

Effiziente Festigkeitserprobung von Teilstrukturen landwirtschaftlicher Nutzfahrzeuge

Volker Landersheim, Marc Wallmichrath, Riccardo Möller

Agrartechnische Nutzfahrzeuge und an sie angebundene Arbeitsgeräte sind im Betrieb vielfältigen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Die Absicherung der Betriebsfestigkeit ist für ihren zuverlässigen Betrieb und die Vermeidung unplanmäßiger Ausfälle von großer Bedeutung. Die Vielzahl an Fahrzeugkonfigurationen, die an die jeweiligen Aufgaben und Einsatzbedingungen angepasst sind, erhöht die erforderliche Komplexität dieser Absicherung. Hybride Erprobungsmethoden erleichtern die Untersuchung unterschiedlicher Fahrzeugkonfigurationen, indem sie im Versuch erforderliche Hardwareumfänge reduzieren. Flexible Prüfstandselemente bilden bei diesen Methoden umgebende Strukturen unter Einbindung numerischer Modelle nach. Dabei werden Numerik und Experiment so kombiniert, dass die Numerik die im Experiment abzubildenden Bauteilbeanspruchungen ermittelt und die experimentelle Erprobung die lokale Beanspruchbarkeit verifiziert.

Schlüsselwörter

Hybride Erprobungsmethoden, Betriebsfestigkeit, Versuchsvereinfachung, Ersatzversuch, Integrationsprüfung

Landwirtschaftliche Maschinen und Fahrzeuge werden während ihres Betriebseinsatzes in den verschiedenen Einsatzszenarien in unterschiedlicher Weise mechanisch belastet. Hinzu kommt, dass viele landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge Multifunktionsfahrzeuge sind, die jeweils mit unterschiedlichen Arbeitsgeräten und Anbauten ausgestattet werden und für unterschiedliche Aufgaben konzipiert sind. Pflug, Egge, Mähwerk, Ballenpresse, Frontlader und Feldspritze sind nur eine Auswahl der Anbauteile, die etwa am Traktor zum Einsatz kommen. Auch Mähdrescher können z. B. durch Anbau von individuellen Schneidwerken sowie weiteren Anbauteilen wie Schwadablage, Strohhäcksler, Körnerheber und Reinigungsanlagen flexibel an verschiedene Erntebedingungen angepasst werden. Abbildung 1 zeigt als Beispiel einen Traktor mit angehängter Feldspritze.



Abbildung 1: Traktor mit angehängter Feldspritze (© Fraunhofer LBF)

Die zuverlässige betriebsfeste Auslegung aller Teilstrukturen der landwirtschaftlichen Arbeitsgeräte und Fahrzeuge ist Grundvoraussetzung für den reibungslosen und sicheren Einsatz von Maschinen und Transportmitteln. Diese müssen dann verfügbar sein, wenn die jeweiligen Arbeiten auf dem Feld anstehen und die Witterungsbedingungen für diese Arbeiten geeignet sind. Ein Ausfall wichtiger Geräte oder Fahrzeuge zum Beispiel in der ohnehin arbeitsintensiven Erntezeit kann ernsthafte wirtschaftliche Konsequenzen haben und den dicht getakteten Zeitplan erheblich gefährden.

Hersteller von solchen landwirtschaftlichen Geräten und Fahrzeugen legen daher großen Wert auf die Absicherung der Betriebsfestigkeit ihrer Produkte (ARAMIDE 2021, WEN 2020, ECKSTEIN 2017, DIMITRIS 2016, KUMAR 2015). Dabei stehen sie vor der Herausforderung, dass die experimentelle Erprobung für die eingangs genannte Vielfalt von Einsatzbedingungen und Fahrzeugkonfigurationen mit einem sehr hohen Aufwand verbunden ist. Auch wenn numerische Simulationswerkzeuge in den letzten Jahrzehnten zu deutlichen Fortschritten in der konstruktiven Auslegung und Optimierung der Strukturen in landwirtschaftlichen Geräten geführt haben (STEENGAARD 2024, SUBBAIYAN 2021, WÖLLNER 2021, DHANGAR 2017, VERMA 2016), bleibt der experimentelle Festigkeitsnachweis weitestgehend unverzichtbar. Die Aussagekraft eines solchen Laborversuchs ist jedoch stark von den gewählten Versuchsrandbedingungen abhängig, die immer eine Abstraktion des tatsächlichen Einsatzes darstellen. Dies gilt insbesondere bei Teilstrukturen und -systemen, die in komplexer Weise in elastische Strukturen integriert oder an sie angebunden sind. Bei diesen treten zumeist eine Vielzahl von Schnittlasten und eine ausgeprägte Abhängigkeit des Belastungszustands vom elastischen Verhalten der umgebenden Struktur auf. Für Fahrzeugbereiche, deren Belastung und elastische Anbindung sich je nach Fahrzeugkonfiguration wesentlich unterscheiden, sind Erprobungskonzepte erforderlich, die ein hohes Maß an Flexibilität zur Nachbildung der unterschiedlichen Randbedingungen bieten. Hybride Erprobungsmethoden ermöglichen durch simulationsbasiert optimierte Versuchsdesigns schneller eine aussagekräftige Erprobung solcher Teilstrukturen und bieten darüber hinaus eine hohe Flexibilität für Variantenuntersuchungen. Bei diesen hybriden Methoden werden numerische und experimentelle Verfahren in einem Erprobungsprozess kombiniert. Darunter fallen etwa Hardware-in-the-Loop-Methoden, der Einsatz digitaler Zwillinge von Versuchsaufbauten, sowie die simulationsbasierte Ermittlung und Optimierung variabler Größen in der jeweiligen Erprobung (LANDERSHEIM et al. 2022). Zur letztgenannten Gruppe hybrider Erprobungsmethoden gehört auch die Ableitung von Versuchsdesigns, bei welcher durch numerische Analysen Anbindungs- und Belastungsrandbedingungen derart optimiert werden, dass sich für die jeweilige Versuchsaufgabe ein möglichst einfacher Versuchsaufbau mit dennoch möglichst genauer Schädigungsnachbildung für die jeweilige Fahrzeugkonfiguration ergibt. Solche Erprobungsansätze sind in der Literatur bisher etwa aus dem Pkw, aber auch aus dem Transportfahrzeugbereich bekannt (LANDERSHEIM und KÜPPERS 2022, Lozia 2022, LANDERSHEIM 2016, SOPRONI 2013, KIESEL 2011, WALTER 2007). In diesem Beitrag wird zunächst eine Vorgehensweise zur Optimierung von Versuchsdesigns für komplex belastete bzw. komplex integrierte Teilstrukturen und Komponenten dargestellt. Im Anschluss werden Möglichkeiten zur Umsetzung von elastischen Randbedingungen aufgezeigt und schließlich zwei Anwendungsbeispiele vorgestellt. Das erste Anwendungsbeispiel behandelt dabei die für landwirtschaftliche Fahrzeuge und Anbaugeräte relevante Frage der Absicherung massekrafterreger und zusätzlich durch einen Strukturlastpfad beanspruchter Anbauteile.

Vorgehen zur systematischen Ableitung optimierter Versuchsdesigns

Für die Optimierung von Versuchsdesigns im Hinblick auf Komplexität und Aussagegüte ist ein numerisches Modell des Gesamtsystems unter Betriebsbelastung sowie ein Modell der zu prüfenden Teilstruktur erforderlich. Typischerweise werden hierzu Finite-Elemente(FE)-Modelle verwendet. Mit dem Modell des Gesamtsystems unter Betriebsbelastung werden die Referenzbeanspruchungen bestimmt. Die Optimierung der Erprobungsrandbedingungen erfolgt an einem Modell der zu prüfenden Teilstruktur. Diese Optimierung ist aufgrund der Rechenzeit zumeist nicht mit unmittelbarer Nutzung der FE-Modelle realisierbar, da die Parametervielzahl mehrere tausend Simulationsdurchläufe erfordern würde. Die in Abbildung 2 dargestellte Vorgehensweise ermöglicht hingegen eine effiziente Optimierung, wobei zahlreiche Designvarianten des Versuchsaufbaus bewertet werden.

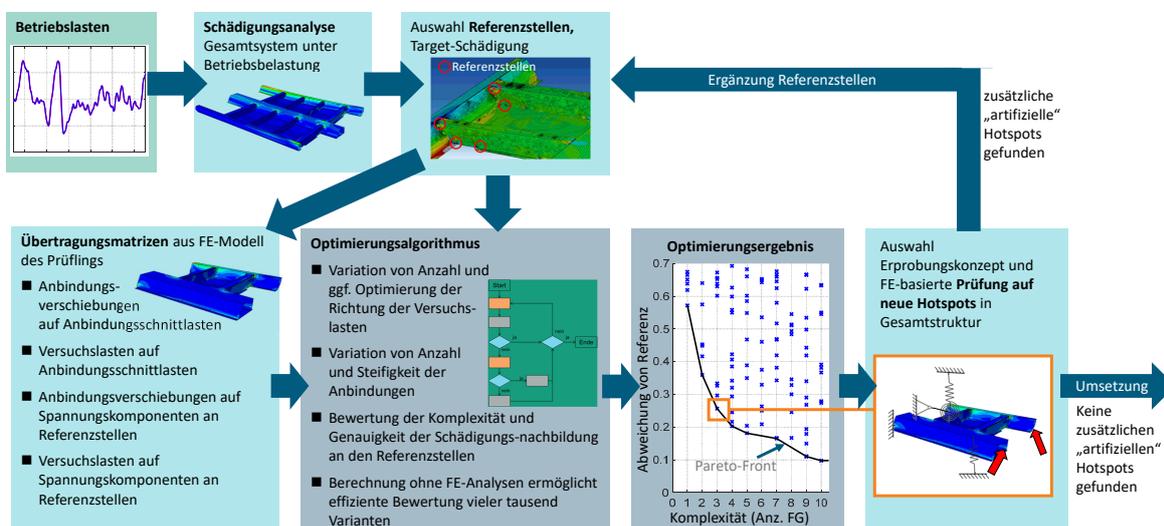


Abbildung 2: Vorgehensweise zur Optimierung des Ersatzversuchs

Dafür müssen mit dem Referenzmodell des Gesamtsystems zunächst mögliche Hotspots identifiziert und die Optimierungszielstellung auf diese Referenzstellen eingegrenzt werden. Mit dem FE-Modell des Prüflings lassen sich Übertragungsmatrizen ermitteln, mit denen sich die Zeitverläufe der Spannungskomponenten an den Referenzstellen in Abhängigkeit von den Zeitverläufen der äußeren Versuchslasten und der elastischen Anbindungsrandbedingungen beschreiben lassen. Ermittelt werden diese Übertragungsmatrizen durch Berechnung quasistatischer Einheitslastfälle. Dabei ist für jede Last, die im Versuch möglicherweise aufgebracht werden muss, ein Einheitslastfall mit in den Anbindungsfreiheitsgraden starrer Anbindung erforderlich. Ist die Lastrichtung erst in der Optimierung zu bestimmen, muss für jede mögliche Raumrichtungskomponente der Last ein Einheitslastfall berechnet werden. Des Weiteren muss für jeden Anbindungsfreiheitsgrad ein Einheitslastfall berechnet werden, bei dem in diesem Freiheitsgrad eine Einheitsverschiebung vorgegeben wird, während alle anderen Anbindungsfreiheitsgrade im Modell starr gefesselt sind und keine äußeren Lasten aufgebracht werden. Aus den in diesen Einheitslastfällen resultierenden Reaktionskräften an den Anbindungsstellen und den resultierenden Spannungskomponenten an den Referenzstellen ergeben sich folgende Übertragungsmatrizen:

- die Steifigkeitsmatrix des Prüflings in Bezug auf die Anbindungsfreiheitsgrade,
- die Übertragungsmatrix der Versuchslasten auf die Schnittlasten (bei ideal starrer Anbindung in den Anbindungsfreiheitsgraden),
- die Übertragungsmatrix von den Verformungsgrößen (Verschiebungen, Verdrehungen) an den Anbindungsfreiheitsgraden auf die lokalen Spannungskomponenten an den Referenzstellen,
- die Übertragungsmatrix von den Versuchslasten auf die lokalen Spannungskomponenten an den Referenzstellen.

Mit diesen Übertragungsmatrizen lässt sich der Einfluss jeder Änderung der elastischen Anbindungsrandbedingungen und der Versuchslasten auf die lokale Beanspruchung an den Referenzstellen in wenigen Sekunden bewerten. Dafür muss in Abhängigkeit vom Werkstoff bzw. vom zu bewertenden Konstruktionselement (z.B. Verschraubung, Schweißpunkt, ...) eine geeignete Methode zur Schädigungsbewertung auf Basis des Zeitverlaufs der Spannungskomponenten gewählt werden. In den folgenden Beispielen wurde etwa ein kritisches Schmittebenenverfahren nach Brown-Miller (BROWN 1973) in Kombination mit einer Schadensakkumulation nach Miner Elementar (MINER 1945) verwendet.

Der Optimierungsalgorithmus variiert systematisch die Lasteinleitungs- und Anbindungsrandbedingungen. Ausgangspunkt der Optimierung ist dabei typischerweise eine komplexe Referenzkonfiguration mit vielen potenziellen Versuchslasten und Anbindungsrandbedingungen, welche einer Analyse der Belastungs- und Einbausituation im Betrieb entstammen. Die Komplexität wird schrittweise reduziert, in dem aus allen Versuchslasten bzw. Anbindungsrandbedingungen diejenige ausgewählt und eliminiert wird, die den geringsten Einfluss auf die Beanspruchung an den Referenzstellen hat. Ausgehend von der so reduzierten Konfiguration wird die nächst einfachere Lösung in gleicher Weise gefunden, in dem der Einfluss aller verbleibenden Versuchslasten bzw. Anbindungsrandbedingungen bewertet wird und wieder diejenige mit dem geringsten Einfluss eliminiert wird. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis die Abweichung der Beanspruchung von der Referenzbeanspruchung inakzeptabel groß wird. Optional kann noch eine lokale Optimierung mit einer Hill-Climbing-Strategie durchgeführt werden, bei der Lastamplituden und -richtungen bzw. Steifigkeitswerte im Hinblick auf die lokalen Beanspruchungen optimiert werden, wobei sie dann quantitativ von der ursprünglichen physikalischen Referenzkonfiguration abweichen.

Der Optimierungsalgorithmus liefert für alle im Lösungsraum untersuchten Komplexitätsgrade die Lösung mit der jeweils höchsten Nachbildungsgenauigkeit im Hinblick auf die Schädigungen an den Referenzstellen, wobei sich der Komplexitätsgrad aus der Anzahl der in der Erprobungsvariante berücksichtigten Versuchslasten und der Anzahl der elastischen Anbindungsrandbedingungen ergibt. Somit liefert die Optimierung als Ergebnis eine Pareto-Front von möglichen Lösungen, bei der jede Lösung gegenüber jeder anderen Lösung in der Pareto-Front entweder eine geringere Komplexität oder aber eine höhere Genauigkeit bietet. Aus diesen Lösungen wird dann die Lösung gewählt, welche den besten Kompromiss im Hinblick auf die jeweiligen Erprobungsziele darstellt. Da die Optimierung nur im Hinblick auf die ausgewählten Referenzstellen erfolgt, muss abschließend noch eine Bewertung der gesamten Prüflingsstruktur mit der gewählten Lösung erfolgen, um auszuschließen, dass die vorgesehenen Vereinfachungen zu neuen, „artificialen“ Hotspots führen, die nur aufgrund der Vereinfachung des Erprobungsaufbaus auftreten würden. Werden solche artificialen Hotspots gefunden, müssen diese Stellen als zusätzliche Referenzstellen in der Optimierung berücksichtigt und die Optimierung mit diesen wiederholt werden. Treten in dieser Überprüfung keine artificialen Hotspots auf, folgt die Umsetzung des optimierten Erprobungskonzepts.

Werkzeuge zur Nachbildung von Struktursteifigkeiten

Die für die Erprobung optimierten Lasten werden üblicherweise mit hydraulischen oder elektrischen Servoaktoren eingeleitet. Die elastischen Anbindungsrandbedingungen, welche die Elastizität der umgebenden Struktur nachbilden, können durch speziell für den Versuch gefertigte Lager mit gezielt optimierten Steifigkeitseigenschaften realisiert werden. Eine solche Lösung ermöglicht die Realisierung komplexer elastischer Randbedingungen, bei der etwa an einer Anbindungsstelle Steifigkeitswerte in mehreren Freiheitsgraden nachgebildet und ggf. auch Kopplungen zwischen Freiheitsgraden berücksichtigt werden müssen. Diese Teile müssen i.d.R. jedoch für jeden Versuch neu ausgelegt und gefertigt werden, auch wenn nur der Einsatz in einer anderen Variante der Strukturumgebung untersucht werden soll. Abbildung 3 links zeigt ein Beispiel für eine solche Lösung.

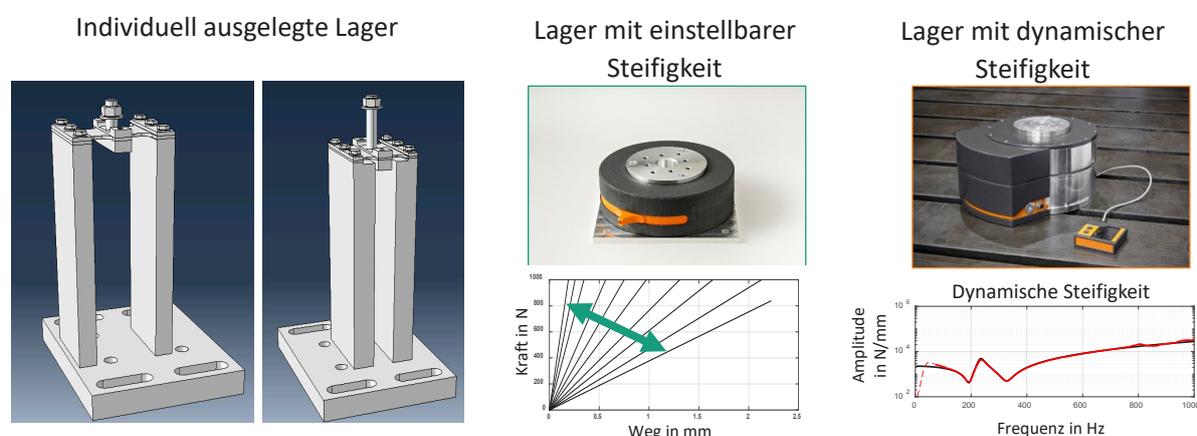


Abbildung 3: Verschiedene Möglichkeiten zur Nachbildung von Anbindungssteifigkeiten nachzubilden (von links: Individuell ausgelegte Lager, Lager mit einstellbarer Steifigkeit (MILLITZER 2021, HANSMANN 2018), Lager mit dynamischer Steifigkeit (MILLITZER 2021))

Indem möglichst einfache Geometrien verwendet werden, wird der Aufwand für die Teilefertigung minimiert. Ohne die individuelle Fertigung von Teilen lässt sich die Anbindungssteifigkeit mit den am Fraunhofer LBF prototypisch umgesetzten Lagern mit einstellbarer Steifigkeit nachbilden (Abbildung 3, Mitte) (MILLITZER 2021, HANSMANN 2018). Deren Steifigkeit kann durch Verstellen eines Schiebers an die gewünschten Versuchsrandbedingungen angepasst werden. Diese einstellbaren Lager ermöglichen somit schnelle und kostengünstige Variantenuntersuchungen und sind selbst betriebsfest ausgelegt, sodass sie auch nach Abschluss einer Erprobung für andere Erprobungen wiederverwendet werden können. An Lagern mit einstellbarer Steifigkeit ist nur die Steifigkeit in einem translatorischen Freiheitsgrad einstellbar, allerdings lassen sich mehrere dieser Lager an einer Anbindungsstelle kombinieren, wodurch Steifigkeitseigenschaften in mehreren, auch rotatorischen, Freiheitsgraden nachgebildet werden können. Sollen neben der statischen Steifigkeit auch dynamische Struktureigenschaften nachgebildet werden, kann dies mit einer um eine aktive Komponente erweiterten Version erfolgen, die ebenfalls am Fraunhofer LBF prototypisch umgesetzt wurde (Abbildung 3, rechts). Diese enthält zusätzlich zur passiven Steifigkeit einen elektrischen Aktor, der über eine Hardware-in-the-Loop-Schnittstelle mit Modellen schwingungsfähiger Strukturen gekoppelt werden und somit deren Verhalten nachbilden kann (MILLITZER 2021).

Anwendungsbeispiele für vereinfachte Erprobungsmethoden unter Nutzung optimierter Versuchsdesigns

In diesem Abschnitt wird an einer Nutzfahrzeug-Batterieanbindung und einem strukturintegrierten Hochvoltspeichergehäuse exemplarisch dargestellt, wie die zuvor dargestellte Vorgehensweise zur systematischen Ableitung optimierter Versuchsdesigns vereinfachte Komponenten- und Strukturproben ermöglicht. Im ersten Anwendungsbeispiel geht es um die Entwicklung eines vereinfachten Prüfstands für die Anbindungsbereiche einer Nutzfahrzeug-Batterie, die seitlich an den Fahrzeugrahmen angebunden ist (Abbildung 4).



Abbildung 4: An den Rahmen angebundener Batteriekasten eines leichten Lkw der 12-t-Klasse (© MAN)

In diesen Anbindungsbereichen werden aus dem Anbauteil Lasten infolge von am Anbauteil wirkenden Trägheitskräften eingeleitet. Darüber hinaus ist die Rahmenverformung von wesentlicher Bedeutung für die Beanspruchung des Anbindungsbereichs, insbesondere für solche Anbauteile, welche an mehreren Stellen mit dem Rahmen verbunden sind. An dem Rahmen des in diesem Beispiel betrachteten Nutzfahrzeugs befinden sich 35 Lastangriffsstellen (Abbildung 5). An diesen Stellen greifen je 3 nichtproportionale translatorische Kräfte an, sodass sich insgesamt 105 nichtproportionale Lasten ergeben.

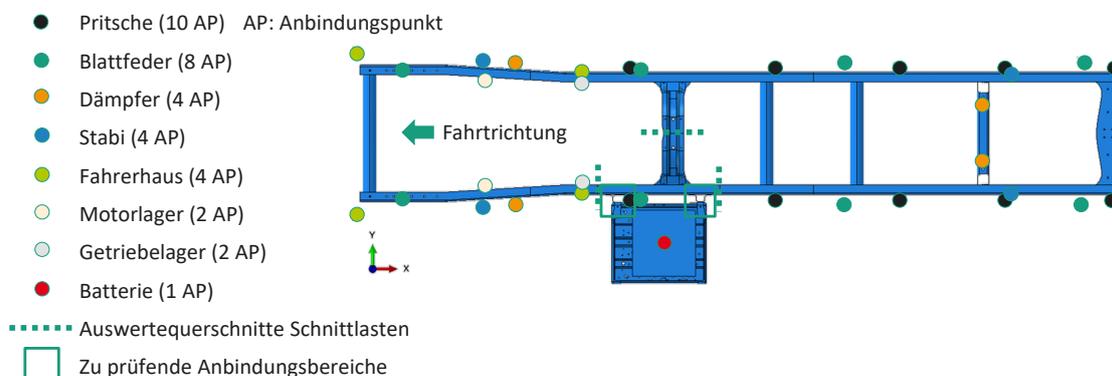


Abbildung 5: Lasteinleitungsorte in den Rahmen des Nutzfahrzeugs (LANDERSHEIM und KÜPPERS 2022)

Die Belastung des Rahmenabschnitts, an den die Nutzfahrzeug-Batterie angebunden ist, kann mit 27 nichtproportionalen Lasten vollständig abgebildet werden. Diese sind die 18 Schnittlastgrößen am Längs- und Querträger, eine je dreiaxige Lasteinleitung an einem Pritschen- und einem Blattfederanbindungspunkt in diesem Bereich, sowie die Trägheitslasten der Batterie selbst. Diese 27 Lasten bilden die Referenzkonfiguration für die Optimierung des Versuchsdesigns gemäß der in Abbildung 2 dargestellten Vorgehensweise. Als Ergebnis der Optimierung ergibt sich ein vereinfachtes Erprobungskonzept, welches eine schädigungsäquivalente Beanspruchung mit nur drei Ersatzlasten erzeugt. Dabei werden am vorderen Ende des Längsträgers, am Pritschenanbindungspunkt und im Batterieschwerpunkt durch Hydraulikaktoren einaxiale Kräfte eingeleitet. Die Lasteinleitung am Blattfederanbindungspunkt entfällt, da sie aufgrund der räumlichen Nähe mit der Lasteinleitung am Pritschenanbindungspunkt zusammengelegt werden kann. die Schnittlastgrößen am hinteren Ende des Längsträgers und am Querträger entstehen durch die hintere Einspannung der Längsträger. Die Einspannung ist dabei als ideal starr angenommen, jedoch hat die Einspannlänge der beiden Längsträger einen wesentlichen Einfluss auf die Anbindungssteifigkeit der Batterie bzw. des Querträgers und somit auf den Kraftfluss und die lokale Schädigung (Abbildung 6).

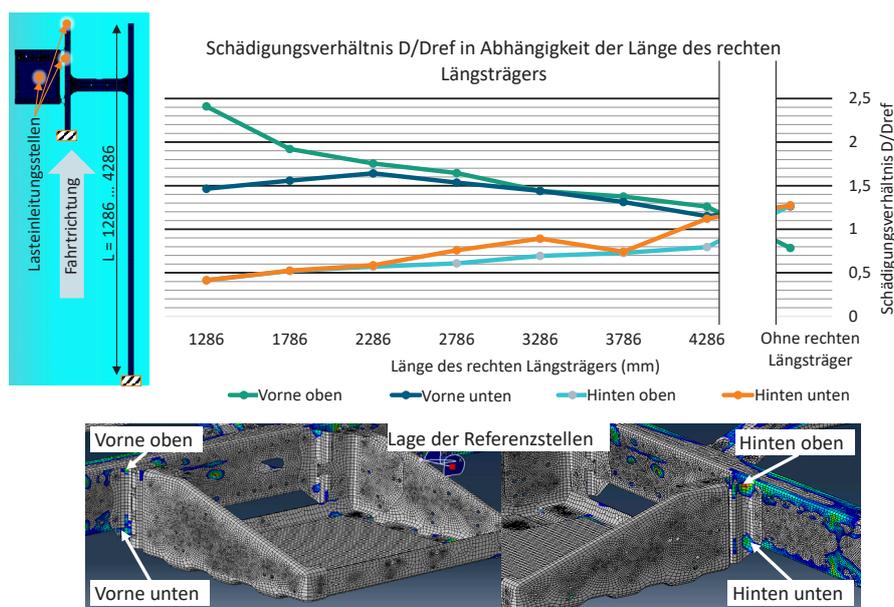


Abbildung 6: Zusammenhang der Schädigung an vier Referenzstellen an der Batterieanbindung von der Einspannlänge des gegenüberliegenden Längsträgers im Verhältnis zur Referenzschädigung (LANDERSHEIM und KÜPPERS 2022)

Hier wurde die Länge des rechten Längsträgers im Prüfbereich variiert. Für die jeweils gewählte Trägerlänge wurden die Lastvektoren an den drei Lasteinleitungsstellen im Hinblick auf eine schädigungsäquivalente Beanspruchung an vier Referenzstellen optimiert, je zwei an der vorderen und der hinteren Anbindung, jeweils oben und unten. Das hintere Ende der Längsträger ist dabei starr eingespannt, das vordere frei. Es zeigt sich, dass die Abweichung der Schädigung mit zunehmender Länge des rechten Längsträgers abnimmt – was einer abnehmenden rechtsseitigen Anbindungssteifigkeit des Querträgers entspricht. Allein durch Variation der Länge lässt sich die maximale Abweichung der Schädigung an den Referenzstellen von einem Faktor 2,4 auf einen Faktor 1,3 reduzieren. Bei der hier angenommenen Wöhlerlinienneigung von $k = 5$ entspricht das einer Absenkung des Fehlers in

der schädigungsäquivalenten Spannungsamplitude von 20 auf 5 %. Wird der rechte Längsträger ganz weggelassen – was einer rechtsseitigen Anbindungssteifigkeit des Querträgers von Null entspricht – ergibt sich ebenso eine maximale Abweichung der Schädigung um einen Faktor 1,3, sodass sich hier eine Erprobung mit einem kleinen Prüflingszuschnitt realisieren lässt. Abbildung 7 zeigt die optimierte Ausgestaltung des vereinfachten Erprobungskonzepts.

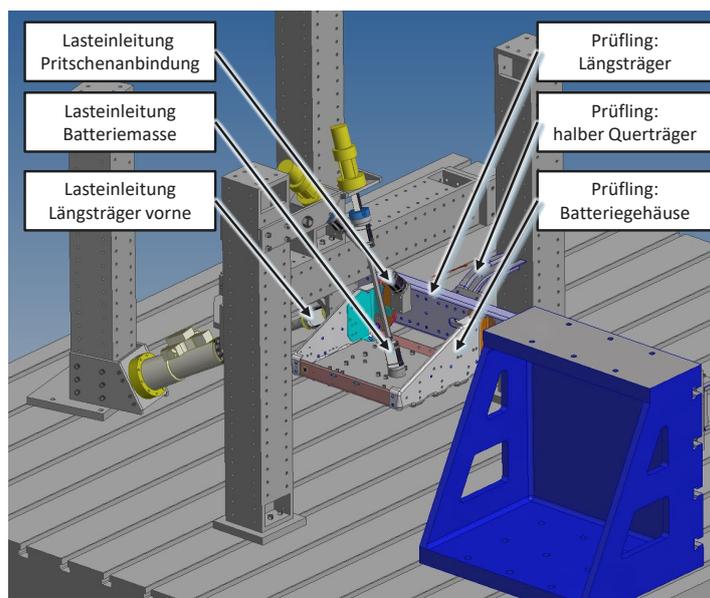


Abbildung 7: Für die Erprobung der Batterieanbindung ausgelegter vereinfachter Ersatzversuch (Landersheim und KÜPPERS 2022)

Die Einbindung numerischer Analysen im Sinne der hybriden Erprobung ermöglicht somit eine weitestgehend schädigungsäquivalente, aber deutlich vereinfachte Ersatzprüfung dieses Bereichs. Trotz der komplexen Belastungssituation des Strukturbereichs mit insgesamt 27 Last- bzw. Schnittlastkomponenten kann die Schädigung an den vier gewählten Auswertestellen mit lediglich drei Aktoren nachgebildet werden. Die in Abbildung 2 dargestellte algorithmische Vorgehensweise ermöglichte hierbei eine effiziente Automatisierung des Auslegeprozesses, indem die Auswertung auf zuvor ausgewählte Auswertestellen eingegrenzt und die Linearität der FE-Modelle über deren Reduktion auf Übertragungsmatrizen ausgenutzt wurde. Dies ermöglicht eine gezielte Optimierung, da dadurch eine Vielzahl verschiedener Varianten in einem kurzen Zeitraum untersucht werden kann. Die so abgeleiteten Ersatzversuche bieten durch den geringeren Aufwand (Aktorzahl, Platzbedarf, Energieaufwand) und die frühere Verfügbarkeit ein erhebliches Potenzial, Strukturbereiche effizienter zu validieren und zu optimieren, die steigende Variantenvielzahl besser zu berücksichtigen und somit insgesamt den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen.

Auch für Segmente aus größeren komplexen Strukturen sind hybride Erprobungsmethoden interessant (LANDERSHEIM et al. 2022). In Abbildung 8 ist ein Versuchsaufbau für ein Tragstruktursegment eines strukturintegrierten Hochvoltspeichers dargestellt. In dem Anwendungsbeispiel werden an diesem Segment verschiedene innovative Fügeverfahren realitätsnah geprüft, die im Projekt „Light Materials for Mobility (LM4M)“ bei Fraunhofer entwickelt wurden. Im Versuchsstand kommen die am Fraunhofer LBF prototypisch realisierten einstellbaren Steifigkeitselemente zum Einsatz (Abbil-

dung 3, Mitte). Mit diesen lassen sich verschiedene Steifigkeiten der umgebenden Karosseriestruktur nachbilden und die Beanspruchungszustände im Bereich der Fügstellen gezielt einstellen, wie in Abbildung 8 am Beispiel einer Dehnungsmessstelle (DMS 6) dargestellt ist.

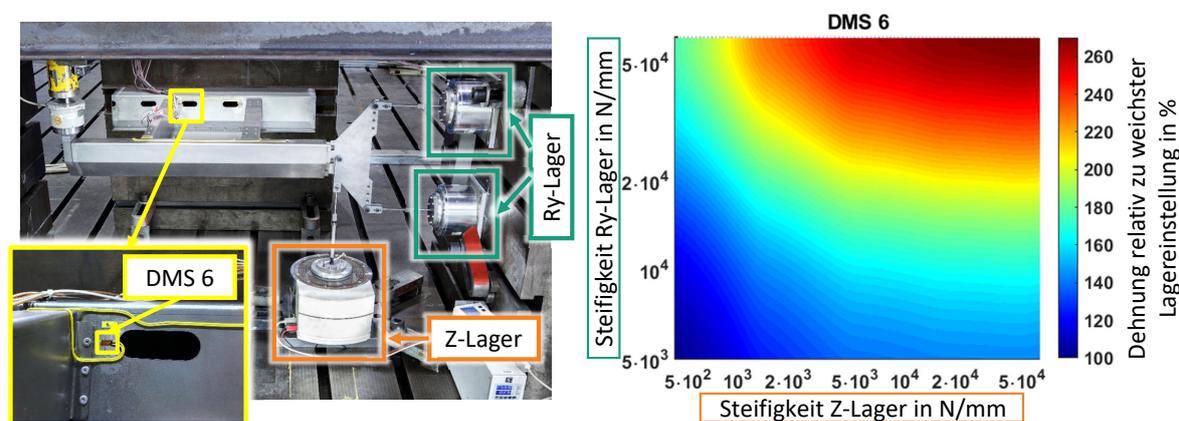


Abbildung 8: Vereinfachter Ersatzversuch für die Gehäusestruktur eines strukturintegrierten HochvoltSpeichers (links) und die Abhängigkeit der lokalen Dehnung an einem ausgewählten Dehnungsmessstreifen (DMS 6) von der Steifigkeit der einstellbaren Lager (Z- und Ry-Lager) in diesem Versuchsaufbau (rechts) (LANDERSHEIM et al. 2022)

Durch drei einstellbare Lager wird am hinteren Ende des Seitenschwellers die Steifigkeit der nicht im Prüflingszuschnitt enthaltenen Struktur in Vertikalrichtung (Z-Lager) und in Längsrichtung (Ry-Lager) nachgebildet, wobei sich durch den Abstand der beiden Ry-Lager eine rotatorische Steifigkeit um die Querachse ergibt. Durch gezieltes Einstellen der Steifigkeit der Lager lässt sich die Beanspruchung an den Dehnungsmessstellen signifikant beeinflussen. In Abbildung 8 ist rechts zu sehen, dass innerhalb des Verstellbereichs der Lager eine Zunahme der Dehnungsamplitude an der ausgewählten Messstelle (Dehnungsmessstreifen DMS 6) in der Darstellung um Faktor 2,7 erreicht werden kann. Damit ist es möglich, mit einem Versuchsstand durch die Änderung der Lager-eigenschaften eine Erprobung für verschiedene Einbausituationen der Struktur zu realisieren, die etwa unterschiedlichen Fahrzeugen bzw. Fahrzeugvarianten und -konfigurationen entsprechen. Die abzubildenden Zieleigenschaften bzw. Zielbeanspruchungen werden dafür im Sinne einer hybriden Erprobungsmethode durch numerische Analysen der Gesamtstruktur ermittelt.

Schlussfolgerungen

Hybride Erprobungsmethoden sind ein wichtiges Werkzeug für die Absicherung und Optimierung der Betriebsfestigkeit in einem effizienten Produktentwicklungsprozess. Mit ihnen können Teilstrukturen und Komponenten, die durch signifikante Wechselwirkungen mit angrenzenden Strukturen geprägt sind, isoliert und frühzeitig im Entwicklungsprozess unter den realen Beanspruchungen erprobt werden, denen sie auch im Gesamtsystem unterworfen sind. Dies vermeidet langwierige und teure Änderungen aufgrund von erst spät entdeckten Schwachstellen. Damit ermöglicht es eine frühere Leichtbauoptimierung sowie umfangreichere Variantenuntersuchungen und Bauteilcharakterisierungen, als dies bei der Erprobung im Gesamtsystem möglich ist. Dies bietet insbesondere für die hohe Vielfalt an Fahrzeugkonfigurationen und Belastungsszenarien in der Landwirtschaft ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung in der Betriebsfestigkeitserprobung. Dabei vereint eine solche

Vorgehensweise die Vorteile numerischer und experimenteller Verfahren im Erprobungsprozess. Die numerische Simulation ist heute in der Lage, die äußeren Lasten und inneren Beanspruchungen der Strukturen mit hinreichender Genauigkeit abzubilden, und diese mit den beschriebenen Methoden in vereinfachte Versuche realitätsnah zu übertragen. Die tatsächliche bauteilspezifische Beanspruchbarkeit des Werkstoffs ist jedoch nach wie vor nur im Experiment mit hinreichender Sicherheit zu bestimmen. Durch den Einsatz vereinfachter, aber dennoch aussagekräftiger Komponenten und Teilstrukturversuche kann dies in größerem Umfang in früheren Produktentwicklungsphasen erfolgen. Die erforderliche Anzahl von Versuchen in der Gesamtfahrzeugerprobung kann durch bessere Validierung der einzelnen Strukturen reduziert und günstigstenfalls auf die Serienfreigabe beschränkt werden.

Literatur

- Aramide, B.; Pityana, S.; Sadiku, R. et al. (2021): Improving the durability of tillage tools through surface modification—a review. *Int J Adv Manuf Technol* 116, pp. 83–98, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
- Brown, M. W.; Miller, K. J. (1973): A Theory of Fatigue Under Multiaxial Strain Conditions. *Proc. Inst. Mech. Eng.* 187(1), pp. 745–755, https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1973_187_161_02
- Dhangar, V.; Perumal, S.; Kumar, A.; Redkar, D. et al. (2017): Durability Analysis Methodology of Tractor Hydraulic Bell Crank Assembly for Various Agricultural Operations. In: SAE Technical Paper 2017-26-0235, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0235>
- Paraforos, D. S.; Griepentrog, H. W.; Vougioukas, S. G. (2016): Methodology for designing accelerated structural durability tests on agricultural machinery. *Biosystems Engineering* 149, pp. 24–37, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.004>
- Eckstein, C. (2017): Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern
- Hansmann, J.; Seipel, B.; Kaal, W.; Kraus, R.; Melz, T. (2018): EP2694836B1 Vorrichtung zur Übertragung oder Entkopplung von mechanischen Schwingungen. Europäisches Patentamt, <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045562264/publication/EP2694836B1?q=pn%3DEP2694836B1>, Zugriff am 09.05.2025
- Kiesel, A.; Schliebner, R.; Seise, M. (2011): Entwicklung und Anwendung von mathematischen Optimierungsmethoden zur Ableitung von vereinfachten Prüfungen für Fahrwerksbauteile. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42(4), S. 306–313, <https://doi.org/10.1002/mawe.201100765>
- Kumar, A.; Mahajan, A.; Prasanth, S.; Darekar, S. et al. (2015): Agricultural Tractor Cabin Structure Design for Durability and Rollover Protective Structure Test. In: SAE Technical Paper 2015-26-0163, SAE, <https://doi.org/10.4271/2015-26-0163>
- Landersheim, V.; Hansmann, J.; Bartolozzi, R.; Millitzer, J. (2022): Hybrides Testen – Verbindung von numerischer Simulation und experimenteller Prüfung zur Steigerung von Genauigkeit und Effizienz. In: DVM Workshop Prüfmethodik für Betriebsfestigkeitsversuche in der Fahrzeugindustrie, DVM, 4.–5. Mai 2022 in Sindelfingen, Berlin, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., S. I-1 bis I-14
- Landersheim, V.; Küppers, M. (2022): Ansatz zur Betriebsfestigkeitsbewertung der rahmenseitigen Anbindung von Energiespeichern mittels Ersatzversuch auf Basis numerischer Schädigungsanalysen. In: 48. Tagung des DVM AK-Betriebsfestigkeit: Betriebsfestigkeit – Wissensmanagement und Methodenentwicklung entlang der Wertschöpfungskette, DVM, 12.–13. Oktober 2022 in Plauen, Berlin, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung, <https://doi.org/10.48447/BF-2022-008>
- Landersheim, V.; Möller, R.; Dittmann, K.-J. (2016): Ableitung eines vereinfachten Ersatzversuchs für Pkw-Integralträger mittels numerischer Schädigungsbewertungen. In: 43. Tagung des DVM Arbeitskreises Betriebsfestigkeit: Potenziale im Zusammenspiel von Versuch und Berechnung in der Betriebsfestigkeit, DVM, 12.–13. Oktober 2016 in Steyr, Österreich, Berlin, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., S. 135–150

- Lozia, Z. (2022): The concept of the application of modelling and simulation to simplify and reduce the cost of durability tests of vehicles and their components. In: The 13th International conference on Automotive Safety, 2022, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1247/1/012011>
- Millitzer, J.; Hansmann, J.; Lapicciarella, G.; Tamm, C.; Herold, S. (2021): Tuning and Emulation of Mechanical Characteristics – Tunable Mounts and a Mechanical Hardware-in-the-Loop Approach for More Efficient Research and Testing. In: Uncertainty in Mechanical Engineering, Ed. Pelz, P.F.; Groche, P., Cham, Springer, p. 12, https://doi.org/10.1007/978-3-030-77256-7_12
- Miner, M.A. (1945): Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics* 3, pp. 159-164, <https://doi.org/10.1115/1.4009458>
- Soproni, I.; Lindtner, E.; Franschitz, S. (2013): Load and Fatigue Life Equivalent Reduction of Component Tests from Road Load Data for Efficient Part Validation. In: International FEMFAT User Meeting 2013, FEMFAT, 15–17 May 2013 in Steyr, Österreich
- Steengaard, J. R.; Holm, A. P. K.; Arora, V.; Larsen, M. L. (2024): Finite element validation and model updating of beam in agricultural mower for fatigue assessment. *Procedia Structural Integrity* 58, pp. 61–67, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.011>
- Subbaiyan, P.B.; Nizampatnam, B.; Londhe, A.; Redkar, D.; Arun, G. (2021): Virtual Simulation Method to Predict Farm Tractor Durability Load Cycles for Proving Ground Tests. In: Symposium on International Automotive Technology, 29 Sept 2021, SAE International, <https://doi.org/10.4271/2021-26-0097>
- Verma, V.; Saravanan, V.; Redkar, D.; Mahajan, A. et al. (2016): Agricultural Tractor Hydraulic Lift Arm Assembly Design for Durability and Correlation with Physical Test. In: SAE Technical Paper 2016-28-0237, <https://doi.org/10.4271/2016-28-0237>
- Walter, M.; Gorgas, S. (2007): Virtuelle Prüfstandsdefinition zur realitätsnahen Prüfung nicht entkoppelter Achsträger. *Materials Testing* 49(9), S. 480–486
- Wen, C.; Xie, B.; Li, Z.; Yin, Y.; Zhao, X.; Song, Z. (2020): Power density based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles. *Biosystems Engineering* 200, pp. 73–88, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.008>
- Wöllner, U. (2021): Experimentelle und numerische Untersuchungen des Ermüdungsrissoverhaltens und der Kerbwirkung an Traktorrädern. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg

Autoren

Dr.-Ing. Volker Landersheim ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Dipl.-Ing. Marc Wallmichrath** ist Abteilungsleiter Baugruppen und Systeme und **Dipl.-Ing. Riccardo Möller** ist stellvertretender Abteilungsleiter Baugruppen und Systeme im Bereich Betriebsfestigkeit am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Bartningstraße 47, 64289 Darmstadt. E-Mail: volker.landshheim@bf.fraunhofer.de

Hinweise

Teile dieses Artikels erschienen bereits in: Landersheim, V.; Möller R. (2024): Hybride Versuchsmethoden zur Effizienzsteigerung in der Betriebsfestigkeitserprobung von komplex eingebundenen Teilstrukturen. *Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand – Prüftechnik – Kennwertermittlung – Schadensvermeidung*, 42. Vortrags- und Diskussionstagung, 05.–06.12.24 in Krefeld.