

## **Virtueller Prüfstand – Versuch und Simulation rücken zusammen**

### **Virtual Test Bench – Testing and Simulation move together**

Otmar Gattringer, MAGNA POWERTRAIN Engineering Center Steyr GmbH & Co KG  
Klaus Puchner, MAGNA POWERTRAIN Engineering Center Steyr GmbH & Co KG  
Harald Riener, MAGNA POWERTRAIN Engineering Center Steyr GmbH & Co KG

#### **Kurzfassung**

Berechnungsergebnisse sind maßgeblich von den verwendeten Eingangsdaten abhängig. Speziell im Fahrwerksbereich stellen hinreichend genaue Belastungsdaten eine große Herausforderung dar. Messdaten von Prüfstandsversuchen oder Messfahrten liegen oft zum jeweiligen Zeitpunkt noch nicht vor bzw. deren Generierung ist mit hohen Kosten verbunden. Bezüglich dieser Problematik bietet der virtuelle Prüfstand bzw. die Methode der virtuellen Iteration einen adäquaten Lösungsansatz. Die virtuelle Iteration beruht auf der Ermittlung der Anregung eines Modells im Zeitbereich mittels dynamischer Simulation (Mehrkörpersimulation). Durch den Iterationsprozess ist es somit, analog zum realen Prüfstand, weitgehend automatisiert durch Simulation möglich, äußere Belastungen einer Struktur so anzupassen, dass innere Messgrößen, d.h. korrekter Kraftfluss, mit gewünschter Genauigkeit abgebildet werden (Lösung eines nichtlinearen inversen Systems). Somit erspart man sich u.a. aufwendige Messungen von Lager- oder Radnabenkräften. Die Messung der inneren Größen ist hingegen meist relativ einfach (z.B. Radträger- oder Rahmenbeschleunigungen, Federwege, etc). Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass mit der virtuellen Iteration auch Absolutwege als Anregung eines Modells bestimmt werden können. Sind die Radnabenkräfte/-wege durch die virtuelle Iteration mit einer vorgegebenen Genauigkeit ermittelt, können verschiedenste Größen wie Schnittkräfte bzw. modale Daten für schwingend beanspruchte Bauteile berechnet werden. Diese dienen dann als Grundlage für die anschließende mehrachsige Lebensdauerbewertung mit FEM-FAT MAX der zu entwickelnden Komponente.

#### **Abstract**

Fatigue life results depend in large part on the input data that are used. Particularly in the chassis field, the sufficient accuracy of loads is a major challenge. Test bench measurement data or test drives are often not yet available, or are extremely expensive to generate. The virtual test bench respectively the method of the virtual iteration presents a well-rounded solution to this problem. Virtual iteration is based on determination of excitation of a model in the time domain using a dynamic simulation (multi-body simulation). Using an iteration process with simulation (MBS) analogous to actual test bench testing can allow you to adjust external loadings placed on a structure in such a way that internal measurements, i.e. proper load flow, can be reproduced with the desired accuracy (solution of a non-linear inverse problem). This can be used to replace procedures such as the time-consuming measurement of bearing or spindle loads. In contrast, internal measurements are usually relatively simple (such as wheel mount or chassis accelerations, suspension travel, etc.). Virtual iteration can also be used to determine the excitation of a vehicle from roadway profiles, another interesting aspect of this technology. If these hub loads are determined using virtual iteration with a predefined exactness, various values can be computed such as the internal forces or modal results for components under vibrational stresses. These can subsequently be used as a basis for durability assessment using FEMFAT MAX for the developing chassis component.

## **1. Einleitung**

Bis vor einiger Zeit waren Versuch und Simulation konkurrierende Disziplinen. Von außen gesehen ist dies schwer verständlich, sollten doch beide Bereiche den Entwicklungsprozess von Komponenten und Systemen unterstützen. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung im Versuchsbereich können heute sehr komplexe Prüfstände mit einer Vielzahl von Belastungskanälen betrieben werden. Dadurch können realitätsnahe Bedingungen für den Prüfling am Prüfstand erzeugt und zeitaufwendige Fahrversuche auf ein Minimum reduziert werden.

Im Bereich der Strukturanalyse gab und gibt es eine rasante Weiterentwicklung der eingesetzten Disziplinen wie Finite Elemente Methode (FEM), Mehrkörpersimulation (MKS), Betriebsfestigkeitsberechnung und Strukturoptimierung um nur einige zu nennen. Vielfach werden die verschiedenen Methoden gekoppelt verwendet. Bezüglich Festigkeit ist im automotiven Bereich die Bewertung dynamischer Betriebslasten von zentraler Bedeutung. Schlussendlich muss entschieden werden, ob die untersuchten Komponenten die jeweiligen Lastzeitreihen bzw. Kollektive ertragen können. Anders ausgedrückt, muss die zu erwartende Lebensdauer von Bauteilen ermittelt werden. Entsprechende Untersuchungen können mit Hilfe von Betriebsfestigkeitsprogrammen (z.B. FEMFAT) durchgeführt werden.

Aufgrund oft fehlender Belastungsdaten im frühen Prototypenstatus ist die Methode der virtuellen Iteration hilfreich, die äußere Anregung eines Dynamikmodells zu ermitteln. Mit dieser Anregung können entsprechende Kollektive (Schnittgrößen usw.) für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen aus MKS- Modellen gewonnen werden.

Die virtuelle Iteration ermöglicht zudem auch die Optimierung von Simulationsmodellen bzw. einzelner Modellparametern, indem man die iterierte Anregung konstant behält und mittels der Meßdaten Modellparameter (Steifigkeiten, Dämpfungen, Freigänge) variiert bzw. optimiert.

## **2. Virtueller Prüfstand**

Die Simulation von dynamischen Systemen erfolgt vorzugsweise mittels Mehrkörpersimulationsprogrammen (z.B. ADAMS oder SIMPACK). Die Modellierung eines Gesamtfahrzeuges oder eines Teilsystems muss dabei den eigentlichen Prüfstand (Konsolen, Abstützungen, Hydrauliksystem, usw.) nicht beinhalten. Prüfstandsbauteile können die Ergebnisqualität verschlechtern, da z.B. Schwingungen (Eigenfrequenzen) durch die zusätzlichen Massen und Steifigkeiten im Modell auftreten können.

Der Prüfstand selbst sollte jedoch mitabgebildet werden, falls Untersuchungen bzw. Vergleiche mit einem realen Prüfstand durchgeführt werden sollen. Diese Untersuchungen können zur

- Überprüfung des realen Prüfstandes im Vorfeld (Kinematik, dynamisches Verhalten, Festigkeit)
- Beschleunigung der Prüfstandskonfiguration durch Voriteration der Eingangssignale
- Unterstützung bei Problemen am realen Prüfstand
- Kostengünstige Ermittlung der Auswirkung von Variation verschiedener Systemparameter

eingesetzt werden.

### 3. Virtuelle Iteration

Die virtuelle Iteration beruht auf der Ermittlung der Anregung eines Modells (Prüfling oder gesamter Prüfstand) im Zeitbereich mittels dynamischer Simulation (Mehrkörpersimulation). D.h. basierend auf gemessenen Signalen, den sogenannten inneren Messgrößen (Responses), werden äußere Lasten des Modells berechnet (Drives, Lösung eines nichtlinearen inversen Systems). Somit erspart man sich u.a. aufwendige Messungen von äußeren Größen wie Lager- oder Radnabenkräften. Die Messung der inneren Größen ist hingegen meistens relativ einfach und stellen häufig folgende Größen dar:

- Beschleunigungen (Radträger, Rahmen, Karosserie,...)
- Federwege oder -kräfte
- Lagerkräfte (Bolzenkräfte)
- Dehnungen

Zur Berechnung der Drives des dynamischen Systems wird die Übertragungsfunktion des Modells (Ausgangskanäle zu Eingangskanäle) ermittelt. Diese Übertragungsfunktion ist linear und kann somit einfach invertiert werden. Da diese lineare Übertragungsfunktion eine Approximation des nichtlinearen Systems darstellt, nähert man sich iterativ der Lösung des inversen Systems.

Ein großer Vorteil der virtuellen Iteration ist die Möglichkeit der Bestimmung absoluter Wege als Anregung eines Simulationsmodells. Absolute Wege sind messtechnisch nicht realistisch erfassbar und können in folgender Form in der Simulation verwendet werden:

- Vertikale Wege an den Radnaben oder Radaufstandspunkten (mit oder ohne Reifenmodellierung)
- Vertikale Anregung eines Bauteils, insbesondere eines Rahmens (z.B. Rahmen mit Anbauteilen wie Motor, Tanks, Kabinen, etc.)
- Anregung eines Freimasseprüfstands (z.B. MAST – MultiAxialer Simulations-Tisch)

Absolute Wege bzw. auch andere anregende Größen könnten von einem Prüfstand zur Anregung des Simulationsmodells übernommen werden. Im Entwicklungsablauf liegen diese zum jeweiligen Zeitpunkt oft nicht vor bzw. sind diese Signale durch Abweichungen des Simulationsmodells zum Prüfling nicht direkt zufriedenstellend übertragbar. Um dennoch die Beanspruchung des Bauteils so exakt wie möglich abbilden zu können bedient man sich, analog zum realen Prozess im Prüflabor, der Methode der virtuellen Iteration.

#### 3.1 Iterationsprozess

Die Schritte der virtuellen Iteration sind:

Berechnung eines rosa Rauschens (Abbildung 1)  $u_R$  zur Bestimmung der Übertragungsfunktion des Modells.

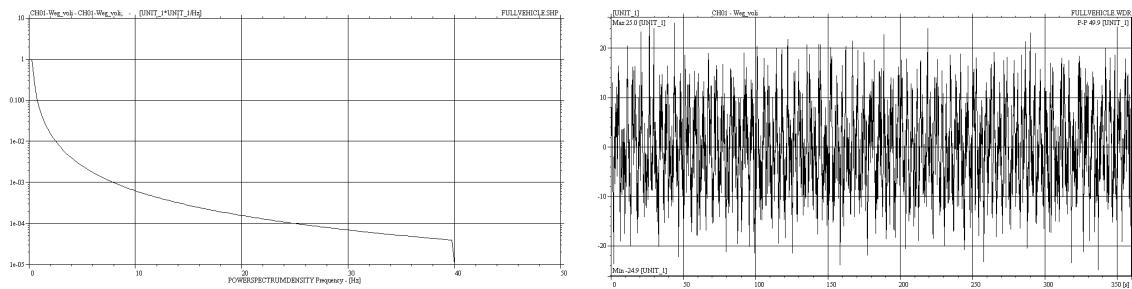


Abbildung 1: Frequenzcharakteristik eines Rauschens und zugehöriges Zeitsignal (rechts)

Simulation des MKS- Modells mit dem rosa Rauschen als Input und Ausgabe der Antwort  $y_R$  des Systems.

Berechnung der inversen Übertragungsfunktion  $F^{-1}$  des MKS- Modells (Abbildung 2) aus  $u_R$  und  $y_R$  (Formel 1).

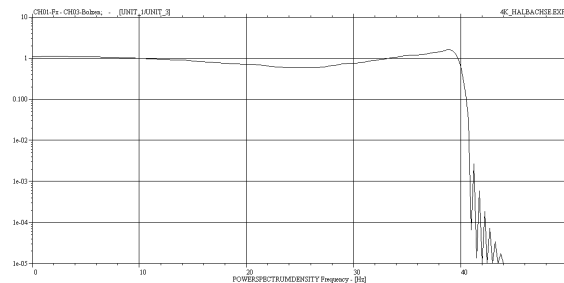


Abbildung 2: Inverse Übertragungsfunktion, ein Eintrag der Matrix

$$F(s) = \frac{y_R(s)}{u_R(s)} \quad s \dots \text{Frequenz} \quad (1)$$

Durchführen des ersten Iterationsschrittes (Formel 2), d.h. Berechnung des Inputs des Systems mit Hilfe der inversen Übertragungsfunktion und den Messdaten (innere Messstellen  $y_{\text{Desired}}$ ).

$$u_0(s) = a_0 \cdot F^{-1}(s) \cdot y_{\text{Desired}}(s) \quad 0 < a \leq 1 \quad (2)$$

Berechnung weiterer Iterationsschritte (Formel 3) bis die gewünschte Genauigkeit (Vergleich Simulation zu Messung, z.B. Abbildung 3) erreicht ist.

$$u_{n+1}(s) = u_n(s) + a_{n+1} \cdot F^{-1}(s) \cdot (y_{\text{Desired}}(s) - y_n(s)) \quad (3)$$

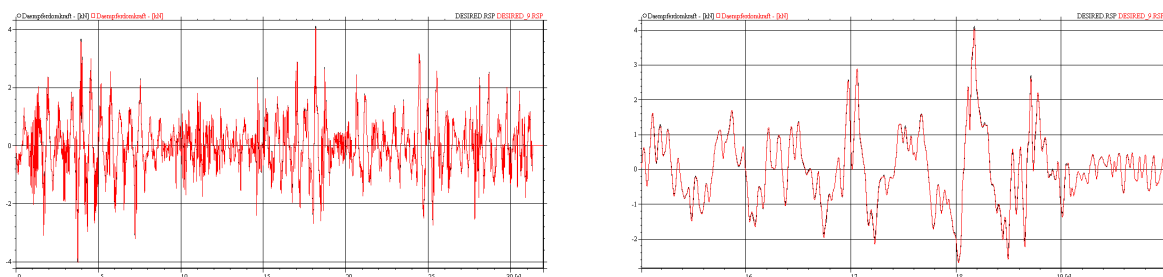


Abbildung 3: Vergleich zwischen Messdaten (schwarz) und Simulation (rot), gesamtes Signal (links) und ein Teilausschnitt (15-20s)

Ein oft verwendetes Kriterium für die Genauigkeit ist ein relativer Schädigungsvergleich der beiden Signale, welcher mit der Software FEMFAT LAB durchgeführt werden kann.

Die Berechnungen (Formel 1-3) werden im Frequenzbereich durchgeführt (FFT des Zeitsignals). Formel 2 und 3 enthalten einen Faktor  $a$  welcher als Schrittweite bzw. Sicherheit angesehen werden kann. Der Wert  $a$  wird zwischen 0 und 1 gewählt und dient als Sicherheit, dass auch mit einer ungenauen Approximation (Übertragungsfunktion) des MKS Modells keine zu hohen Drives auf das System aufgebracht werden (gängige Methode bei realen Prüfständen, dass die Prüflinge nicht überbelastet werden).

### 3.2 Virtuelle Iteration mit FEMFAT LAB

Die virtuelle Iteration kann mit der Software FEMFAT LAB Modul Virtuelle Iteration voll-automatisiert durchgeführt werden. D.h., die Iterationen werden unter Verwendung der MKS- Programme ADAMS oder SIMPACK automatisiert durchgeführt.

In *ADAMS* wird als *Schnittstelle* das adm-File (ADAMS Solver Database) verwendet. Dieses File wird automatisch pro Iterationsschritt geändert und vom ADAMS/Solver für die Simulation benutzt. Der Input (Drive) des Modells wird über Splines und der Output über Requests definiert.

Die *Schnittstelle zu SIMPACK* funktioniert über die SIMPACK- Eingabeaufforderung mit SIMPACK Skript Befehlen (ab Version SIMPACK 8.716). Der Input (Drive) wird über Input- Functions definiert, der Output über ein formatiertes ASCII-File (csv-File). In Abbildung 4 ist die GUI von FEMFAT LAB Modul Virtuelle Iteration samt Prozessablauf dargestellt.

#### EINSTELLUNGEN

Definition der verwendeten  
MKS- Software und des Modells

#### INPUT/OUTPUT

Definition der Drive und Response  
Signale

#### RAUSCHGENERATOR

Generieren des rosa Rauschens  
und Simulation des MKS- Modells

#### ÜBERTRAGUNGSFUNKTION

Berechnung der inversen Übertra-  
gungsfunktion

#### ITERATION

Durchführen einer oder mehrerer  
(automatisierter) Iterationen

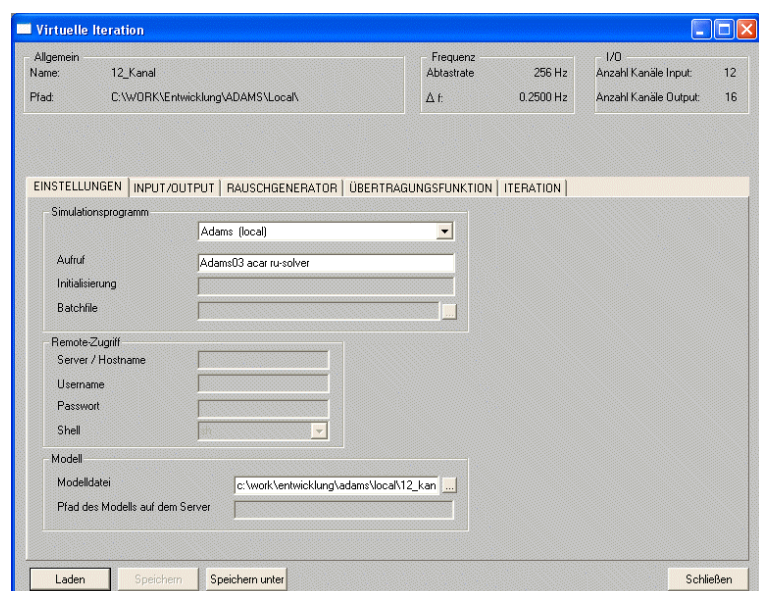


Abbildung 4: GUI von FEMFAT LAB Virtuelle Iteration

#### 4. Virtuelle Iteration am Beispiel einer Hinterachse

Die Aufgabe bestand in einer Betriebsfestigkeitsanalyse eines Hilfsrahmens einer Hinterachse. Dazu mussten die Belastungskollektive in Form von Schnittkräften an allen Kinematikpunkten (Hilfsrahmen zu Lenker, Differential und Karosserie) bestimmt werden.

Dazu wurden Messungen an einem Gesamtfahrzeug, aufgrund Verfügbarkeit und Kosten ohne die Verwendung von Messrädern, durchgeführt und insgesamt 14 Meßsignale betreffend die:

- Kräfte in den Lagern des Radträgers
- Spurstangenkräfte
- Stopperkräfte

für den Iterationsprozess zur Verfügung gestellt.

Um basierend auf den zur Verfügung gestellten Daten die notwendigen Belastungen für den Hilfsrahmen mittels der MKS zu berechnen, müssen die äußeren Lasten, d.h. die Radnabenkräfte und –momente, durch virtuelle Iteration ermittelt werden.

Dazu wurde ein MKS- Modell (ADAMS/Car, siehe Abbildung 5) der gesamten Hinterachse erstellt um die korrekte Beanspruchung des Hilfsrahmens in Form der Schnittlasten für die Lebensdaueranalyse zu ermitteln. Das MKS- Modell besteht aus Starrkörpern, einem flexiblen Rahmen (FE- Körper), Balkenelemente (Stabilisator), Gelenken, Gummilagern und Feder-Dämpfern inkl. Anschläge.

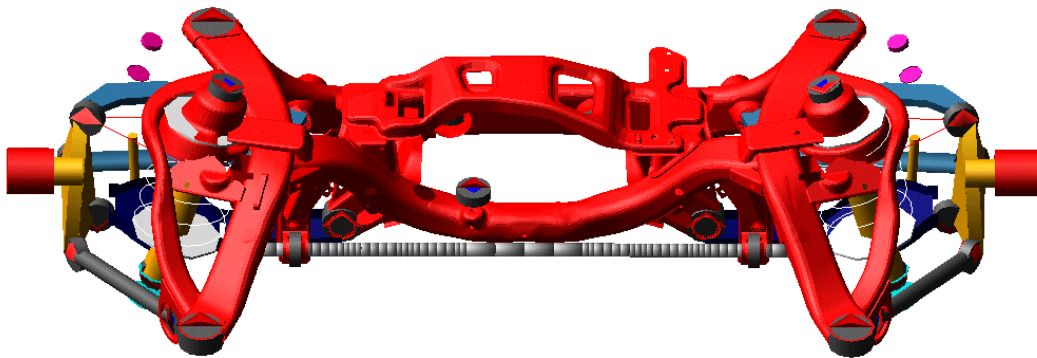


Abbildung 5: Simulationsmodell einer Hinterachse (MKS)

Die Anregung (Drive) besteht aus 12 Kanälen (3 Kräfte und 3 Momente an jeder Radnabe). Die Definition der Drives erfolgt über die jeweilige Spline-ID im ADAMS-Modell, die Responses (14 Signale) werden über die Request-ID festgelegt.

Zur Berechnung der Übertragungsfunktion wird als Drive ein rosa Rauschen berechnet, dessen Amplituden näherungsweise den realen Amplituden entsprechen soll. Die Länge des Rauschens (abhängig von der Anzahl der Kanäle und der Frequenzcharakteristik) wird mit 540 Sekunden festgelegt. Dieses Rauschen wird als Input dem MKS-Modell übergeben und eine Simulation durchgeführt. Mit der Antwort dieses Rauschens wird die inverse Übertragungsfunktion berechnet (Formel 1). Zwei Einträge der 12x12 Matrix (inverse Übertragungsfunktion) sind beispielsweise in

Abbildung 6 und Abbildung 7 angegeben. Die beiden Stopperkräfte werden nicht in die Übertragungsmatrix aufgenommen, da diese nur singuläre Ereignisse beinhalten.

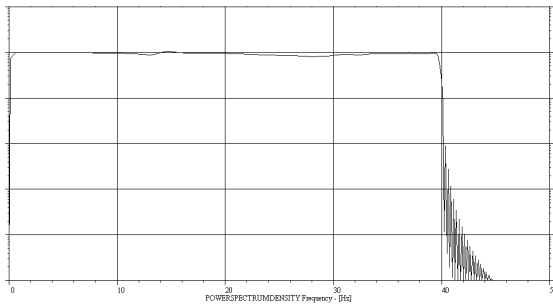


Abbildung 6: Anregung MZ links zu Spurstange links

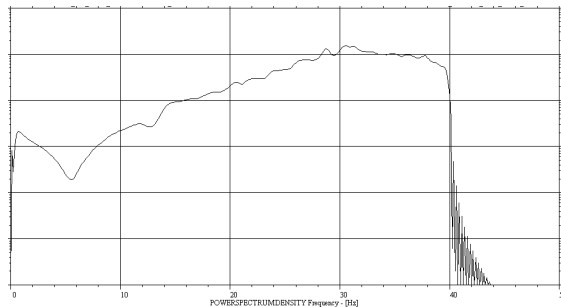


Abbildung 7: Anregung FZ links zu vertikale Kraft unterer Lenker links

Mit der Übertragungsfunktion und den Messdaten von verschiedenen Manövern (Desired) kann man den ersten Drive (12 Kanäle) mit dem Iterationsalgorithmus berechnen. Ein Responsekanal der ersten Iteration der Schlechtwegstrecke ist in Abbildung 8 dargestellt. Der erste Drive wurde mit einem Sicherheitsfaktor  $a_0=0.5$  berechnet (Formel 2), daher sind die Amplituden der Simulation (rot) nach der ersten Iteration deutlich kleiner als die gemessenen (schwarz).

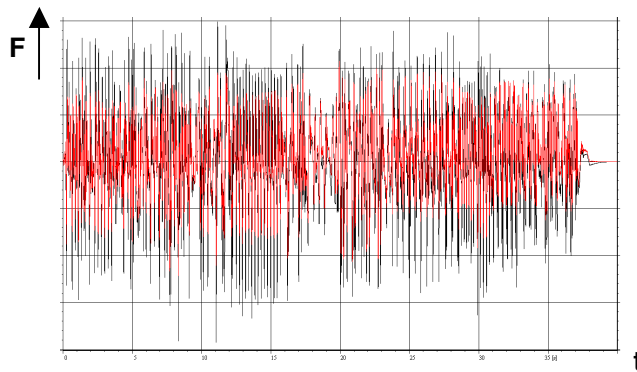


Abbildung 8: Vergleich Simulation (rot) zu Messung (schwarz), vertikale Kraft unterer Querlenker, 1. Iteration

Nach weiteren 5 Iterationen erreicht man die gewünschte Genauigkeit. Die resultierende vertikale Bolzenkraft des unteren Lenkers ist in Abbildung 9 dargestellt.

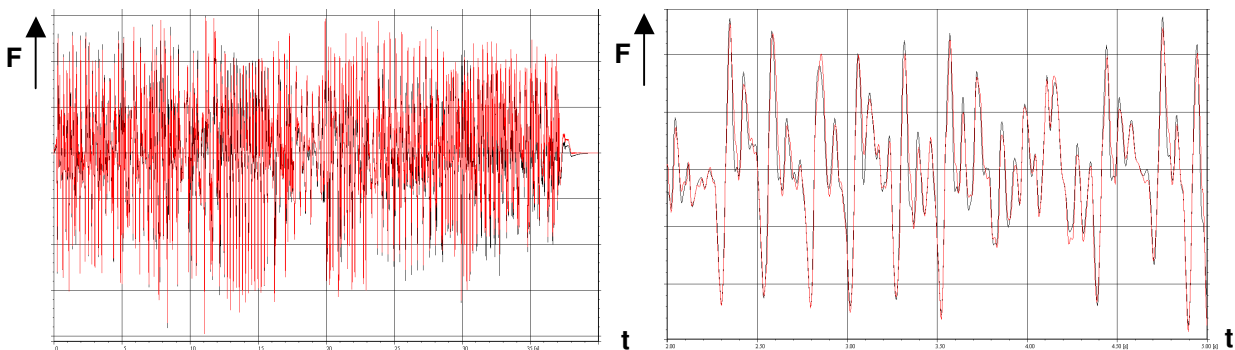


Abbildung 9: Vergleich Simulation (rot) zu Messung (schwarz), vertikale Kraft unterer Querlenker, Ergebnis nach der 6. Iteration (links) und ein Detailausschnitt (2s-5s)

Eine Schlechtwegstrecke ist ein typisches Beispiel für eine stochastische breitbandige Anregung. Es wurden auch Manöver mit dominierenden niederfrequenten Anteilen

len iteriert. In Abbildung 10 ist als Beispiel die Längslenkerkraft (Responsekanal) der 10. Iteration einer Vollbremsung dargestellt.

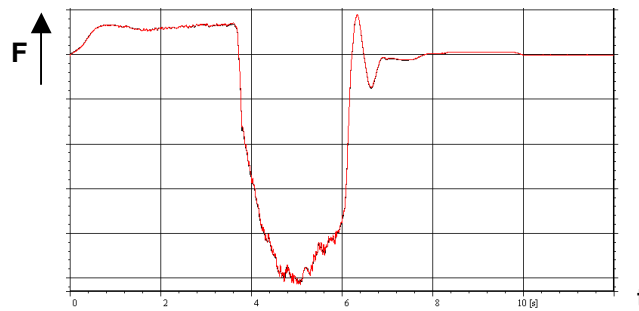


Abbildung 10: Bremsmanöver, Kraft in Längslenker, 10. Iteration

Als Abbruchkriterium der Iterationen wurde die relative Schädigung der simulierten und gemessenen Signale verwendet. Dieser Vergleich ist für die Vollbremsung in Abbildung 11 dargestellt (Wert 1 bedeutet, dass beide Signale schädigungsäquivalent sind, Resultate wie in Abbildung 11 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung).

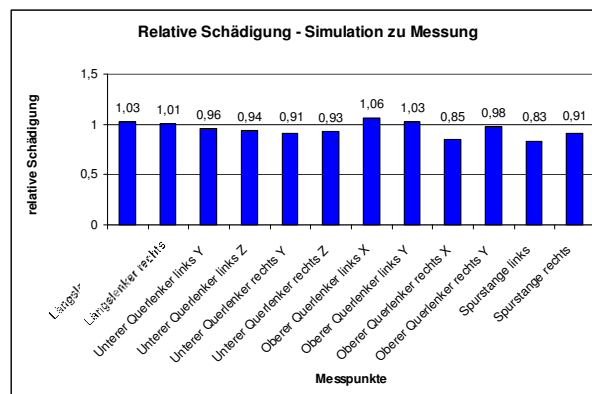


Abbildung 11: Relativer Schädigungsvergleich

Die Schädigungsberechnungen nach Miner Elementar werden mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Ecklastspielzahl: 10000000
- Fiktive Dauerfestigkeit: 1000
- Neigung der Wöhlerlinie: 5

### Betriebsfestigkeitsanalyse

Sind somit die Radnabenkräfte und -momente durch die virtuelle Iteration am MKS-Modell mit einer vorgegebenen Genauigkeit ermittelt, können verschiedenste Größen wie Schnittkräfte bzw. modale Daten für schwingend beanspruchte Bauteile im Zeitbereich berechnet werden. Diese Kollektive dienen dann als Grundlage für die anschließende mehrachsige Lebensdauerbewertung mit FEMFAT MAX.

Der Modul FEMFAT MAX ist ein Teil der im ECS entwickelten kommerziellen Betriebsfestigkeitssoftware FEMFAT und wird für die Lebensdauerbewertung von mehrachsig belasteten Strukturen /1/, wie es auch der gezeigte Hilfsrahmen darstellt, verwendet. Er hilft Entwicklungsingenieuren die beste Dimensionierung von Bauteilen im Hinblick auf extrem komplexe dynamische Belastungen zu finden.



Für den Hilfsrahmen wurden für insgesamt 144 Schnittlasten (Kräfte und Momente in den Lagern) die Last/Zeitfunktionen ermittelt. Jede dieser Einzelkomponenten werden in der Folge als Grundlastfall für die weitere Berechnung herangezogen. Mittels Finite Elemente (FE) - Analyse unter Berücksichtigung linear elastischem Materialverhaltens werden die Spannungsverteilungen bezüglich aller Grundlastfälle berechnet. Die Spannungsverteilungen der Grundlastfälle werden in FEMFAT mit den zugehörigen Last-Zeit-Reihen zu sogenannten Lastkanälen gekoppelt. An jedem Bewertungsknoten der Struktur wird die lokale Beanspruchung durch Linearkombination aller Lastkanäle zu jedem Zeitpunkt ermittelt und den lokalen Festigkeitslimits gegenübergestellt. Die lokale Bauteilwöhlerlinie ergibt sich aus den Werkstoffdaten der Materialdatenbank, welche durch die aktivierten Einflussfaktoren modifiziert werden /2/. Allen voran ist die Kerbwirkung, also der lokale Stützwirkungseffekt, der wesentliche Einflussfaktor. Daneben ist bei dieser Struktur die Bewertung von Schweißnähten von zentraler Bedeutung. Dies wird mit dem Modul FEMFAT WELD, der problemlos mit dem Mehrachsigenmodul FEMFAT MAX gekoppelt werden kann, durchgeführt.

Abbildung 12 zeigt als Ergebnis den qualitativ sehr guten Vergleich zwischen dem Prüf- und Rechenergebnis für einen Grundwerkstoff- (links) und einen Schweißnahtbereich (rechts).

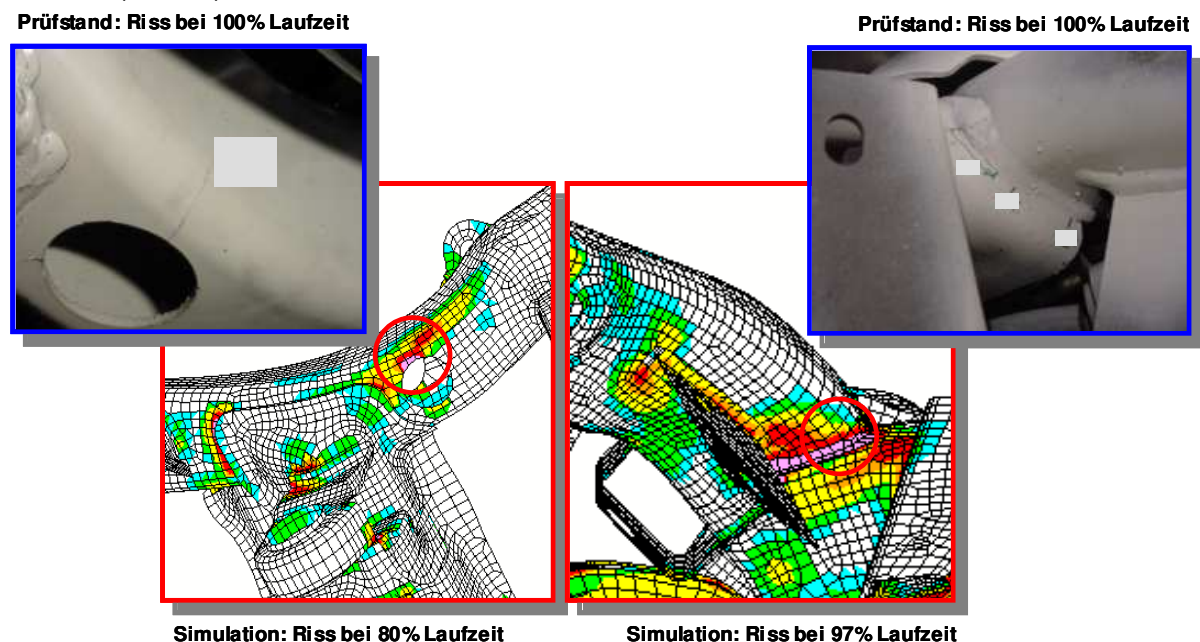


Abbildung 12: Vergleich Prüfung / Simulation der Schädigung D am Hilfsrahmen

## 5. Weiteres Anwendungsbeispiel: Untersuchung eines Radträgers

Ein weiterer Bauteil, welcher häufig untersucht wird, ist der Radträger /3/. In Abbildung 13 ist ein virtueller Prüfstand einer Halbachse gezeigt. Es soll für eine Lebensdaueranalyse des Radträgers (rot, im MKS- Modell, als Starrkörper modelliert) ein entsprechendes Kollektiv (Schnittkräfte in den Lagern und Radmittelpunkt) ermittelt werden. Es wurden an 7 inneren Messstellen Kräfte (Bolzen- und Stangenkräfte) für mehrere Manöver gemessen. Gesucht sind die Kräfte und Momente an der Radnabe (äußere Belastung).

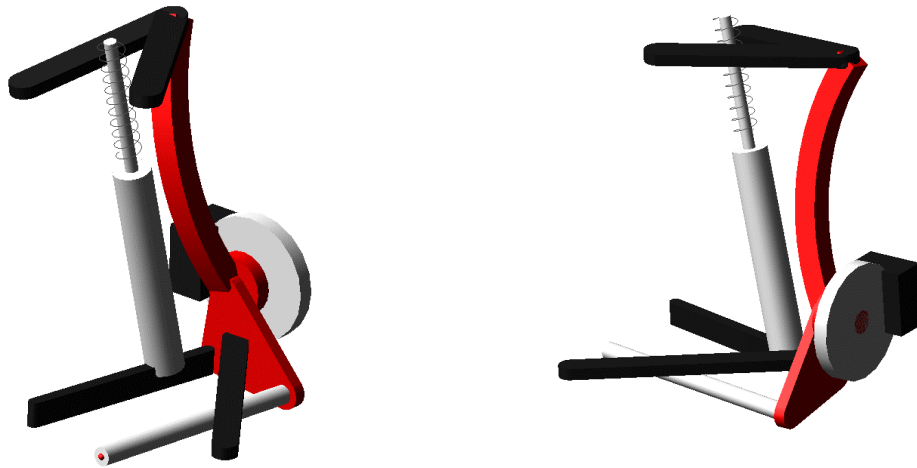


Abbildung 13: ADAMS Modell der Halbachse

Mit FEMFAT LAB Virtuelle Iteration wird die Übertragungsfunktion des Modells (mittels Rauschanregung und dazugehöriger Antwort) bestimmt und die Drives berechnet. Die 10. Iteration zeigt eine ausreichende Genauigkeit für das Schlechtwegmanöver. Die Ergebnisse sind in Form von Zeit-Overlay-Plots in Abbildung 14 und eines relativen Schädigungsvergleichs in Abbildung 15 dargestellt. Zusätzlich ist in Abbildung 14 der detaillierte Kraftverlauf beim Durchfahren eines Schlaglochs angegeben.

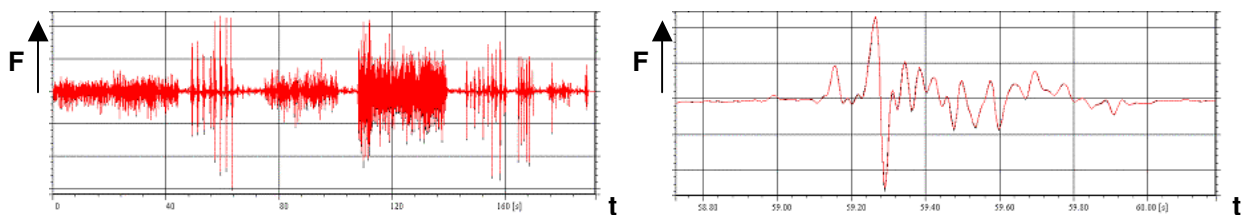


Abbildung 14: Vertikale Kraft am Radträger, Vergleich Simulation (rot) zu Messung (schwarz), Ergebnis der 10. Iteration und Detailausschnitt (58,7-60,2s)

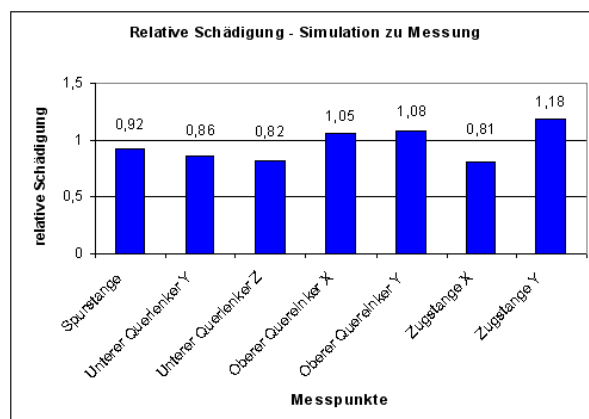


Abbildung 15: Relativer Schädigungsvergleich

### *Betriebsfestigkeitsberechnung:*

Die mit der virtuellen Iteration ermittelten Lastzeitverläufe an den verschiedenen Befestigungs- bzw. Koppelungspunkten werden als Eingangsdaten für die anschließende Betriebsfestigkeitsberechnung verwendet. An den sieben Kraftangriffspunkten stehen für insgesamt 29 verschiedene Kraft- bzw. Momentenrichtungen Last-Zeit-Daten zur Verfügung, die mit den jeweils berechneten Einheitsspannungen in FEM-FAT MAX zur transienten Gesamtspannung superponiert werden. Die resultierenden lokalen Gesamtspannungen dienen als Basis für die anschließende Schädigungsbeurteilung.

Neben der Stützwirkung wurde der Mittelspannungseinfluss und örtliches Plastifizieren bei der vorliegenden Berechnung berücksichtigt, die ebenfalls das Betriebsfestigkeitsergebnis wesentlich beeinflussen.

Solange die Position der Kraftangriffspunkte unverändert bleibt, sowie die Steifigkeit des Bauteils sich nicht signifikant ändert, können mit den einmal ermittelten Last-Zeit-Daten aus der virtuellen Iteration verschiedene Varianten der Bauteilgeometrie analysiert werden.

Um die Rechenzeit in Grenzen zu halten wurden die meistschädigenden Manöver ausgewählt sowie die entsprechenden Wiederholungsfaktoren berücksichtigt. Die Reduktion der zu berücksichtigenden Lasten erfolgt stets mit Blick auf die Schädigungswirkung der verbleibenden Lastdaten im Vergleich zum ursprünglich geforderten Lastspektrum. Im vorliegenden Fall wurden mehr als 90% der Schädigung des gesamten vorgegebenen Last-Zeit-Verlaufes erfasst. Abbildung 16 zeigt die Lebensdauerverbesserung, die an der meist geschädigten Stelle der Struktur erzielt werden konnte.

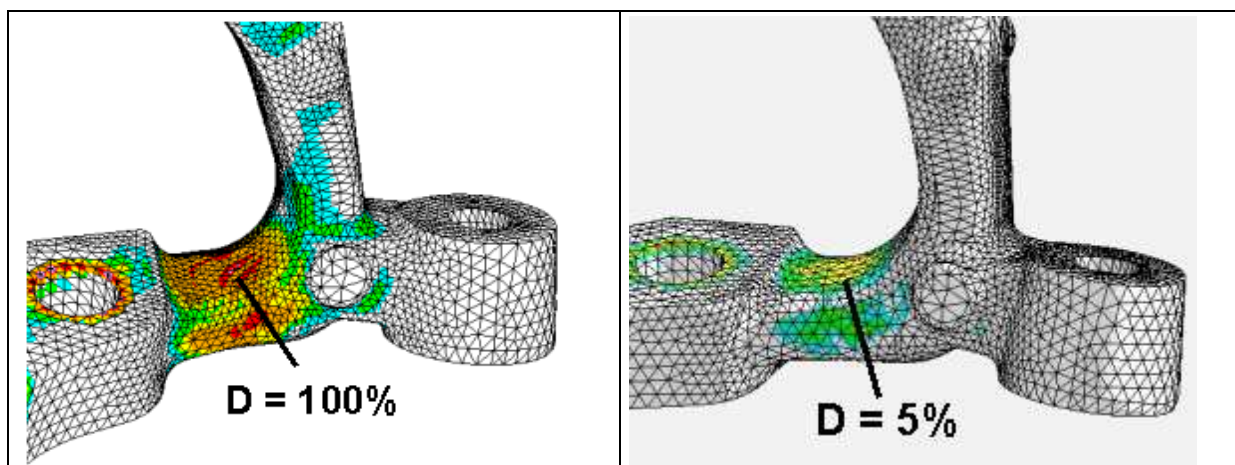


Abbildung 16: Bereich höchster Schädigung D: ursprüngliches Design links, optimierte Situation rechts

Durch lokale Modifikation konnte die rechnerische Lebensdauer um Faktor 20 verlängert werden.

Für den betrachteten Bauteil lagen für einzelne Manöver Dehnungsmessungen innerhalb der Struktur vor. Damit konnten die mittels FEM ermittelten Spannungen mit Messwerten am realen Bauteil verglichen werden. Mit einer Abweichung von ca. 1,5% zeigte sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Somit kann die virtuelle Iteration als effektives und nützliches Werkzeug zu Generierung spezifischer Lastdaten bezeichnet werden.

## 6. Schlußfolgerungen, Ausblick

Die virtuelle Iteration verknüpft Simulation und Versuch. MKS- Modelle gekoppelt mit Messdaten können für beide Bereiche folgende Vorteile bringen:

- Kostengünstige Lastermittlung für Simulationen
- Verbesserte Prototypqualität durch exaktere Lastdaten
- Zuverlässige Reduktion der Belastungsdaten
- Kostengünstige Ermittlung der Auswirkung von Variation verschiedener Systemparameter
- Unterstützung des realen Prüfstands

Die Einbeziehung der virtuellen Iteration in den Entwicklungsprozess bringt eine Steigerung der Genauigkeit der Kollektive für die Lebensdauerberechnung von verschiedensten Bauteilen. Die virtuelle Iteration bietet die Möglichkeit der Bestimmung der Anregung eines dynamischen System, sodass auf die Messung dieser Größen verzichtet werden kann. Außerdem können absolute Wege als Anregung bestimmt werden. Spezielle absolute Größen wie z.B. vertikale Wege an den Reifenaufstandspunkten (quasi Straßenprofil) können auf andere Fahrzeuge (Prototypen für welche noch keine Messdaten existieren) übertragen werden.

Durch die Software FEMFAT LAB Modul Virtuelle Iteration wird die Durchführung der virtuellen Iteration in Verbindung mit MKS- Programmen stark vereinfacht bzw. automatisiert und so Entwicklungszeit eingespart.

Die Untersuchungen von virtuellen Prüfständen erscheinen besonders sinnvoll bei der Auslegung des realen Prüfstands (hydraulisch, mechanisch) und wenn Prüfstandseinflüsse besonders wichtig sind (z.B. bei Freigabeprüfungen von Bauteilen oder Baugruppen). Der virtuelle Prüfstand kann zukünftig auch bei der Ermittlung der Anregung für den realen Prüfstand durch Vorausiteration von Anregungssignalen mit dem virtuellen Prüfstand deutliche Einsparungen bei Zeit und Kosten bringen.

### Literaturangaben:

/1/ Gaier C., Steinwender G., Dannbauer H., „FEMFAT-MAX: A FE Postprozessor for Fatigue Analysis of Multiaxially Loaded Components“, NAFEMS, Wiesbaden 8.-9. November 2000

/2/ Unger B., Gaier C., Dutzler E., Lukacs A, „Softwarebasierte Betriebsfestigkeitsberechnung im Bauteilentwicklungsprozess“, VDI Fulda 05.-06. Juni 2002

/3/ Dannbauer H., Gattringer O., Steinbatz M., “Integrating virtual test methods and physical testing to assure accuracy and to reduce effort and time”, SAE Detroit 2005