

Virtuelle Bewertung und Optimierung des Schwingungskomforts mobiler Arbeitsmaschinen mittels Gesamtfahrzeugsimulation am Beispiel Radlader

Virtual assessment and optimization of vibration comfort of mobile machines using full vehicle simulation using the example of a wheel loader

Dipl.-Ing. **Manuel Bös**, Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH,
Bischofshofen

Prof. Dr.-Ing. **Marcus Geimer**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe

Dipl.-Ing. (FH) **Gerald Hofmann**, cosin scientific software, München

Abstract

In this paper a methodology for optimizing the vibration comfort of mobile machines using full vehicle simulation is presented. Vibration comfort as part of the total operator's comfort today is one of the key selling points especially with machines that are extensively used and where driving is an important part of the whole working process. The goal is to reduce harmful whole-body vibrations acting on the operator without influencing his ability to control the machine.

Therefore a 3D-MBS-model of a wheel loader including all relevant suspension systems is used. Combined with state-of-the-art tire modeling techniques, developers of mobile machines have the opportunity to realistically model the comfort behavior of their vehicles.

To always be aware of all the effects an adjustment of a suspension system has on the vehicle's total comfort or vehicle dynamic behavior, an automated solution for driving maneuver control has been developed. Similar to the behavior of real test drivers when assessing a new machine configuration, the virtual vehicle is driven through several driving maneuvers automatically while each maneuver provides insight in different behavioral patterns. Afterwards the single pieces of information are collected and condensed into one overall report.

Since vibration comfort mostly deals with subjective impressions, objectification methods are needed to assess objective results of simulations or measurements. There are several different relevant standards and documented methods to assess vibration comfort or health risks. This implies that in an optimization process depending on the assessment method used, there will be different optimum solutions. To give the simulation user deeper insights, the simulation results are post-processed according to several assessment methods at the same time and all results are presented. That way, the development engineer is always well informed to ensure an efficient optimization process. Depending on the applicability of the method, the company's preference to a certain assessment method or other reasons, the optimum system configuration can be defined.

Additionally a solution for parameter studies and an automatic comparison to a defined "status-quo" machine behavior has been integrated to ensure an efficient development process when fine-tuning suspension systems or evaluating new concepts.

1. Schwingungskomfort mobiler Arbeitsmaschinen

Moderne mobile Arbeitsmaschinen – insbesondere diejenigen mit hohen zeitlichen Fahranteilen in ihren jeweiligen Arbeitsprozessen wie Traktoren, Radlader oder Muldenkipper – sind heute mit einer Vielzahl von komfortsteigernden Schwingungssystemen ausgestattet. Dies trifft insbesondere auf die sogenannten Leistungsmaschinen zu, d.h. Fahrzeuge, die über eine komplette Arbeitsschicht meist durch einen einzelnen Bediener unter hohen Produktivitätsanforderungen dauerhaft betrieben werden.

Ist das Thema Schwingungskomfort beispielsweise im Automobilssektor schon seit Jahrzehnten ein wichtiges Entwicklungsziel und Wettbewerbsmerkmal, so stellt sich diese Themenstellung in der Branche der mobilen Arbeitsmaschinen als relativ jung dar, beschreibt allerdings einen starken Aufwärtstrend und existiert heute parallel zu Merkmalen wie Effizienz, Robustheit und Leistungsfähigkeit. So ist heute keine Produktvorstellung eines renommierten Herstellers mehr ohne einen großzügigen Abschnitt über die Komfortmerkmale des Fahrzeugs denkbar. Der Schwingungskomfort nimmt dabei eine wichtige Teilstellung ein.

Objektiv betrachtet ist gerade in der Branche der mobilen Maschinen der Bedarf an schwingungsreduzierenden Maßnahmen sehr deutlich. Die Fahrzeuge werden üblicherweise auf unebenen Untergründen bewegt, arbeiten über lange Arbeitsschichten mit demselben Bediener und verlangen diesem ein hohes Maß an Konzentration und Präzision in der Bedie-

nung ab. Eine Optimierung der Schwingungskomforteigenschaften als Teil des Gesamtkomforts hat somit das Potenzial, kurz- und langfristige Auswirkungen der Einwirkung von Ganzkörpervibrationen (GKV) und Stoßbelastungen auf den Maschinenführer zu reduzieren.

Zu den kurzfristigen Auswirkungen von GKV können unter anderem beeinträchtigte Leistungsfähigkeit, Störung des allgemeinen Wohlbefindens und schmerzhafte Muskelverspannungen gezählt werden [1]. Zum Ausgleich der auf den Körper wirkenden, äußeren Kräfte antwortet dieser mittels gesteigerter Muskelarbeit [2], welches sich in beschleunigter Ermüdung äußern kann. Für die besonders für Fahrer von mobilen Maschinen typischen Steuerungsaufgaben ist weiterhin die Beeinflussung der feinmotorischen Fähigkeiten durch Vibrationen [3] relevant.

Parallel dazu wirken langfristige Einwirkungen von GKV nachweislich schädigend auf den menschlichen Organismus und hier vor allem die Wirbelsäule [1], was sich unter anderem in der offiziellen Anerkennung der Berufskrankheit BK2110 „Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjährige, vorwiegend vertikale Einwirkung von Ganzkörperschwingungen im Sitzen“ zeigt.

Umgelegt auf die Aufgaben eines Maschinenführers führt der Einfluss von GKV somit allgemein zu einer gesteigerten Wahrscheinlichkeit von Ausfallszeiten (Unfälle, Fahrerausfälle) sowie einer negativ beeinflussten Produktivität.

Die besonders für ungefederte Arbeitsmaschinen typischen, stoßhaltigen Fahrerbelastungen stehen weiterhin im Verdacht, den menschlichen Körper bei gleichem Effektivwert stärker zu schädigen als eine äquivalente, harmonische Schwingung [4]. Stoßhaltige Anregungen entstehen beispielsweise bei der Fahrt über unebenes Gelände oder Einzelhindernisse (z.B. Schlaglöcher, Steine, Bahnschwellen und Entwässerungsrinnen) sowie im Arbeitsprozess durch den Kontakt des Arbeitswerkzeugs (z.B. Schaufel) mit der Umgebung.

Nicht zuletzt wird der Fokus der Maschinenbetreiber auf das Thema Schwingungskomfort aktuell zusätzlich durch legislative Randbedingungen wie den nationalen Umsetzungen der EU-Richtlinie 2002/44 EG geschärft, sodass Schwingungskomforteigenschaften nun immer häufiger schon bei der Ausschreibung zu einem Maschinenkauf berücksichtigt werden.

Auch innerhalb der Branche der mobilen Maschinen zeigen sich je nach Fahrzeugtyp deutliche Unterschiede in den verwendeten Technologien und dem Ausstattungsgrad der Fahrzeuge mit schwingungsmindernden Maßnahmen. Dies liegt vor allem an den fahrzeugspezifischen Randbedingungen, die es oftmals erfordern, maschinenspezifische Lösungen zu schaffen bzw. verhindern, in anderen Fahrzeugen bewährte Lösungen adaptieren zu können.

Als Beispiel sei hier der Vergleich der Kabinenlagerung eines modernen Leistungsradladers (Bsp. *Liebherr L576 2plus2*) mit der eines modernen Großtraktors (Bsp. *Fendt 939 Vario*) genannt. Findet man an Traktoren in dieser Klasse üblicherweise niederfrequent gefederte Kabinen zur Isolation von energiehaltigen, vertikalen Schwingungen und Stößen, so herrscht an Radladern eine Technologie vor, die sich vornehmlich auf die effiziente Isolation von Körperschall beschränkt.

Betrachtet man die maschinenspezifischen Anforderungen genauer, stellt man fest, dass eine vertikal niederfrequent gefederte Kabine analog zum Traktor auf einem Radlader aus verschiedenen Gründen nicht ohne weiteres sinnvoll eingesetzt werden kann. Innerhalb der typischerweise instationären und zyklischen Einsatzprofile eines Radladers ($t_{\text{Zyklus, typ.}} = 30 - 120 \text{ s}$) ergeben sich nur sehr kurze Zeitbereiche, in denen ein niederfrequent gefedertes Kabinenlagerkonzept mehr Vor- als Nachteile mit sich bringt. Um dem Maschinenführer das für den produktiven Betrieb notwendige Prozess-Feedback in gewissen Zeitabschnitten zu gewähren, wäre zwingend ein mindestens adaptives Systemverhalten notwendig (z.B. stufenlose Verstellung der Dämpfung bis hin zur Blockierung). Eine manuelle Bedienung wäre aufgrund der zyklischen Betriebsweise untragbar.

Weiterhin sei die Einhaltung der Normwerke zum Überrollschutzaufbau (ROPS) der Fahrzeuge genannt [5, 6]. Diese verlangen die Prüfung der Kabine inklusive Lagerung mit zur Maschinenmasse steigenden Prüfkräften um sicherzustellen, dass dem Fahrer beim Umstürzen der Maschine ein sicherer Überlebensraum zur Verfügung steht.

Da ein typischer Leistungsradlader der 24 t Klasse ca. einen Faktor Zwei im Leer- bzw. zulässigen Gesamtgewicht im Vergleich zum Großtraktor mit bringt, stellt dies ungleich höhere Anforderungen an die mechanische Robustheit des Federungssystems. Die Forderung nach Robustheit erhöht sich beim Blick auf die deutlich härteren Einsatzbedingungen der Baumaschine weiter. Allgemein ergäbe sich somit ein relativ begrenzter Nutzen in Verbindung mit einem sehr hohen technischen Aufwand.

Anhand des Beispiels der niederfrequenten Kabinenfederung wird deutlich, dass sich die Maschinenhersteller der Aufgabe gegenübergestellt sehen, stark maschinenspezifische Schwingungslösungen zu entwickeln und abzustimmen sowie deren Interaktionen untereinander zu bewerten. Erschwerend wirken hier die große Bandbreite von möglichen Einsatzbedingungen eines einzelnen Maschinentyps und die dadurch entstehenden, fahrzeug- und prozessspezifischen Schwingungssituationen.

Eine detaillierte Kenntnis der Einsatzbedingungen und eine effiziente Entwicklungsmethodik sind somit zwingend erforderlich zur Darstellung marktgerechter Produkte bei gleichzeitiger Forderung nach verkürzten Entwicklungszeiten.

2. Komfortsimulation

Wurden vor allem Komfortsysteme in der Vergangenheit oftmals zur Gänze versuchstechnisch mittels Prototypen und ausgebildeten Testfahrern bewertet und abgestimmt, so wird dies in der heutigen Fahrzeugentwicklung durch moderne Simulationsverfahren ergänzt. Die Simulation bringt hierbei ihre allgemein bekannten Vor- und Nachteile mit sich:

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Simulation von komfortrelevanten Schwingungssystemen

Vorteile	Nachteile
Exakt reproduzierbare Randbedingungen der virtuellen Versuche	Validierungsaufwand der Modelle
Effiziente Durchführung von Parameterstudien	Ungenauigkeiten im Verhalten durch Vereinfachung/Abstraktion
Weitreichende Analyse- und virtuelle Messmöglichkeiten	Beschränkung auf objektive Kenngrößen
Möglichkeit zur Nutzung von Optimierungswerkzeugen	

Ziel des Einsatzes der Simulation bei der Entwicklung von komfortrelevanten Schwingungssystemen ist es, diese vorab bereits detailliert untersuchen und Parametereinflüsse erkennen zu können. Hiermit steigt das Systemverständnis der Entwickler, womit idealerweise ausgereifere, erste Prototypen zur späteren, subjektiven und messtechnischen Bewertung ermöglicht sowie weniger Iterationsschleifen benötigt werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, Ideen und alternative Konzepte bereits vor einer ersten realen Umsetzung realistisch auf ihr Potenzial hin zu prüfen und dementsprechend zukünftige Entwicklungsschritte zielsicher zu setzen.

Demgegenüber steht der Aufwand der Modellerstellung und –validierung mit realen Messdaten, wobei letzteres erfahrungsgemäß den deutlich größeren Arbeitsanteil widerspiegelt. Um den Modellierungs- und Validierungsaufwand einzuschränken, bietet sich eine objektorientierte Modellbildung an. Hierbei werden einzelne Komponenten mit ihren Eigenschaften und Schnittstellen definiert und es besteht die Möglichkeit, die einmal validierten Komponenten oder Submodelle im gleichen oder in anderen Modellen wieder zu verwenden. Als besonders in der Branche der mobilen Maschinen verbreitete Beschreibungssprache zur objektorientierten Beschreibung von multidisziplinären Systemen empfiehlt sich Modelica [7].

Für diese Modellierungssprache existieren sowohl freie als auch kommerzielle Entwicklungsumgebungen mit der Möglichkeit zur Modellierung und Simulation von Systemen mit mechanischen, hydraulischen, pneumatischen, regelungstechnischen, elektrischen bzw. elektronischen sowie thermodynamischen Komponenten.

Generell können nun zwei alternative Herangehensweisen verfolgt werden: Die Erstellung eines Teilmodells der Maschine zur Lösung einer spezifischen Fragestellung (Bsp. Kabinenfederung) oder die Modellierung des gesamten Fahrzeugs mit all seinen schwingungstechnisch relevanten Komponenten (Gesamtfahrzeugsimulation) [8]. Letzteres bietet die Möglichkeit, verschiedene Konzepte komfortsteigernder Maßnahmen quantitativ auf einer Entwicklungsplattform untereinander zu vergleichen, selbst wenn diese nicht dem gleichen Teilsystem der Maschine zugeordnet werden können. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit Fahrmanöver durchzuführen, die mit dem realen Fahrzeug so nicht gemessen wurden. Demgegenüber steht natürlich ein deutlich größerer Modellierungs- und vor allem Validierungsaufwand. Die Zielsetzung der Gesamtfahrzeugsimulation liegt hierbei in der Ermöglichung von relativen Vergleichen unter hoher, absoluter Genauigkeit.

Aufgrund der Wiederverwertbarkeit von validierten Teilmodellen in der objektorientierten Modellierung bietet sich der Weg an, über die Modellierung und Optimierung von einzelnen Teilsystemen der Maschine hin zu einer Gesamtfahrzeugplattform zu arbeiten.

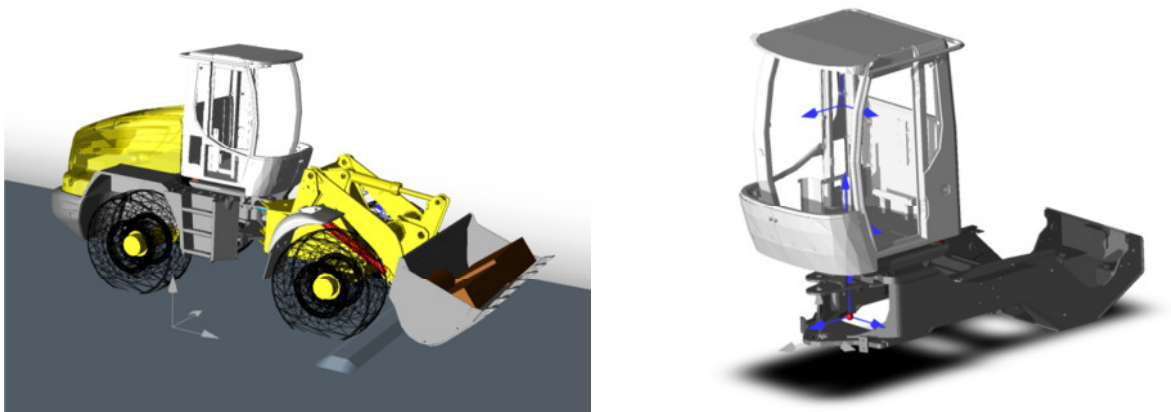


Bild 1: Gesamtfahrzeug- (links) und Teilsystemsimulation (rechts)

Nach Modellierung aller schwingungstechnisch relevanten Systeme (Reifen, Kabinenfederung, Knick- und Pendelgelenk, Nickschwingungstilger, Fahrersitz) entsteht ein Fahrzeugmodell mit bis zu 22 Freiheitsgraden. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hier vor allem in der realistischen Abbildung der schwingungstechnischen Eigenschaften der großvolumigen Erdbewegungsreifen des Fahrzeugs.

Eine detailliertere Beschreibung des Aufbaus des Fahrzeugmodells ist in [8] zu finden.

3. Reifenmodellierung

Die schwingungstechnischen Eigenschaften der Reifen nehmen besonders bei un- oder teilgederten Fahrzeugen eine Schlüsselrolle ein. Aufgrund von fehlenden Aufbaufederungen bestimmen die Federungs- und Dämpfungseigenschaften der Reifen maßgeblich die in das Fahrzeug eingeleiteten Kräfte und damit seine Bewegungen.

Bei der Modellbildung von Gesamtfahrzeugen mobiler Arbeitsmaschinen mit dem Ziel einer Komfortbewertung und -optimierung ist daher ein besonderer Fokus auf die realistische Abbildung des Reifenverhaltens zu legen. Folgende Liste zeigt einige der Anforderungen an Reifenmodelle bei der Erstellung von Radladermodellen im Hause *Liebherr*:

- Eignung für Komfortuntersuchungen bis zu mindestens 20 Hz
- Geeignet für beliebig unebene Untergründe und (scharfkantige) Einzelhindernisse
- Abbildung von großvolumigen, weichen Reifen (nichtlineares, transientes Reifenverhalten)
- Große Bandbreite von möglichen Radlasten
- Realistisches Umschließen von kleinen Hindernissen (Enveloping)
- Flexibilität bzgl. verfügbarer Reifenparameter
- Akzeptable Rechenzeiten
- Kompetenter Support
- Einfache Möglichkeiten zur Bodenmodellierung
- Sinnvolles Kosten-Nutzen-Verhältnis

Aufgrund der Anforderungen entfallen im Markt der Reifenmodelle sowohl die rein empirischen Modelle (keine kurzwelligen Anregungen, schmaler Gültigkeitsbereich) als auch die FE-Modelle (Hohe Rechenzeiten, fehlendes Wissen um Parameter). Grundsätzlich eignen sich sowohl semiempirische sowie physikalisch motivierte Modelle. Ein detaillierterer Vergleich der zur Verfügung stehenden Modelle hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen führte zur Auswahl des physikalischen Reifenmodells *FTire* des Münchner Unternehmens *cosin scientific software*, welches insbesondere in den Punkten Recheneffizienz, Support und Flexibilität bzgl. Reifendaten und Bodenmodellen Alleinstellungsmerkmale aufweist. Das externe Reifenmodell *FTire* wird mit eigenem Solver ausgeliefert und per Co-Simulation an das verwendete Systemsimulationstool *SimulationX (ITI GmbH)* angebunden.

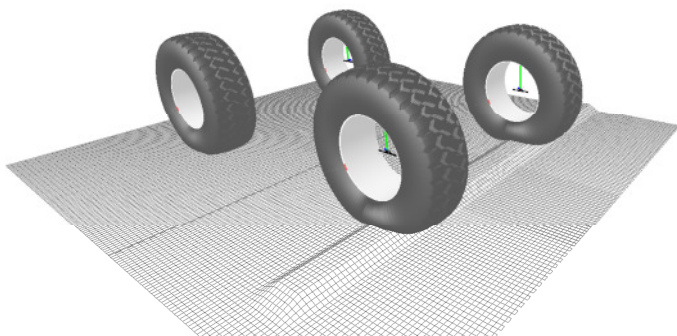


Bild 2: EM-Reifen eines Liebherr L528 Radladers abgebildet in cosin FTire

Am Beispiel eines typischen Leistungsradladers der 24 t Klasse (*Liebherr L576*) mit einem Reifendurchmesser von etwa 1730 mm und einer maximalen Radlast von > 160 kN wird die Notwendigkeit gegenüber einer Flexibilität in der Reifenparametrierung deutlich. Können typische PKW-Reifen noch auf zahlreich vorhandenen Prüfständen statisch und dynamisch

vermessen werden, so stellt die Parameterbestimmung der verwendeten Erdbewegungsreifen (EM-Reifen) den Anwender vor größere Schwierigkeiten. Je nach Anforderungen an die abzubildende Dynamik kann *FTire* hierbei mit unterschiedlich detaillierten Parametersätzen bestückt werden. Über das verfügbare Tool „*FTire Fit*“ können zudem reale Prüfstandsversuche nachgebildet werden, wobei über iteratives Parameterfitting die notwendigen Reifendaten automatisch bestimmt werden.

4. Modellaufbau und Testszenarien

Insbesondere bei der Erstellung eines Gesamtfahrzeugmodells sollte der Grundsatz befolgt werden, die Modellkomplexität so gering wie möglich und nur so aufwändig wie nötig zu halten. Vereinfachungen werden hier vor allem durch die Verwendung von Starrkörpern und den vereinfachten Aufbau von Antriebs- und Schwingungssystemen getroffen. Zur detaillierteren Beantwortung von speziellen Fragestellungen können diese bei Bedarf modular durch komplexere Submodelle ersetzt werden.

Zur Validierung besteht sowohl der Bedarf nach einem äquivalenten realen Fahrzeug ausgestattet mit entsprechender Messtechnik, als auch nach real und virtuell reproduzierbaren Einsatzszenarien. Hierzu wird im Bereich der Komfortvalidierung beispielsweise auf geometrisch definierte Schlechtwegstrecken und Einzelhindernisse zurückgegriffen. In Kombination mit aus der PKW-Industrie bekannten Fahrmanövern der Fahrdynamik kann damit ein gesamter Katalog von Validierungsszenarien aufgestellt werden. Hiermit wird das Modell befähigt, neben komfortrelevanten Fragestellungen auch solche der Fahrdynamik und Fahr-sicherheit zu beantworten.

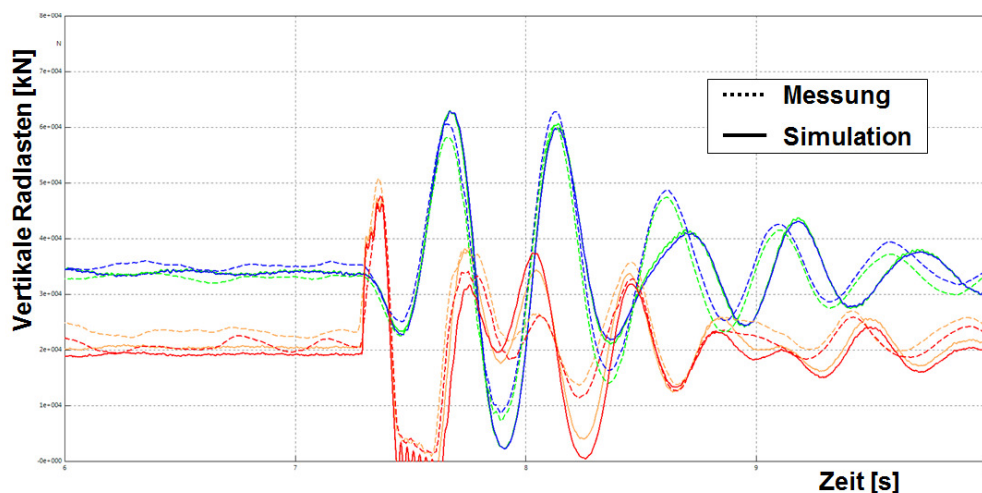


Bild 3: Beispielhaftes Validierungsergebnis: Vertikale Radlasten der 4 Reifen während einer Hindernisüberfahrt mit der Vorderachse.

Das reale Fahrzeug sieht sich im Einsatz mit unterschiedlichsten Einsatzbedingungen und -situationen konfrontiert. Hierbei ist davon auszugehen, dass eine Veränderung an der Maschinenkonfiguration (z.B. eines komfortrelevanten Schwingungssystems) je nach Situation und den damit verbundenen Fahreranforderungen an die Maschine sowohl positive, als auch negative Veränderungen bewirken kann. Bei der etablierten, versuchstechnischen Bewertung von neuen oder neu abgestimmten Schwingungssystemen prüfen die Versuchsfahrer das Fahrzeug daher in fahrzeugtypischen Einsatzsituationen, um ein fundiertes Gesamtbild der Vor- und Nachteile der aktuellen Konfiguration zu erlangen.

Diese intuitive Herangehensweise wurde im vorliegenden Fall analog in der virtuellen Welt umgesetzt. Das validierte Gesamtfahrzeugmodell wird dabei von einer in *Matlab* entwickelten Simulationssteuerung angesteuert, welche ermöglicht, vordefinierte Fahrmanöver automatisiert durchzuführen und die jeweiligen Ergebnisse einer Postprocessing-Einheit zuzuführen. Dort können dann Bewertungen nach bekannten Normen und alternativen oder weiterführenden Verfahren durchgeführt werden (Siehe Abschnitt 5).

Um das Simulationsmodell des Radladers möglichst leicht bedienen bzw. extern ansteuern zu können, ist ein parametrischer Modellaufbau vorgesehen. Durch die globale Definition von Grundparametern wie z.B. Beladungszustand und Hubgerüstposition während der Fahrt und dem automatischen Folgen von untergeordneten Parametern (z.B. Gelenkwinkel, Vorspannkraft, Massen usw.) wird hierdurch eine effiziente Bedienung ermöglicht sowie die Wahrscheinlichkeit von Bedienungsfehlern vermindert.



Bild 4: Parametrischer Aufbau des Gesamtfahrzeugmodells (Bsp. Hubgerüststellung)

5. Virtuelle Komfortbewertung

Wie in Tabelle 1 aufgeführt, sieht sich der Anwender der numerischen Simulation üblicherweise mit objektiven Ergebnisgrößen konfrontiert (Ausnahme: Nutzung von Fahrsimulato-

ren). Zur Bewertung des subjektiven Schwingungskomforts sind somit objektive Bewertungskriterien notwendig (Objektivierung). Hierzu existieren sowohl genormte Herangehensweisen [9, 10], als auch unzählige weiterführende Forschungsergebnisse und neuartige Ansätze.

Der Anwender der Simulation hat die Aufgabe, die für den jeweiligen Fahrversuch geeigneten Bewertungskriterien auszuwählen und anzuwenden. Da die Bewertungskriterien maßgeblich den nachfolgenden Optimierungsprozess lenken und einzelne Ansätze oft nur unter bestimmten Randbedingungen ausreichende Gültigkeit haben [11], birgt diese Auswahl ein hohes Fehlerpotenzial.

Grundsätzlich ist im weiteren Verlauf die Frage zu beantworten, ob eine Optimierung des Fahrzeugverhaltens nach Normkriterien oder nach alternativen Ansätzen erfolgen bzw. wo der Schwerpunkt gelegt werden soll. In aktuellen Forschungsergebnissen wird immer wieder auf die Defizite in den Bewertungsmethoden der aktuellen Normwerke hingewiesen. Hauptkritikpunkte sind hier z.B. die fehlende Übertragbarkeit der für einachsige Sinusschwingungen bestimmten Gewichtungsfunktionen auf mehrachsige, reale Schwingungen [12] oder die Bewertung von stoßhaltigen Signalen [4].

Die reine Optimierung nach Normkriterien führt zu optimalen Ergebnissen bei späteren Messungen durch kundeneigene Dosimeter, externe Dienstleister oder dergleichen, stellt aber aufgrund der bekannten Normdefizite nicht zwingend das Optimum für die Gesundheit des Fahrers oder dessen subjektive Komfortwahrnehmung dar.

In einer solchen Situation ist es hilfreich, Simulationsergebnisse möglichst automatisiert nach verschiedensten Kriterien bewerten lassen zu können. Damit lässt sich frühzeitig einschätzen, ob sich unterschiedliche Optimalkonfigurationen O_i je nach angewandter Bewertungsmethode BM_i ergeben und wie weit diese voneinander abweichen. Mit dieser Information kann das optimale Verhalten des zu optimierenden Schwingungssystems je nach Firmenphilosophie oder Präferenz zu einem oder anderen Bewertungskriterium zielsicher festgelegt werden. Gleichzeitig ist die Methodik offen für die Implementierung zukünftiger Bewertungsmethoden der Schwingungskomfortobjektivierung. Die angesprochene Firmenphilosophie könnte hierbei z.B. vorgeben, wie die Schwerpunkte zwischen normorientierter und „fahrerzentrierter“ Optimierung mittels weiterführender Verfahren gelegt werden.

Abbildung 5 zeigt ein mögliches Ergebnis einer nach diesem Verfahren durchgeführten Systemoptimierung.

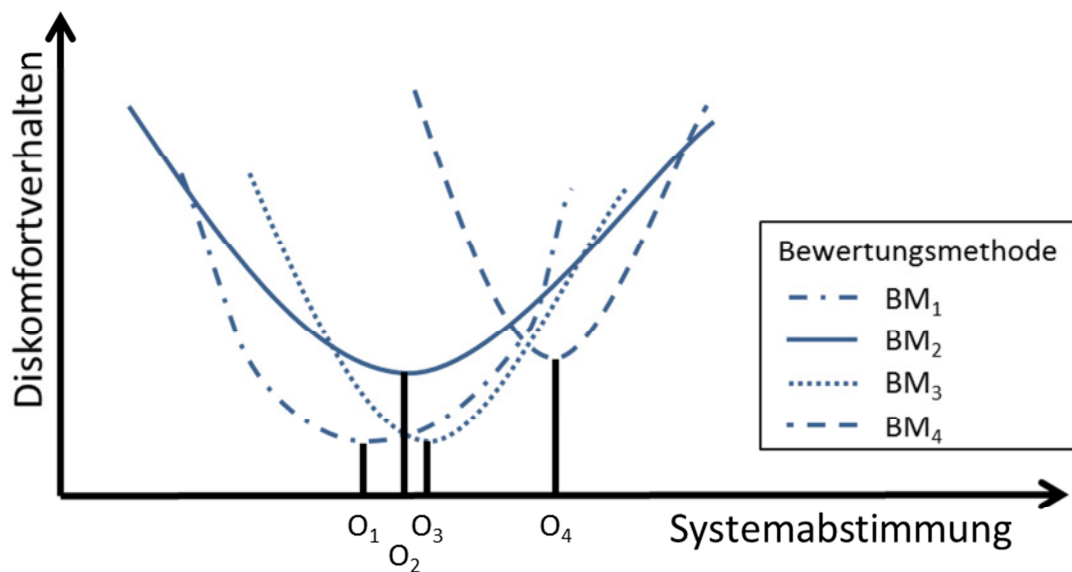


Bild 5: Optimale Systemabstimmungen O_i je nach gewählter Bewertungsmethodik BM_i (qualitative Darstellung)

Zur praktischen Umsetzung wurde die bereits angesprochene Postprocessing-Einheit der Simulationssteuerung geschaffen, welche eine Menge von Simulationsergebnissen (z.B. Sitzbeschleunigungen) automatisiert nach mehreren hinterlegten Bewertungsverfahren (geltende Norm- und weiterführende Verfahren) beurteilt und entsprechende Visualisierungsmöglichkeiten bietet. Ein Assistent zur Durchführung von Parameterstudien hilft bei der Untersuchung der Parametereinflüsse und der Bestimmung der optimalen Konfigurationen. Somit wird der Entwickler in die Lage versetzt, zielgerichtete Optimierungen durchzuführen.

Das im Vergleich zu den Möglichkeiten von typischen Simulationstools stark erweiterte Postprocessing via Matlab wird weiterhin genutzt, die wirksamen Entstehungseffekte aufzuschlüsseln, die zu den beobachteten Verhaltensweisen führen. Das dadurch erhöhte Systemverständnis der Anwender steigert die Effizienz des Entwicklungsprozesses. Beispielhaft werden bei der Fahrt über ein unebenes Gelände die Wank- und Nickmomentanpole und deren Positionsverteilung über der Zeit visualisiert, da sich deren Lage relativ zum Fahrer direkt auf die translatorischen Beschleunigungen am Fahrersitz auswirken.

Eine Möglichkeit zur Umgehung der Notwendigkeit von objektiven Bewertungskriterien bietet die Nutzung von Fahrsimulatoren. Diese erlauben es, reale Fahrer mit virtuellen Fahrzeugen in Verbindung zu bringen, sodass diese analog zum realen Fahrzeug subjektive Bewertungen zum Fahrzeugverhalten abgeben können. Hierdurch ergeben sich interessante Möglich-

keiten, gleichzeitig gehen aber einige der Vorteile der Simulation verloren (Bsp. umfangreiche Parameterstudien, geringer Aufwand der Versuchsdurchführung). Um eine ausreichende Immersion für den Fahrer im Simulator zu erzeugen und somit realistische Bewertungen zu ermöglichen, kann ein erheblicher Aufwand notwendig sein (hohe mechanische Dynamik, evtl. 3D-Sicht, Geräusche). Der Einsatz von Fahrsimulatoren bleibt daher interessant für spezielle Fragestellungen, kann aber weder den klassischen Fahrversuch, noch die Fahrzeugsimulation ersetzen.

6. Potenziale adaptiver Schwingungssysteme in mobilen Arbeitsmaschinen

Wie bereits anhand des Beispiels der Kabinenfederung erläutert, sind besonders mobile Arbeitsmaschinen dadurch geprägt, dass die Bediener in gewissen Abschnitten der Arbeitszyklen auf ein Prozessfeedback angewiesen sind, um sicher und effektiv arbeiten zu können. Dieses Feedback kann beispielsweise die Standsicherheit des Fahrzeugs oder eine Rückmeldung vom Arbeitswerkzeug (z.B. Schaufel) oder den Reifen (Traktionsbewertung) betreffen. Zwar werden nach [13] bis zu 90 % der notwendigen Informationen über den Sehkanal aufgenommen, der Entfall oder eine starke Beeinträchtigung des „gespürten“ Feedbacks ist laut intern durchgeführten Fahrerbefragungen trotzdem nicht tolerierbar.

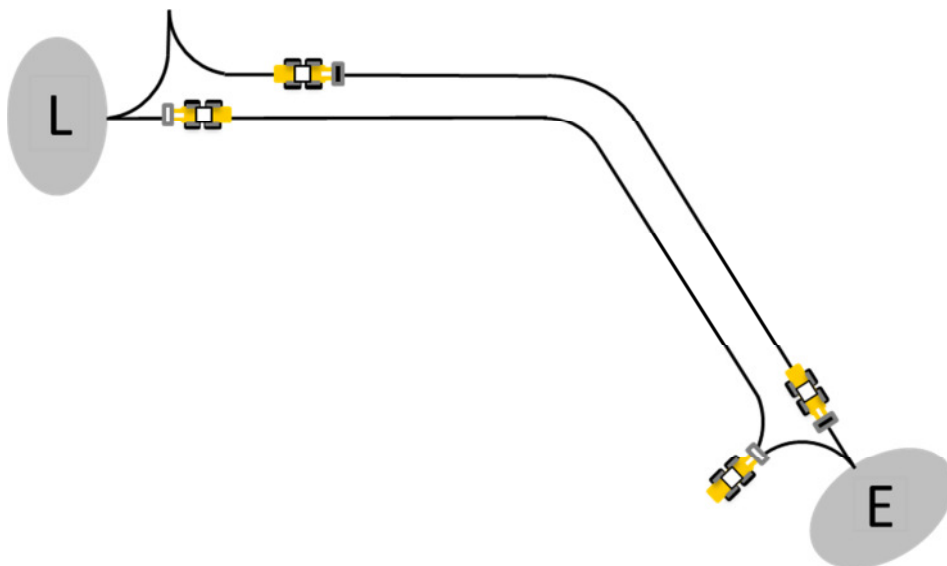


Bild 6: Beispielhafter Radladerzyklus: Ladespiel lang mit Lade- (L) und Entladeposition (E)

Eine starke Entkopplung des Maschinenführers von Schwingungen und Stößen würde somit je nach Fahrzeug und Prozess unterschiedliche starke, negative Auswirkungen auf Produktivität und Sicherheit mit sich bringen. Dies ist eine wichtige Randbedingung bei der Entwicklung von Schwingungssystemen.

Um dies zu verhindern sind komfortrelevante Schwingungssysteme heute weitgehend noch mit passiven Systemen ausgerüstet, deren Abstimmung ein Kompromiss zwischen Isolation und Beibehaltung des geforderten Feedbacks darstellen. Betrachtet man allerdings die Einsatzzyklen der Maschinen genauer, so zeigt sich oftmals, dass dieses Feedback nur in einzelnen Abschnitten der zyklischen Prozesse notwendig ist. Somit besteht Potenzial zur Verringerung der Fahrerbelastung darin, die Isolation in Zeitabschnitten mit geringem Feedbackbedarf zu erhöhen und somit den Zielkonflikt situationsabhängig aufzulösen.

Durch die automatisierte Simulationssteuerung, welche es ermöglicht vordefinierte Fahrmanöver zu absolvieren und die entsprechenden Ergebnisse zu verarbeiten, besteht die Möglichkeit, das Fahrzeugverhalten je nach Fahrsituation auf bestimmte Zielvorgaben hin virtuell zu optimieren. Somit wird die Vorarbeit zur Auslegung von adaptiven Schwingungssystemen wirksam unterstützt. Da adaptive Systeme oftmals mit gesteigertem Kostenaufwand einhergehen, können mittels der Potenzialabschätzungen aus der Gesamtfahrzeugsimulation sichere Entwicklungsentscheidungen getroffen werden.

7. Zukunft der Komfortsimulation mobiler Arbeitsmaschinen

Mit Sicherheit wird der Simulation im Allgemeinen ein immer höherer Stellenwert in der Entwicklung von mobilen Arbeitsmaschinen zukommen. Besonders im Bereich der Komfortsysteme stellt die Schnittstelle zum Menschen und damit zum Nichttechnischen eine besondere Herausforderung für die Entwickler technischer Systeme dar.

Hierbei sind OEMs und Zulieferer auf möglichst realistische und gleichzeitig beherrschbare Bewertungsverfahren im Bereich der Komfortobjektivierung angewiesen. Realistisch in dem Sinne, dass sich die Verfahren möglichst nah am realen Empfinden und den Schädigungsmechanismen des menschlichen Körpers orientieren, sodass eine Optimierung nach dem Stand der Technik einer fahrerzentrierten Optimierung möglichst nahe kommt. Beispiele wie die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs von PKW anhand von praxisfernen Testzyklen (NEFZ) sollten im Sinne aller Beteiligten vermieden werden, da hiermit die Hersteller gezwungen wären, am eigentlichen Kundenbedürfnis vorbei zu entwickeln. Die Einbeziehung neuartiger Ansätze beispielsweise zur Adressierung der Stoßhaltigkeit von Signalen in aktuelle Normentwürfe wie der DIN SPEC 45697 zeigen bereits, dass der richtige Weg beschritten wird.

Die objektive Bewertung des erwähnten Prozess-Feedbacks über den Sinn des Spürens bedarf weiterer Untersuchungen. Zwar können in Fahrerbefragungen generelle Randbedingungen an Schwingungssysteme herausgearbeitet werden, allerdings fehlt es noch an Möglichkeiten zu deren Quantifizierung.

Eine Chance zur Steigerung der Effizienz in der Entwicklung von mobilen Arbeitsmaschinen wird in der unternehmensübergreifenden Simulation gesehen, da speziell diese Branche durch enge Zusammenarbeit zwischen Lieferanten und OEMs geprägt ist [14].

Ist ein Lieferant in der Lage, validierte Modelle beispielsweise von Schwingungskomponenten oder -systemen wie Fahrersitzen, Elastomerlagerelementen usw. anzubieten, so kann eine zielgerichtete, gemeinschaftliche Optimierung und Abstimmung bereits in frühen Entwicklungsstadien erfolgen. Dies führt zu ausgereifteren Produkten auf Seiten der Hersteller und der Lieferanten und einer sinkenden Anzahl von notwendigen Entwicklungsschleifen (Zeit, Kosten). Besonderes Augenmerk muss dem Know-How-Schutz der einzelnen Partner bei der unternehmensübergreifenden Simulation zukommen. Beispielhaft zeigen das „Functional Mock-up Interface“ (FMI) [15] oder das BMBF-geförderte Forschungsprojekt GUSMA [14] einige Wege zur Lösung dieses Problems auf.

8. Zusammenfassung

Es wurde eine ganzheitliche Vorgehensweise zur Entwicklung und Optimierung von komfortrelevanten Schwingungssystemen an mobilen Arbeitsmaschinen vorgestellt. Mittels Gesamtfahrzeugmodellen in Kombination mit modernen Reifenmodellierungsmethoden besteht heute die Möglichkeit, Schwingungskomfortverhalten von mobilen Arbeitsmaschinen in typischen Fahrsituationen realistisch abzubilden. In Verknüpfung mit einer automatisierten Simulationssteuerung und einer weitreichenden Postprocessinglösung können definierte Fahrversuche mit einem Fahrzeugmodell durchfahren und die Ergebnisse entsprechend verschiedenster, implementierter Methoden verarbeitet und visualisiert werden. Entwicklung und virtuelle Abstimmungsarbeiten von komfortrelevanten Schwingungssystemen können somit zielsicher und effizient erfolgen. Dies spart Entwicklungszeit und -kosten und führt im Weiteren zu ausgereifteren Prototypen für eine endgültige subjektive Bewertung.

Der Fokus liegt dabei darin, dem Entwickler während den Abstimmungsarbeiten einen möglichst breiten Einblick in das gesamte Fahrzeugverhalten (Schwingungskomfort, Fahrdynamik) zu gewähren, sodass die Auswirkungen von Änderungen ganzheitlich bewertet werden

können. Die gesamte Herangehensweise ist dabei offen für die Implementierung von zukünftigen Erkenntnissen und Methoden der Schwingungskomfortobjektivierung.

- [1] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutz-Verordnung - Ausgabe Januar 2010
- [2] Dupuis, H., Hartung, E., Louda, L.: Vergleich regelloser Schwingungen eines begrenzten Frequenzbereichs mit sinusförmigen Schwingungen hinsichtlich der Einwirkung auf den Menschen, *Ergonomics* 15, 1972, S. 237 – 265
- [3] Tausch, W. - Best Seating Systems: Optimierung des Fahrzeuges bezüglich Richtlinie 2002/44/EG Ganzkörpervibration unter besonderer Berücksichtigung von Fahrersitzen
- [4] Mohr, D.: Eine einfache Methode zur Beurteilung stoßhaltiger Ganzkörper-Schwingungen, VDI Berichte Nr. 1821, 2004
- [5] DIN EN 13510 - Erdbaumaschinen - Überrollschutzaufbauten, Prüfungen und Anforderungen
- [6] ISO 3471 - Erdbaumaschinen – Überrollschutzaufbauten, Prüfungen und Anforderungen
- [7] Modelica Language Specification Version 3.3, Mai 2012, <https://www.modelica.org>
- [8] Bös, M.: Teilsystem- und Gesamtfahrzeugsimulation mobiler Arbeitsmaschinen mit SimulationX - 15. ITI-Symposium Dresden - Nov. 2012
- [9] VDI 2057-1 - Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen
- [10] ISO 2631-1 - Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body-vibration
- [11] Dickey J. et al: Multi-axis sinusoidal whole body vibrations: Relationship between vibration total value and discomfort varies between vibration axes, *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 2007, S. 195 - 204
- [12] Knauer P.: Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahnanregung, Dissertation, München 2010
- [13] Hoske P. et al: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen, Wissensportal baumaschine.de, Ausgabe 2/2010
- [14] Rüdener, A., Han, S., Geimer, M.: Cross-company development of virtual mobile machines using a standardized co-simulation, Tagungsband LAND.TECHNIK 2011, S. 123 - 128
- [15] Blochwitz T. et al: Functional Mockup Interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models, 9th International Modelica Conference 2012