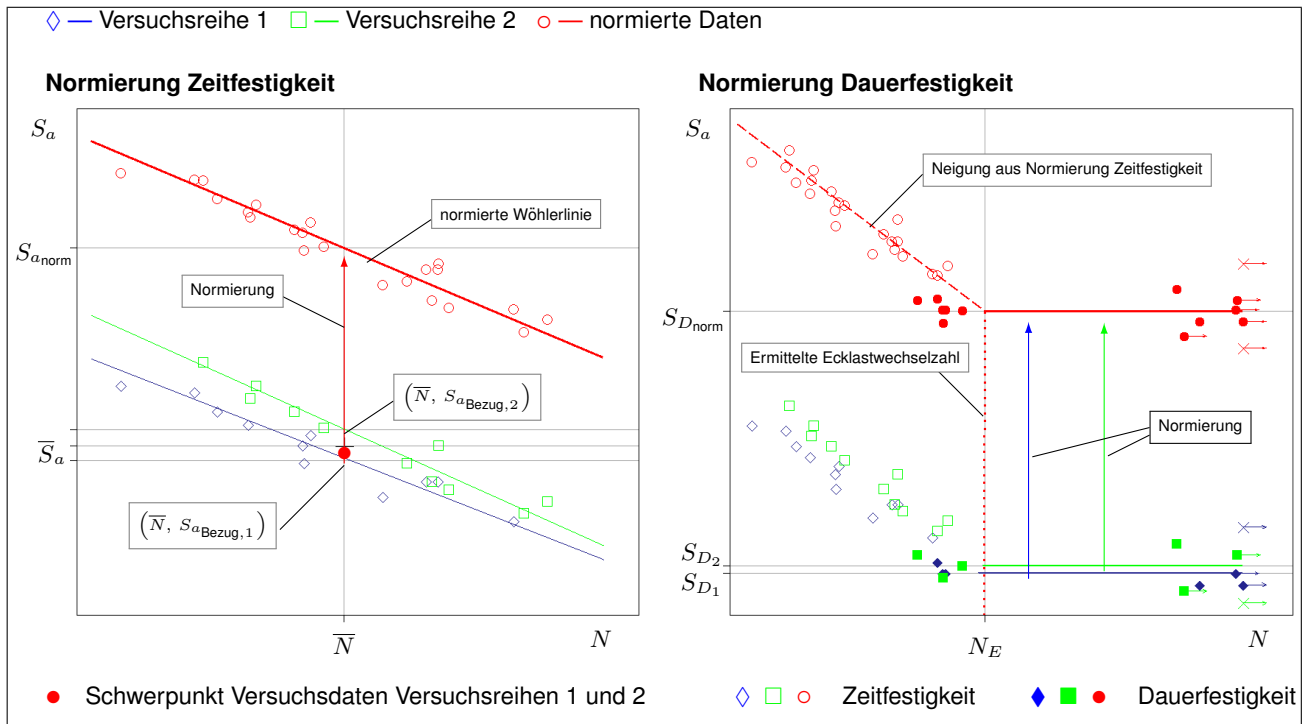


Abbildung 3: Prinzip der normierten Auswertung

punkte der Einzelversuchsreihen ergibt. Ist der Schwerpunkt bekannt, sind alle Versuchsreihen einzeln auszuwerten und aus den ermittelten Wöhlerlinien jeweils die für die Verschiebung benötigte Bezugsamplitude $S_{a_{Bezug}} = S_a(\bar{N})$ zu bestimmen. Die Normierung erfolgt durch Verschiebung der Einzelversuchsreihen in Lastrichtung auf ein für die Bezugsamplituden einheitliches Niveau $S_{a_{norm}}$. In Abbildung 3 (links) ist die Normierung beispielhaft anhand zweier Versuchsreihen dargestellt.

Eine nachfolgende Regression der normierten Datenpunkte liefert den gesuchten Wöhlerlinienexponenten sowie Aussagen zur gemeinsamen Streuung der Versuchsdaten in Lebensdauerrichtung.

Eine horizontale Verschiebung (Lebensdauerrichtung) der Versuchsreihen gegeneinander wird bei der vorgestellten Normierung nicht durchgeführt.

Ermittlung normierter Ecklastwechselzahlen. Zur Festlegung gemeinsamer Ecklastwechselzahlen N_E werden die Einzelversuchsreihen jeweils bezüglich ihrer „Dauerfestigkeiten“ normiert. Die Normierung erfolgt durch Verschiebung der Einzelversuchsreihen in Lastrichtung auf ein für die 50 %-Dauerfestigkeiten einheitliches Niveau $S_{D_{norm}}$ (vgl. Abbildung 3, rechts). Danach werden nur die derart verschobenen Zeitfestigkeitsdaten betrachtet und einer gemeinsamen, einparametrischen Regression unterzogen. Die Regression ist einparametrisch, da der Exponent aus der vorangegangenen Normierung im Zeitfestigkeitsgebiet vorgegeben wird. Als frei zu bestimmender Parameter bleibt die gesuchte Ecklastwechselzahl, die sich über den Schnittpunkt der ermittelten Zeitfestigkeitslinie mit der Linie $S_a = S_{D_{norm}}$ ergibt.

Normierte Einzelwöhlerlinien. Die mittels Normierung erhaltenen Wöhlerlinienexponenten und Ecklastwechselzahlen lassen sich durch einparametrische Regression auf die Einzelversuchsreihen anwenden. Der jeweils frei zu bestimmende Parameter ist die Bezugsamplitude zur normierten Ecklastwechselzahl (Dauerfestigkeit).

Die normiert ausgewerteten Einzelwöhlerlinien ergeben sich als parallele Linienzüge mit unterschiedlicher Bezugsamplitude (Dauerfestigkeit) (vgl. Abbildung 4).

3.2 Auswertung der Versuchsreihen

3.2.1 Wöhlerlinien

Durch normierte Auswertung der 186 durchgeführten Einzelversuche ergeben sich die in Tabelle 4 zusammengestellten Wöhlerlinienparameter und Streuspannen. Die entsprechenden Einzelwöhlerlinien sind in Abbildung 4 dargestellt.

Tabelle 4: Wöhlerlinienparameter aus normierter Auswertung

Probenform	Zeitfestigkeit		Dauerfestigkeit	
	k	T_N	N_D	T_S
gekerbt	5.8	1.8	$2 \cdot 10^5$	1.7
ungekerbt	16.8	5.3	$3 \cdot 10^6$	1.3

Die in Tabelle 4 angegebenen Ergebnisse entsprechen nicht den laut Literatur anzunehmenden Werten. Nach HAIBACH [4] ergeben sich bei dauerfestigkeitsnormierter Auswertung von Versuchsreihen unter Zug-/Druck- und Biegebeanspruchung Ecklastwechselzahlen von $3 \cdot 10^5$ (gekerbt) und $1 \cdot 10^6$ (ungekerbt). Im Unterschied zu HAIBACH liegt hier jedoch eine Torsionsbelastung der Bauteile vor.

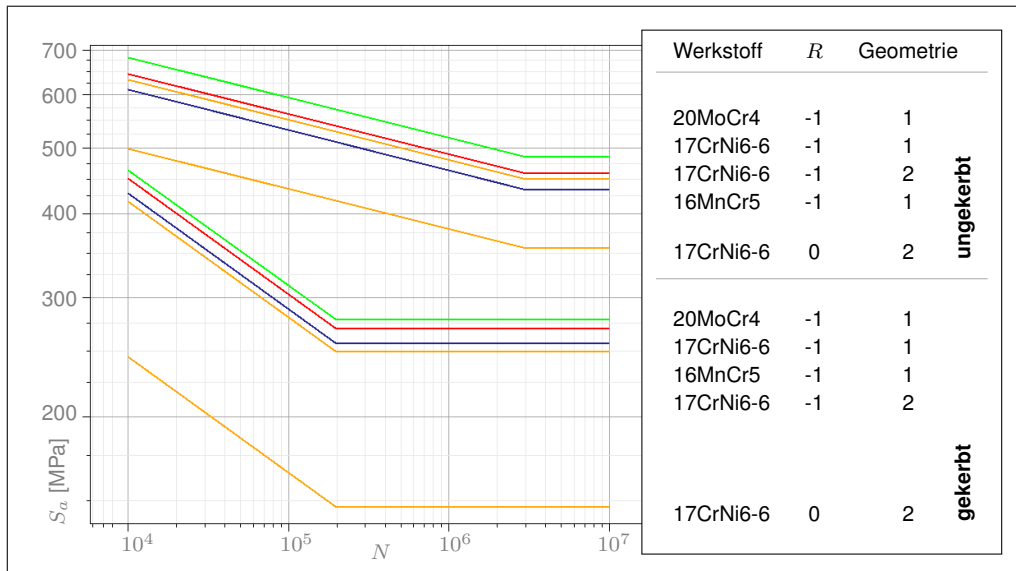


Abbildung 4: Ermittelte Wöhlerlinien

3.2.2 Aus Wöhlerlinien ableitbare Aussagen

Kerbeinfluss Der Einfluss von Kerben auf die dynamische Bauteilfestigkeit wird mittels der Kerbwirkungszahl K_f als Verhältnis der ertragbaren Nennspannungsamplituden beschrieben:

$$K_f = \frac{S_{a \text{ ungekerbt}}}{S_{a \text{ gekerbt}}} \quad (1)$$

Die ermittelten Kerbwirkungszahlen sind in Tabelle 5 angegeben. Für die Werkstoffe 17CrNi6-6 und 16MnCr5 ergeben sich nahezu identische Kerbempfindlichkeiten, der Werkstoff 20MoCr4 weist eine größere Kerbempfindlichkeit auf. Die höchste Kerbempfindlichkeit wird für die großen 17CrNi6-6-Proben ermittelt. Als Begründung für den deutlichen Unterschied in der Kerbempfindlichkeit der großen und kleinen 17CrNi6-6-Proben lässt sich der um Faktor zwei größere hochbeanspruchte Bereich der großen Proben angeben [1].

Tabelle 5: Ermittelte Kerbwirkungszahlen

	$\frac{A_2}{A_1}$ 16MnCr5, klein	$\frac{B_2}{B_1}$ 20MoCr4, klein	$\frac{C_2}{C_1}$ 17CrNi6-6, klein	$\frac{C_4}{C_3}$ 17CrNi6-6, groß
K_f	1.69	1.74	1.70	1.80

Werkstoffeinfluss Der Einfluss des Werkstoffs auf die Festigkeit ergibt sich für die gekerbten und ungekerbten Proben in einheitlicher Tendenz. Die dynamischen Festigkeiten ergeben sich in der Reihenfolge $B_{(20MoCr4)} > C_{(17CrNi6-6)} > A_{(16MnCr5)}$. Im Vergleich der gekerbten und ungekerbten Proben gibt es lediglich geringe Unterschiede für den Werkstoff 20MoCr4. Hier liegt die dynamische Festigkeit im gekerbten Zustand im Verhältnis etwas niedriger als im ungekerbten. Dies ist durch eine höhere Kerbempfindlichkeit des Werkstoffes erklärbar.

Die Festigkeitsverhältnisse sind in Tabelle 6 für die Einzel- und die normierte Auswertung angegeben.

Tabelle 6: Verhältnisse der dynamischen Festigkeiten bezogen auf 17CrNi6-6 (Werkstoffeinfluss)

$\frac{16MnCr5}{17CrNi6-6}$		$\frac{20MoCr4}{17CrNi6-6}$		$\frac{17CrNi6-6}{17CrNi6-6}$	
gekerbt	ungekerbt	gekerbt	ungekerbt	gekerbt	ungekerbt
0.95	0.95	1.03	1.06	1	1

Mittelspannungsempfindlichkeit Die Mittelspannungsempfindlichkeit wurde anhand zweier Wöhlerlinien der Spannungsverhältnisse $R = -1$ und $R = 0$ abgeleitet:

$$M = \frac{S_{a(R=-1)} - S_{a(R=0)}}{S_{m(R=0)}} \quad (2)$$

Die Auswertung ergibt $M = 0.3$ für den ungekerbten und $M = 0.7$ für den gekerbten Fall. Der große Unterschied in den erhaltenen Mittelspannungsempfindlichkeiten lässt sich über die verschiedenen zugrundeliegenden Spannungszustände im höchstbeanspruchten Bereich erklären. Für die ungekerbte Probe handelt es sich um einen zweiachsigen Schubspannungszustand, für die gekerbte Probe um einen einachsigen Normalspannungszustand (vgl. Abbildung 2). Die für die gekerbten Proben dennoch recht groß erscheinenden Empfindlichkeiten stehen in Einklang mit Aussagen aus Arbeiten zum FKM-Vorhaben „Verbessertes Berechnungskonzept FKM-Richtlinie“ [6]. Hier werden im Zusammenhang mit randschichtgehärteten Bauteilen unter Zug-/Druckbeanspruchung Mittelspannungsempfindlichkeiten $M_\sigma = 0.63$ angegeben.

Größeneinfluss Die Beurteilung des Größeneinflusses erfolgte über die Nennspannungsverhältnisse $\frac{S_{nenn\ groß}}{S_{nenn\ klein}}$ der gekerbten und ungekerbten 17CrNi6-6 Proben. Im Ergebnis erhält man die Aussage, dass die Beanspruchbarkeit der großen Proben bei gleicher Beanspruchung niedriger ist als bei den kleinen (97 % ungekerbt und 92% gekerbt). Der festgestellte Einfluss der Bauteilgröße auf die Festigkeit ist über den für die großen Proben größeren hochbeanspruchten Bereich, also über den statistischen Größeneinfluss, zu erklären [1].

Einfluss des Reinigungsstrahlens Der Einfluss des Reinigungsstrahlens auf die dynamische Festigkeit wurde anhand der kleinen gekerbten 16MnCr5-Proben untersucht. Den Erwartungen entsprechend ergaben sich im Bereich der Kurzzeitfestigkeit nahezu gleiche Beanspruchbarkeiten. Mit zunehmender Lastwechselzahl wird die festigkeitssteigernde Wirkung des Reinigungsstrahlens erkenn-

bar. Im Gebiet der Dauerfestigkeit war eine um ca. 33 % höhere Festigkeit der reinigungsgestrahlten Variante festzustellen.

4 Betriebslastenversuche

Basis der Betriebslastenversuche war ein getriebetypisches, aus Messdaten extrapoliertes Kollektiv. Das Kollektiv wurde in Form einer Rainflowmatrix bereitgestellt und ist in normierter Form (Max=100 %) in Abbildung 5 dargestellt. Charakteristisch für das Ausgangskollektiv ist der große Anteil von Schwingungen mit hoher Mittellast und kleiner Amplitude. Infolge des einseitig dominanten Auftretens hoher Mittellasten ergibt sich ein signifikanter Prozessmittelwert. Das verwendete Kollektiv ist typisch für Wandlergetriebe in Nutzfahrzeugen.

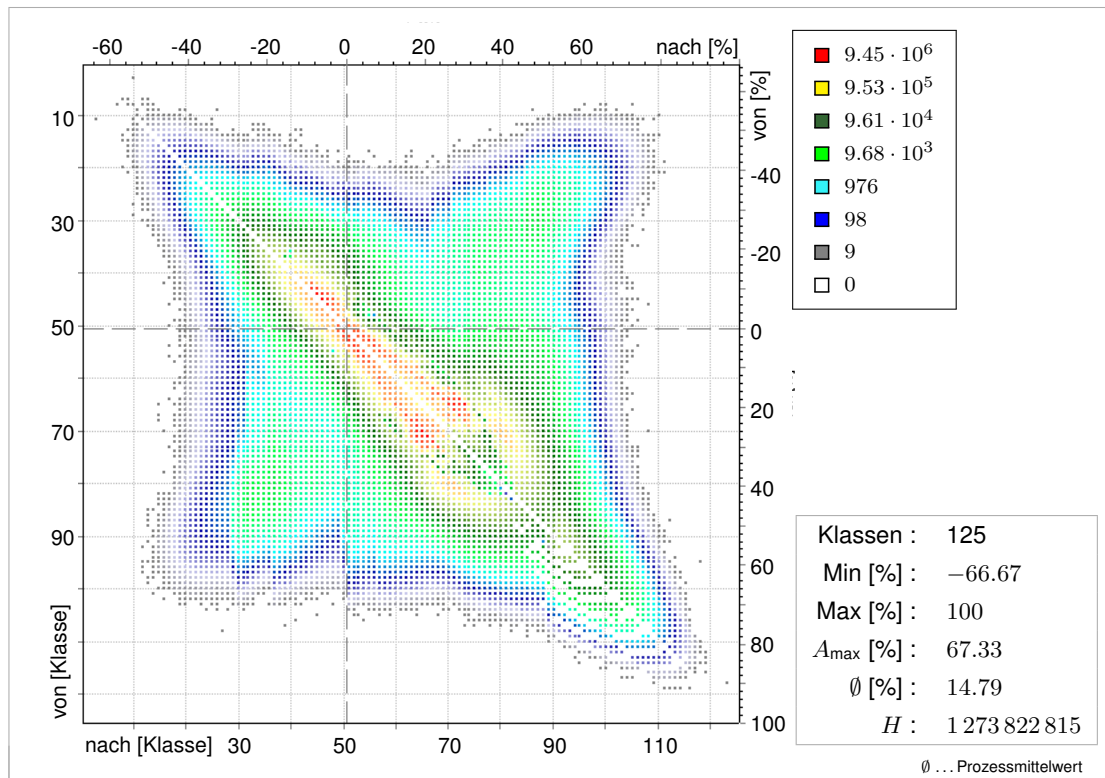


Abbildung 5: Rainflowmatrix und Parameter des Ausgangskollektivs

4.1 Prüfkollektiverstellung

Konzept der Prüfkollektiverstellung Um die laut Versuchsplan vorgesehenen Betriebslastfolgen umsetzen zu können, war das Basiskollektiv auf ein realisierbares Prüfkollektiv zu kürzen und der geforderten Omission (25 %, 50 % und 75 % bzgl. S_D) zu unterziehen. Dazu wurde ein Konzept erarbeitet, das eine Vergleichbarkeit der für verschiedene Werkstoffe durchzuführenden Versuchsreihen gewährleistet, sowie deren gemeinsame Auswertung ermöglicht:

- Kollektivkürzung so, dass das gekürzte Kollektiv auf dem Prüfstand in angemessener Zeit fahrbar wäre und in ca. 4 Durchläufen $6 \cdot 10^6$ Lastwechsel erreicht. \Rightarrow Kürzung auf $1.5 \cdot 10^6$ Lastwechsel.
- Omission so, dass für alle Prüfteile einheitliche Lastfolgen (Summenhäufigkeit und Reihenfolge) verwendet werden können. \Rightarrow Normierung des Kollektivgrößtwertes bezüglich der Dauerfestigkeit:

$$S_{a_{max}} = a \cdot S_D \quad (3)$$

- Omission so, dass bei 75 % Omission noch eine Summenhäufigkeit von ca. 10^4 Lastwechseln erreicht wird. \Rightarrow Festlegung des Skalierungsfaktors a .

Das Konzept sichert die Übereinstimmung von maximal auftretender Betriebslast und experimentell belegter Wöhlerlinie ab und gewährleistet realisierbare Versuchszeiten, ohne dabei die Aussagefähigkeit der Betriebslastenversuche zu beeinträchtigen (kürzestes Lastkollektiv degeneriert nicht zum Einstufenversuch). Infolge der Normierung ergeben sich die Prüflastfolgen verschiedener Werkstoffe jeweils aus einheitlichen Umkehrpunktfolgen, ein möglicher Einfluss der Reihenfolge auf die abzuleitenden Aussagen ist somit ausgeschlossen.

Umsetzung des Konzeptes Die Umsetzung der Kollektivkürzung und Omission erfolgt auf Grundlage eines festzulegenden Schadensparameters. Im vorliegenden Fall wurde die Amplitude eines Schwingenspiels als Schadensparameter aufgefasst und als Bezugsgröße für die Manipulation der Kollektive verwendet. Als Bezug für die Skalierung der Lastfolgen dienten die auf den Prozessmittelwert des 25 %-Omission Kollektivs umbewerteten Dauerfestigkeiten S_{DB} . Die Skalierungsfaktoren für die Kollektivgrößtwerte bzgl. S_{DB} ergaben sich für die gekerbten Proben zu $a = 2.5$ und für die ungekerbten Proben zu $a = 1.9$. Die resultierenden Amplitudenkollektive sind in Abbildung 6 unter Angabe der Prüfkollektivumfänge dargestellt.

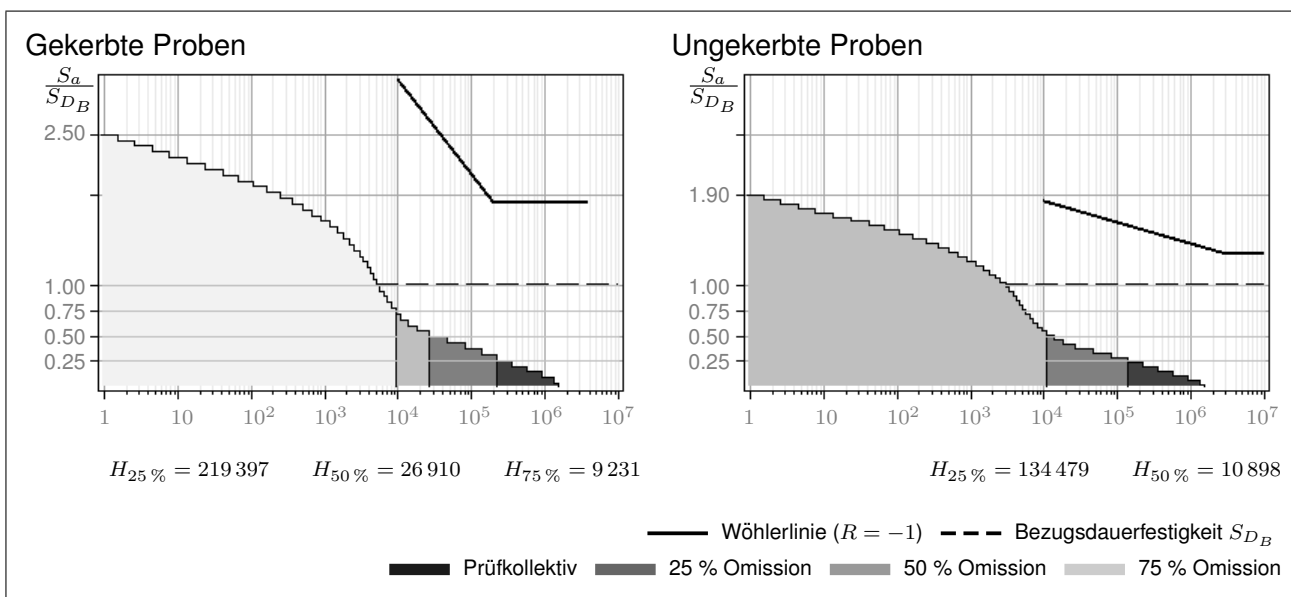


Abbildung 6: Normierte Darstellung der Amplitudenkollektive und Wöhlerlinien

Zweites zu untersuchendes Kollektiv Ein zweites zu untersuchendes Kollektiv wurde aus den Prüflastfolgen des ersten Kollektivs generiert, indem jeweils der Prozessmittelwert des 25 %-Omission Kollektivs aus den Umkehrpunktfolgen entfernt wurde. Die Lastfolgen des zweiten Kollektivs sind also hinsichtlich Amplitude, Häufigkeit und Reihenfolge identisch zu Kollektiv 1. Die Rainflowmatrizen der 25 %-Omission Kollektive sind in Abbildung 10 gegenübergestellt. Der Vergleich der Versuchsergebnisse der Kollektive liefert Aussagen zum Einfluss der Mittelspannungsempfindlichkeit auf die Lebensdauer.

4.2 Auswertung der Versuchsreihen

Die Auswertung der Versuchsreihen hinsichtlich Lebensdauer erfolgte im Wahrscheinlichkeitsnetz unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung für die erreichten Lastwechselzahlen.

4.2.1 Beurteilung von Omission und Kollektiveinfluss

Um eine Vergleichbarkeit der in den Betriebslastenversuchen ermittelten Ergebnisse bezüglich Omission herstellen zu können, ist die Angabe der erreichten Lastfolgendurchläufe oder, gleichbedeutend,

die Angabe der Lastwechselzahlen multipliziert mit dem Omission-Faktor zweckmäßig. Der Omission-Faktor ergibt sich als Verhältnis der Summenhäufigkeiten der originalen zur gekürzten Lastfolge.

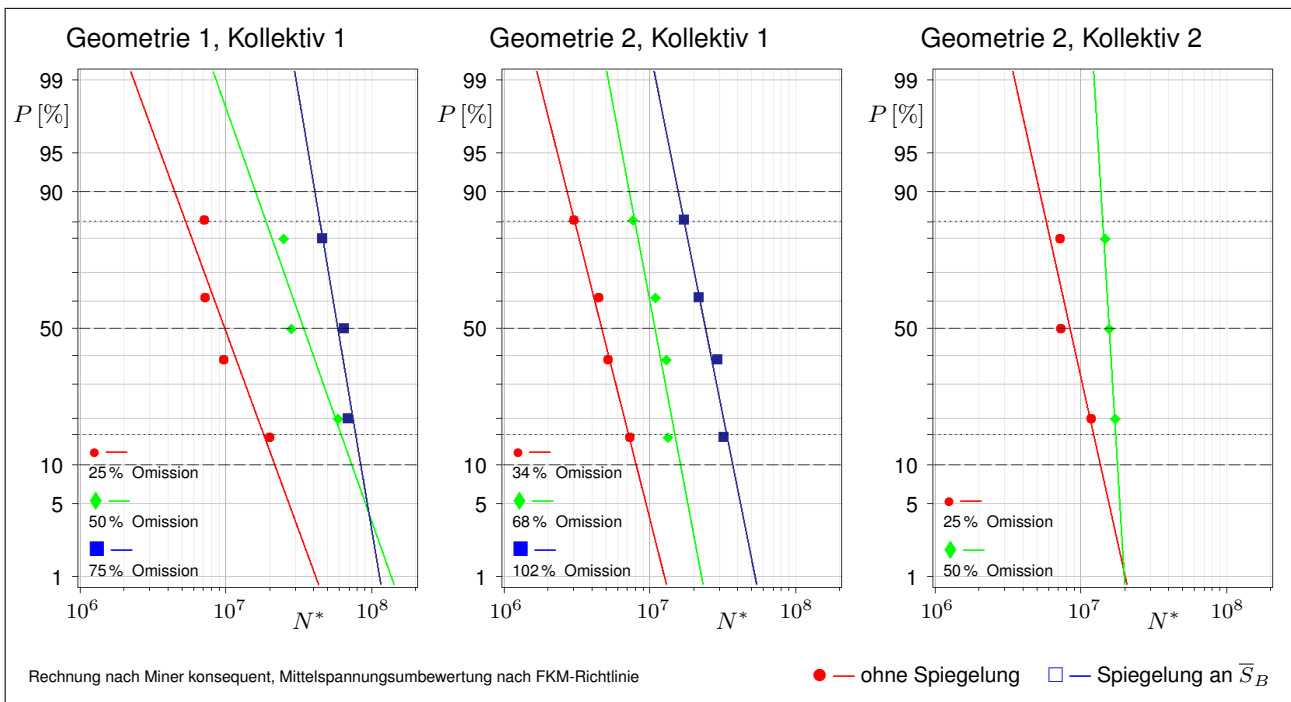


Abbildung 7: Auswertung der Versuchsergebnisse zur Beurteilung des Einflusses der Omission

Abbildung 7 zeigt die Auswertung der zur Beurteilung des Einflusses der Omission verwendeten Versuchsergebnisse und Tabelle 7 die Verhältnisse der 50 %-Lebensdauerwerte, wie sie sich für unterschiedliche Omission-Stufen gleicher Kollektive und gleiche Omission-Stufen verschiedener Kollektive ergeben. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass für Geometrie 2 anstelle der Omission-Stufen 25 %, 50 % und 75 % aufgrund eines Fehlers in der Skalierung Versuchsreihen unter 34 %, 68 % und 102 % Omission gefahren wurden.

Tabelle 7: Lebensdauererhältnisse zur Beurteilung der untersuchten Einflüsse

	Geometrie 1		Geometrie 2	
	Kollektiv 1	Kollektiv 1	Kollektiv 1	Kollektiv 2
$\frac{N_{Level 2}^*}{N_{Level 1}^*}$	3.48	2.32	1.80	1.44
$\frac{N_{Level 3}^*}{N_{Level 1}^*}$	5.95	5.17	-	-

Omission am Kollektiv 1 Im Vergleich zu Literaturangaben ist das Lebensdauererhältnis von 3.5, wie es sich für das 50 %- und 25 %-Kollektiv ergibt, sehr groß. HEULER und SEEGER [7] geben Faktor 1.2... 1.55 für 50 % Omission gegen das Ausgangskollektiv an. Die dort durchgeführte Omission wurde jedoch an Kollektiven mit relativ kleinen Mittellastschwankungen (Lastfolge Twist und MiniTwist) untersucht. Der festgestellte große Einfluss ergibt sich, da in diesem Vorhaben die Omission ohne Berücksichtigung der Mittellastempfindlichkeit durchgeführt wurde. Die hier angewendete Omission ist dementsprechend deutlich härter, da ein Großteil kleiner Lastwechsel mit hoher Mittellast entfernt wurden. Im Ersatzamplitudenkollektiv (mittels Haigh-Schaubild auf $R = -1$ umbewertetes Kollektiv) würden diese Lastwechsel oberhalb der Omission-Grenze liegen. Aufgrund der hohen Mittelspannungsempfindlichkeit der Proben ($M = 0.7$) wird dieser Effekt noch verstärkt. Tabelle 8 zeigt, wie

sich die am Amplitudenkollektiv vorgenommene Omission (ohne Berücksichtigung der Mittelspannungsempfindlichkeit) im Ersatzamplitudenkollektiv (unter Berücksichtigung von M) auswirkt. Angegeben sind die Omission-Werte, wie sie sich für die größten entfernten Amplituden ergeben. Wie aus

Tabelle 8: Vergleich der Omission-Level im Amplituden- und Ersatzamplitudenkollektiv

Berücksichtigung von M	Größe aus Kollektiv entfernte Amplitude bzgl. S_{DB}					
nein	25 %	50 %	75 %	34 %	68 %	102 %
ja	57 %	118 %	162 %	76 %	158 %	220 %

M ... Mittelspannungsempfindlichkeit, S_{DB} ... Bezugsdauerfestigkeit

der Gegenüberstellung errechnet werden kann, ergeben sich die im Amplitudenkollektiv angesetzten Omission-Level für die größten aus dem Ersatzamplitudenkollektiv entfernten Amplituden im Mittel mit Faktor 2.25.

Kollektiveinfluss auf die Omission Den Einfluss der Mittelspannungsempfindlichkeit auf die Lebensdauerverhältnisse macht der Vergleich der Omission bei Kollektiv 1 und Kollektiv 2 deutlich. Wie Tabelle 7 (rechts) zeigt, werden für Kollektiv 2 bis zu 80 % höhere Lebensdauerwerte erreicht. Der festgestellte Effekt ist über die in Kollektiv 1 dominant am Schädigungsprozess beteiligten und durch das Entfernen des Prozessmittelwertes in Kollektiv 2 deutlich entschärften kleinen Lastwechsel hoher Mittellast zu begründen. Tabelle 7 (links) zeigt einen um 20 % niedrigeren Einfluss der Omission für Kollektiv 2. Auch dieser Effekt ist über die entschärfte Beteiligung kleiner Lastwechsel hoher Mittellast am Schädigungsprozess zu begründen. Der damit gestiegene Einfluss großer Lastwechsel bleibt auch bei höheren Omission-Stufen erhalten.

4.2.2 Werkstoffeinfluss und Ableitung gemeinsamer Streuspannen

Der Einfluss des Werkstoffs auf die Lebensdauer wurde anhand der Versuchsreihen an den kleinen gekerbten Proben untersucht. Die selben Versuchsreihen wurden anschließend auf ihren Mittelwert normiert und zur Ableitung einheitlicher Streuspannen gemeinsam ausgewertet. Die entsprechenden Auswertungen sind in Abbildung 8 dargestellt.

Wie aus den Darstellungen deutlich wird, ergeben sich für die Proben der Werkstoffe 17CrNi6-6 und 20MoCr4 nahezu identische Lebensdauerwerte. Der Werkstoff 16MnCr5 erreicht eine um Faktor 2.8 höhere Lebensdauer.

Die gemeinsame Auswertung der Versuchsreihen ergibt eine Streuspanne von $T_N = 3.3$.

5 Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept

5.1 Variationen der Lebensdauerrechnung

Hinsichtlich der Berechnung der Lebensdauer wurde nach Parametern gesucht, die eine treffsichere Abschätzung ermöglichen. Im Rahmen des Nennspannungskonzeptes können lediglich Parameter Berücksichtigung finden, deren Einfluss im Mittel über die gesamte Lastfolge und über mehrere Lastfolgendurchläufe konstant ist. Hier wird angenommen, dass sich das Bauteil, basierend auf kinematischen Verfestigungsvorgängen, auf einen Mittelwert einspielt und sich damit das Bezugssystem zur Beschreibung des schädigungsrelevanten Spannungs-Dehnungsverhalten auf einen Bezugsmittelwert verschiebt. Als Bezugsmittelwert \bar{S}_B wird zum einen der Prozessmittelwert \bar{S}_{mp} , zum anderen der Mittelwert der Lastfolgenextrema \bar{S}_{mEx} angesetzt.

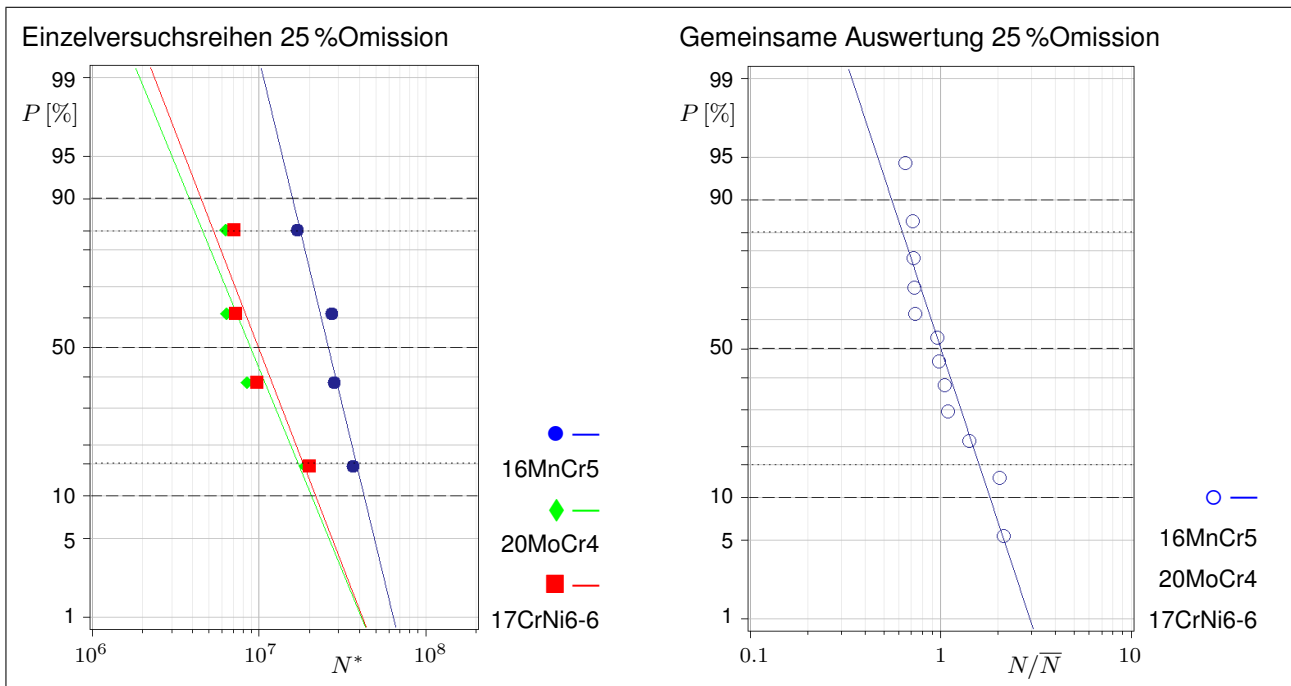


Abbildung 8: Einzel- und gemeinsame Auswertung der Versuchsreihen klein, gekerbt, 25% Omission

Eine weitere Variation der Lebensdauerrechnung ergibt sich aus der Annahme, dass relativ zum Bezugsmittelwert kein Unterschied im Schädigungsbeitrag zug- und druckmittelwertbehafteter Lastwechsel besteht.

Die angedachten Variationen lassen sich alle durch Manipulation des zur Mittelspannungsbewertung verwendeten Haigh-Schaubildes umsetzen (Gleichung (4)). Die Orientierung am Bezugsmittelwert wird dabei durch Differenzbildung, die Schädigungsgleichheit für Zug- und Druckmittelwerte durch Symmetrierung (Spiegelung) des Haigh-Schaubildes an der Achse $S_m = \bar{S}_B$ erreicht:

Orientierung am Bezugsmittelwert

$$S_{a\text{Ersatz}} = S_a + M (S_m - \bar{S}_B)$$

Umorientierung und Spiegelung

$$S_{a\text{Ersatz}} = S_a + M (|S_m - \bar{S}_B| + \bar{S}_B) . \quad (4)$$

Infolge dieser Umbewertung ist zu beachten, dass entweder die Schadensakkumulation gegen eine Wöhlerlinie erfolgt, die für \bar{S}_B gilt, oder eine nochmalige Umbewertung der nach Gleichung (4) ermittelten Ersatzamplitude auf eine andere vorliegende Wöhlerlinie erfolgen muss.

Infolge der Mittellastumbewertung mit $M = 0$, $M = \text{konst.}$, bzw. $M, \frac{M}{3}$, 0 für $R \leq 0$, $0 < R \leq 0.5$, $R > 0.5$ sowie der Orientierung der Varianten $M \neq 0$ an zwei Bezugswerten \bar{S}_B und der Spiegelung aller Varianten ergeben sich 14 zu bewertende Variationen. Die Schadensakkumulation erfolgte jeweils nach Miner original, elementar, modifiziert und konsequent.

Bewertung der Treffsicherheit Die Bewertung der Treffsicherheit erfolgte auf Basis relativer Schadenssummen $D_{\text{rel}} = \frac{N_{\text{Versuch}}}{N_{\text{Rechnung}}}$. Als relevante Größe zur Beurteilung der Treffsicherheit der Lebensdauerberechnung wird die Streuung der relativen Schadenssummen aller Versuchsreihen angesehen [3]. Die Auswertung der relativen Schadenssummen erfolgte im Wahrscheinlichkeitsnetz unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung.

Modifikationen der Miner Regel. Die verschiedenen Auslegungen der Miner-Regel liefern Ergebnisse in der typischen Abstufung $N_{\text{original}} > N_{\text{konsequent}} > N_{\text{modifiziert}} > N_{\text{elementar}}$. Die Unterschiede in den Rechenverfahren fallen sehr gering aus, da durch Omission gerade die Lastwechsel aus den Kollektiven entfernt wurden, die den Unterschied in den Hypothesen zur Schadensakkumulation ausmachen. **Variationen des Haigh-Schaubildes, anzusetzende Schadenssumme.** Die Untersuchten Variationen des Haigh-Schaubildes zeigten gegenüber der konventionellen Umsetzung nach FKM-Richtlinie keine

deutliche Verbesserung der Lebensdauerabschätzung. Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Auswertungen der relativen Schadenssummen für unterschiedliche Bezugsmittelwerte, jeweils mit und ohne Spiegelung. Da die durch Orientierung am Prozessmittelwert oder dem Mittelwert der Prozess-

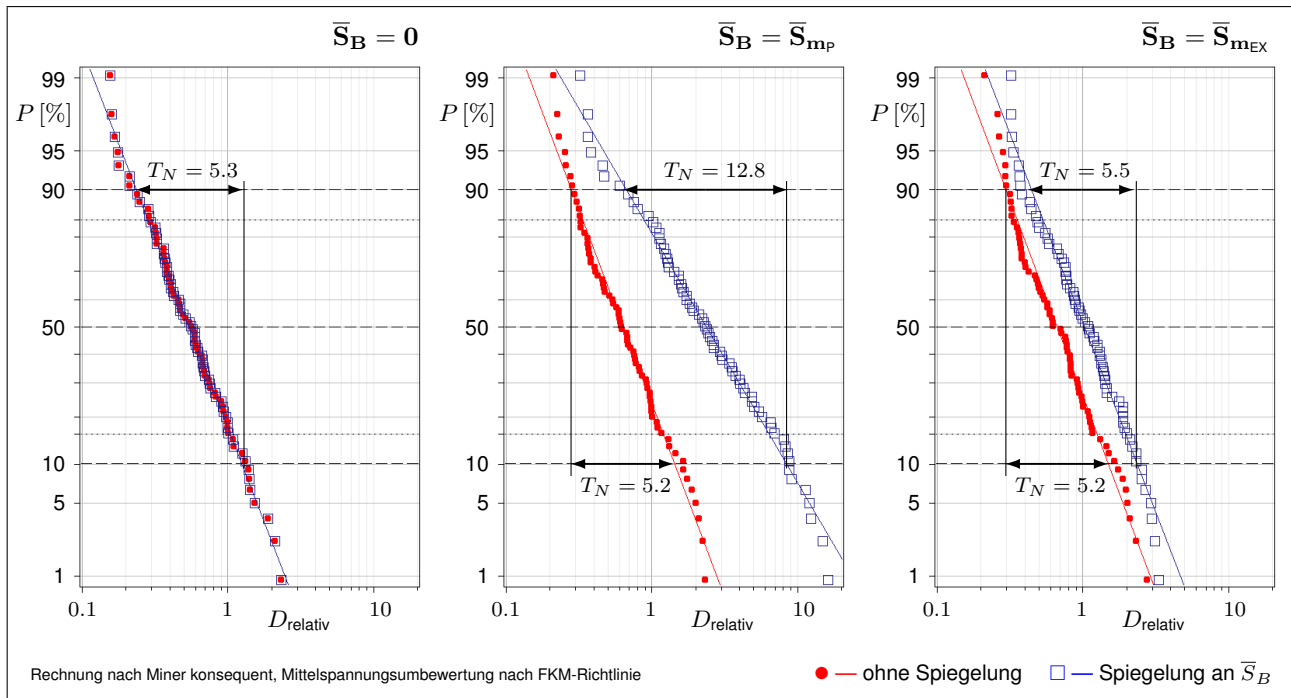


Abbildung 9: Auswertung relativer Schadenssummen im Wahrscheinlichkeitsnetz

trema erreichte Verminderung der Streuung sehr gering ausfällt, wird die konventionelle Umsetzung nach FKM-Richtlinie als geeignetste Variante empfohlen. Für die Berechnung einsatzgehärteter Wellen unter Torsionsbelastung kann eine relative Schadenssumme von $D_{rel} = 0.5$ angegeben werden. Der getroffenen Aussage liegen 72 Einzelversuche zugrunde. Die Streuspanne um diesen Mittelwert ist mit $T_D = 5.3$ anzunehmen.

5.2 Besonderheit bei der Lebensdauerrechnung

Im Unterschied zur Berechnung von Bauteilen unter Zug-/Druck-Belastung, kann bei torsionsbelasteten Bauteilen infolge des im ungestörten Bereich vorliegenden zweiachsigen Spannungszustandes keine Unterscheidung der Zug- und Druckrichtung im eigentlichen Sinne getroffen werden. Abbildung 2 macht deutlich, dass sich die maximale Beanspruchung im vorliegenden Fall am Querbohrungsrand als einachsige Zug- bzw. Druckbeanspruchung ergibt. Geht man davon aus, dass sich ein Anriss normal zur maximal auftretenden Zugspannung einstellt, so erfolgt der Bruch des Bauteils für den dargestellten Lastfall unter 45° zur Horizontalen. Ändert man den Richtungssinn des angreifenden Moments, so verschieben sich die Orte maximaler Zugbeanspruchung und damit der Ausfallort, die Bruchlage dreht sich um 90° .

Übertragen auf die Belastung mit variablen Amplituden bedeutet dies, dass sich für alle Kollektive, deren Rainflowmatrizen bezüglich einer Diagonalen $S_m = 0$ nicht symmetrisch sind, mit einer Umkehrung der positiv gezählten Lastrichtung der Ausfallort ändert. Im Sinne einer Lebensdauerberechnung, die unter Berücksichtigung der Mittelspannungsempfindlichkeit erfolgt, wird dementsprechend durch Festlegung der positiv gezählten Lastrichtung über den berechneten Ausfallort entschieden.

Abbildung 10 verdeutlicht den beschriebenen Effekt anhand der Rainflowmatrizen der im Projekt untersuchten Kollektive 1 und 2. In den Darstellungen sind jeweils schematisch die zur Bildung der Ersatzamplitudenkollektive benötigten Haigh-Schaubilder eingezeichnet, sowie, durch Buchstaben gekennzeichnet, die zugehörigen Ausfallorte an der Querbohrung angegeben. In der rechten Abbildung

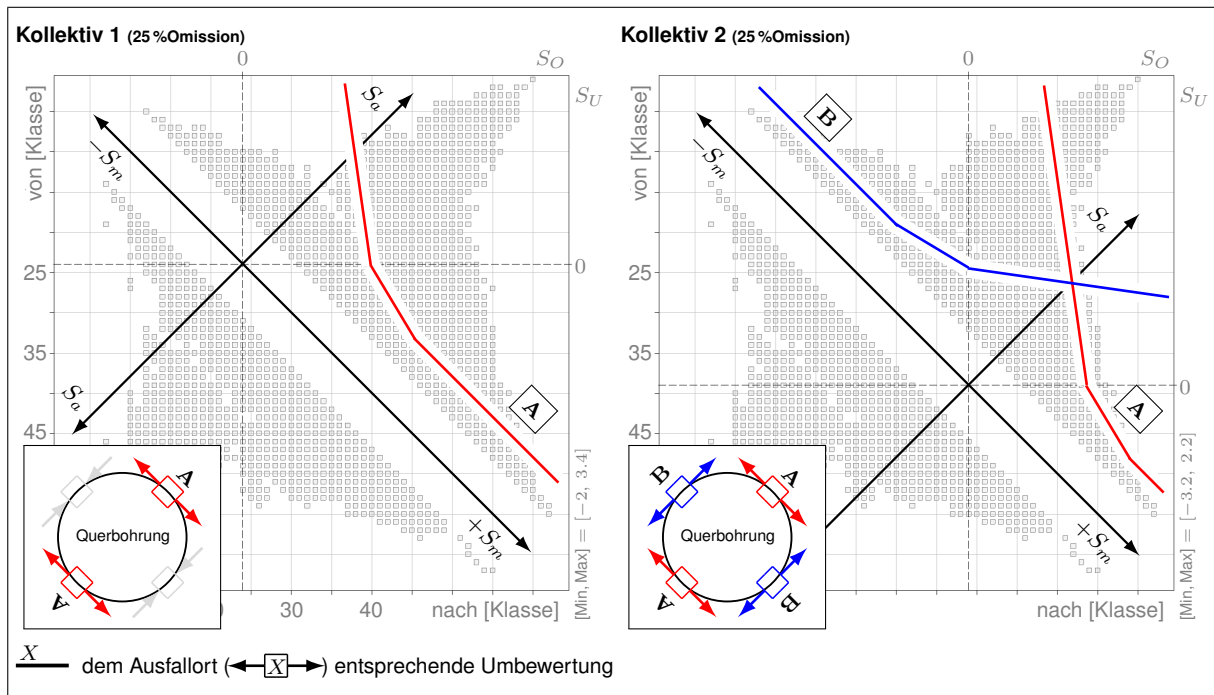


Abbildung 10: Rainflowmatrizen mit Haigh-Schaubild und beispielhaft dargestellter Umbewertung entsprechend Ausfallort an der Querbohrungskerbe

ist deutlich zu erkennen, dass durch Verwendung der Umbewertung A alle großen Amplituden abgemindert werden, da ihnen eine Druckmittelspannung unterstellt wird, was für den realen Ausfallort (B) jedoch nicht zutreffend ist. Die richtige Mittelspannungsumbewertung, und damit den richtigen Ausfallort, erhält man durch Spiegelung des Haigh-Schaubildes an der Achse $S_m = 0$ oder, gleichbedeutend, durch Vorzeicheninversion aller Mittellasten.

Lässt sich für ein Betriebslastenkollektiv nicht von vornherein abschätzen, welche Orientierung des Haigh-Schaubildes die höhere Schadenssumme erzeugt, sind beide Varianten zu rechnen und die größere errechnete Schadenssumme ist zu verwenden.

6 Zusammenfassung

Kern des Forschungsvorhabens war ein umfangreicher Versuchsplan. Insgesamt wurden 188 Einstufenversuche und 78 Betriebslastenversuche durchgeführt.

Einstufenversuche. Die Anwendung einer gegenüber HAIBACH modifizierten normierten Auswertung von Wöhlerlinien gestattete eine widerspruchsfreie Ableitung von Aussagen zu allen Problemstellungen des Vorhabens. Die geänderte Vorgehensweise bei der Normierung ergab sich in erster Linie aus der Problemstellung von aus statistischer Sicht unzureichend abgesicherten Versuchsreihen zur Abschätzung der Dauerfestigkeiten im Vertrauensbereich. Im Ergebnis konnten plausible Aussagen zu einheitlichen Wöhlerlinienexponenten, Ecklastwechselzahlen und Streuspannen einsatzgehärteter Wellen unter Torsionsbelastung angegeben werden. Dass die ermittelten Ecklastwechselzahlen und Exponenten sich von den Haibach'schen unterscheiden, ist durch die unterschiedlichen zugrundeliegenden Beanspruchungsarten zu erklären. Anhand der für einsatzgehärtete Bauteile ermittelten Streuspanne von $T_N = 1.8$ lassen sich Sicherheitsfaktoren für niedrigere Ausfallwahrscheinlichkeiten ableiten.

Der untersuchte Einfluss von drei Werkstoffen auf die Bauteilfestigkeit ergibt sich in der Tendenz $20\text{MoCr4} > 17\text{CrNi6-6} > 16\text{MnCr5}$.

Die Kerbempfindlichkeit der untersuchten Werkstoffe unterscheidet sich um maximal 3 %. Die höchste Empfindlichkeit wurde für den Werkstoff 20MoCr4 festgestellt.

Bezüglich Mittelspannungsempfindlichkeit gradientenbehafteter (einsatzgehärteter) Wellen wurde für

die gekerbten Proben ein sehr hoher Wert von $M = 0.7$ ermittelt. Unter reiner Schubbeanspruchung (ungekerbte Proben) ergibt sich $M = 0.26$.

Die Untersuchungen zum Größeneinfluss entsprechen den Erwartungen einer mit zunehmender Bauteilgröße sinkenden Festigkeit. Der für die gekerbten Proben deutlicher auftretende Effekt konnte über den statistischen Größeneinfluss begründet werden.

Der Einfluss des Reinigungsstrahlens wurde, auch wenn die Prozessparameter nicht bekannt sind, in seiner Intensität mit deutlicher Tendenz zum Festigkeitsstrahlen bewertet.

Betriebslastenversuche. Mit dem Vorhaben wurde ein Konzept zur Planung von Betriebslastenversuchen erstellt. Es ermöglicht eine spätere gemeinsame Auswertung verschiedener Versuchsreihen, sichert die Übereinstimmung von maximaler Betriebslast und experimentell belegter Wöhlerlinie ab und gewährleistet realisierbare Versuchszeiten, ohne die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu beeinflussen.

Um den Erwerb kommerzieller Software zu umgehen und die Möglichkeit des Einbringens neuer Ideen zu schaffen, wurde ein eigenes Softwaretool zur Modifikation und Rekonstruktion von Rainflowmatrizen entwickelt.

Die Untersuchungen zum Einfluss von Omission auf die Lebensdauer liefern das wichtigste Ergebnis dieser Arbeit. Kommerzielle Software realisiert die Omission ohne Berücksichtigung der Mittelspannung der Elemente der Rainflowmatrix, also am Range-Pair-Kollektiv. Wie im Vorhaben abgeleitet, haben einsatzgehärtete Bauteile eine sehr hohe Mittelspannungsempfindlichkeit. Bereits bei 50 % Omission gegen das Range-Pair-Kollektiv werden Amplituden bis 118 % S_D aus dem Ersatzamplitudenkollektiv entfernt. Dies erklärt die deutliche Lebensdauererlängerung bis zum Faktor 3.5. Die Versuchszeitverkürzung durch Omission muss zukünftig für einsatzgehärtete Bauteile unter Torsionsbelastung, speziell für getriebetypische Kollektive mit einer großen Anzahl kleiner Schwingspiele hoher Mittellast, unter Berücksichtigung der Mittelspannungsempfindlichkeit erfolgen.

Der Werkstoff 16MnCr5 hat im Vergleich zu 17CrNi6-6 und 20MoCr4 im Betriebslastenversuch eine höhere Lebensdauer.

Die durch gemeinsame Auswertung der Betriebslastenversuche ermittelte Streuspanne ergibt sich zu $T_N = 3.3$. Sie liegt erwartungsgemäß höher als bei den normiert ausgewerteten Einstufenversuchsreihen ($T_N = 1.8$).

Lebensdauerabschätzung. Bei der Anwendung des Nennspannungskonzeptes auf torsionsbelastete Wellen ist, in für das Konzept untypischer Weise, der zu erwartende Ausfallort bei der Berechnung zu berücksichtigen.

Das Einbringen von Prozessparametern in die Mittelspannungsumbewertung zur integralen Berücksichtigung kinematischer Verfestigungsvorgänge bei der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept hat im Rahmen des Vorhabens keinen deutlichen Vorteil gezeigt.

Für die untersuchten bauteilähnlichen Proben wurden im Sinne der relativen Miner-Regel anzusetzende Schadenssummen von $D_{\text{relativ}} = 0.5$ ermittelt.

Literatur

- [1] BERNER, M.: *Lebensdauer von einsatzgehärteten Getriebewellen bei Kollektivbelastung*. Forschungshefte Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., FVA-Heft Nr. 988, 2011
- [2] ENV 1993-1-1: *Design of steel structures; Part 1-1: General rules and rules for building*. European Committee for Standardisation, Brussels, 1992
- [3] EULITZ, K.-G.: *Beurteilung der Zuverlässigkeit von Lebensdauer vorhersagen nach dem Nennspannungskonzept und dem Örtlichen Konzept anhand einer Sammlung von Betriebsfestigkeitsversuchen*, Technische Universität Dresden, Habilitation, 1999
- [4] HAIBACH, E.: *Betriebsfestigkeit*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2002
- [5] HÄNEL, B. ; HAIBACH, E. ; SEEGER, T. ; WIRTHGEN, G. ; ZENNER, H.: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl*. 5. Ausgabe. VDMA Verlag, 2003

- [6] HANEL, W. ; VORMWALD, M. ; ESDERTS, A. ; GUMBSCH, P.: *Ein verbessertes Berechnungskonzept des statischen Festigkeitsnachweises und Ermüdungsfestigkeitsnachweises für nichtgeschweisste Maschinenbauteile nach der FKM-Richtlinie -Festigkeitsnachweis-*. 2009
- [7] HEULER, P. ; SEEGER, T.: A criterion for omission of variable amplitude loading histories. In: *Int. J Fatigue* 4 (1986), S. 225–230
- [8] HOBACHER, A.: *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweisster Verbindungen und Bauteile*. IIW-Dokument XIII-1539-96/XV-845-96, The International Institute of Welding, 1996
- [9] HÜCK, M.: *Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen*. DVM, 6. Sitzung, S 147-176, Berlin, 1981
- [10] NEUBER, H.: *Kerbspannungslehre*. 3. neubearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1985
- [11] STAUBER, R.: Betriebsfestigkeit im Automobilbau: Berechnung und Versuch im Schulterschluss. In: *DVM Nachrichten* 32 (2004)