

# Einsatz moderner Entwicklungs- und Simulationsmethoden für einen sicheren und praxisgerechten Fahrerarbeitsplatz

Prof. Dr.-Ing. Jan Scholten, Geschäftsführer der IBAF – Institut für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik GmbH, Leiter der Arbeitsgruppe Baumaschinentechnik der Ruhr-Universität Bochum

Der sicherheits- und praxisgerechten Gestaltung von Fahrerarbeitsplätzen kommt im Rahmen der Entwicklung moderner Baumaschinen eine besondere Bedeutung zu. Beispielsweise ist der Maschinenführer in vielen Fällen durch einen Überrollschutz, eine Roll Over Protective Structure (ROPS), vor Verletzungen bei einem potentiellen Umkippen der Maschine zu schützen. Unter bestimmten Einsatzbedingungen ist darüber hinaus der Schutz vor herabfallenden Gegenständen durch eine Falling Object Protective Structure (FOPS) sicher zu stellen. Derartige Strukturen können als zusätzliche Schutzaufbauten ausgeführt oder direkt in die Kabinenstruktur integriert werden. Allerdings können Rahmenstrukturen und Verkleidungselemente, wie auch die restliche Maschinenstruktur und Arbeitsausrüstungen die Sicht des Maschinenführers einschränken. Entsprechend ist das verbleibende Sichtfeld im Umfeld der Maschine und in deren Nahfeld zu ermitteln und mit entsprechenden Sollvorgaben abzugleichen, um einen sicheren Betrieb der Maschine zu gewährleisten. Weniger aus Sicht der Sicherheit, als vielmehr aus Sicht des Arbeits- bzw. Gesundheitsschutzes, sind die auf den Maschinenbediener einwirkenden Humanschwingungen unterhalb zulässiger Grenzwerte zu halten oder die Expositionsdauer entsprechend einzuschränken. Gleiches gilt für die Geräuscheinwirkung im Bereich des Fahrerkopfes. Hinzu kommen Anforderungen aus Sicht des Komforts und der Ergonomie sowie zunehmend Designaspekte.

Aus der Vielfalt der Anforderungen und den sich ergebenden Wechselwirkungen resultiert ein hoher Anspruch an die Entwicklung von Kabinen und Fahrerständen. Das IBAF – Institut für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik stellt sich als Entwicklungspartner der Baumaschinenbranche den damit verbundenen Herausforderungen und bringt moderne Simulations- und Optimierungsmethoden in die Entwicklungsprozesse ein. Im Sinne der Maschinenhersteller sind hierdurch Entwicklungszeiten und -kosten zu reduzieren und gleichzeitig die, im Sinne der Maschinenführer relevanten, komplexen Anforderungen an einen sicheren und praxisgerechten Arbeitsplatz zu erfüllen.

An Praxisbeispielen werden

- strukturelle Ansätze zur entwicklungsbegleitenden Bewertung der ROPS- und FOPS-Sicherheit,
- ein speziell für Baumaschinen entwickeltes halbautomatisches Sichtfeldmessgerät sowie
- die Möglichkeiten der messtechnischen und simulationsgestützten vibroakustischen Bewertung und Optimierung von Kabinen und offenen Fahrerständen vorgestellt.

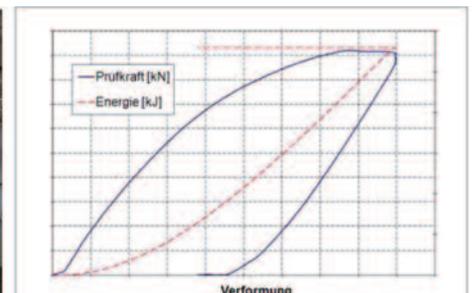


Bild 1: ROPS-Prüfaufbau mit seitlicher und in Längsrichtung orientierter Prüflasteinleitung, exemplarischer Verlauf der Kraft-Verformungsfunktion und der aufgenommenen Verformungsenergie bei seitlicher Belastung

## Strukturmechanische Ansätze zur entwicklungsbegleitenden Bewertung der ROPS- und FOPS-Sicherheit

### Motivation und Zielstellung

Die Roll Over Protective Structure (ROPS) dient als Schutzaufbau und damit als passive Maßnahme zum Schutz des Bedieners vor Verletzungen beim Auftreten von Sonderereignissen, wie dem Umkippen der Maschine. Die Struktur muss hierfür den Anforderungen entsprechender Norm- und Regelwerke (ISO 3471, ISO 12117-2) genügen. Zusätzlich kann eine Falling Object Protective Structure (FOPS) den Bediener bei entsprechenden Einsatzbedingungen vor herabfallenden Gegenständen schützen (ISO 3449).

Zum Nachweis werden die Schutzaufbauten einem zerstörenden Test unterzogen. Kann der Nachweis nicht erbracht werden, sind zeit- und kostenintensive Anpassungen der Struktur und eine Wiederholung des Tests erforderlich. Nicht selten führt die konstruktive Anpassung von Teilbereichen der Struktur zu einem soweit geänderten Verformungsverhalten, dass der erneute Test andere kritische Bereiche hervorbringt und ein aufwändiger iterativer Anpassungsprozess die Folge ist.

Vor dem dargestellten Hintergrund begleitet IBAF den Entwicklungsprozess von Maschinen- und Kabinenherstellern durch FE-basierte Vorabsimulationen der Kabinenstrukturen, welche an die realen ROPS/FOPS-Prüfbedingungen und Abläufe angelehnt sind. Ziel ist es, den ggf. erforderlichen iterativen Anpassungsprozess in die Phase der virtuellen Produktentwicklung zu verlagern, bevor Hardware- und Prüfkosten entstehen. Die gewählte Modellierungs- und Simulationsstrategie auf Basis der Finiten Elemente muss hierbei den Anforderungen an einen entwicklungsbegleitenden Einsatz gerecht werden. So wird auf im Rahmen der Entwurfs- und Konstruktionsphase vorhandenen Geometriemodellen aufgebaut, realisierte Rechenzeiten orientieren sich an den für FE-Simulationen komplexerer Strukturen üblichen Zeiten.

### Prüfbedingungen – Beispiel ROPS

Die ROPS-Prüfbedingungen sehen eine aufeinander folgende quasistatische Lasteinleitung im Bereich der oberen Träger der Struktur in seitliche, vertikale und Längsrichtung vor. Nach Aufbringen jeder einzelnen Lastrichtung erfolgt eine Entlastung. Die Lasthöhe wird in Abhängigkeit der Maschineneigenmasse fest-

gelegt. Zur Lasteinleitung wird eine Lastverteilungseinrichtung (LDD) eingesetzt, um ein örtliches Eindringen der lastaufbringenden Elemente in die tragenden ROPS-Bauteile zu verhindern. Gleichzeitig muss diese Einrichtung die Verdrehung der ROPS zulassen (Bild 1).

Während der Belastung der Struktur werden die eingeleiteten Kräfte und die Verformungen in Krafrichtung aufgezeichnet. Die Belastungen sind so lange zu steigern, bis festgelegte Anforderungen bzgl. Belastungs- und/oder Energieaufnahme erfüllt sind. Verformungen der ROPS-Befestigung und des Maschinenrahmens dürfen bei der resultierenden Gesamtverformung berücksichtigt werden.

Die gem. Norm vorgegebenen spezifischen Belastungskräfte bzw. Belastungsenergien müssen getrennt voneinander erreicht oder übertroffen werden. In keiner Phase der Prüfung dürfen Teile der ROPS in den festgelegten Verformungsgrenzbereich (Deflection Limiting Volume – DLV, vgl. auch Bild 1) eindringen, damit keine verformten Aufbauteile den Bediener verletzen können. Darüber hinaus darf sich der Schutzaufbau während der Prüfung nicht vom Maschinenrahmen ablösen.

### Modellierungs- und Simulationsstrategie

Im Rahmen einer FE-gestützten Simulation der ROPS-Prüfung ist das Verformungsverhalten der Struktur unter Berücksichtigung der skizzierten Prüfbedingungen zu bewerten. Hierzu wird aus einem vorhandenen 3D CAD-Modell zunächst ein Mittelflächenmodell abgeleitet und gem. Bild 2 mit Schalenelementen vernetzt.

Soweit möglich werden alle Konstruktionselemente innerhalb des Modells monolithisch verbunden. Eine vom Kabinenkonzept abhängige Ausnahme können beispielsweise Verschraubungen zwischen Kabinen- und Bodenstruktur darstellen, die durch vorgespannte Ersatzstäbe und Kontaktelemente zwischen den Teilstrukturen berücksichtigt werden.

Sofern elastische Kabinenlager vorhanden sind, werden diese durch Ersatzfedern mit entsprechender richtungsabhängiger, nichtlinearer Steifigkeit abgebildet. Dabei wird durch Annahmen progressiver Kennlinien berücksichtigt, dass die meist herstellerseitig vorgegebenen Steifigkeitswerte lineares Verhalten im eigentlichen Betriebsarbeitsbereich voraussetzen, dieser Bereich allerdings bei der ROPS-Simulation überschritten wird.

Das Modell wird im Bereich der Anbindungspunkte zur Oberwagenstruktur gelagert. Die Lasteinleitung erfolgt im Bereich der Lastverteilungseinrichtungen über mehrere Knotenreihen. Die von der Norm vorgegebene Belastungsreihenfolge wird berücksichtigt.

ROPS-Berechnungen sind nichtlinear:

- Berücksichtigung großer Verformungen (kinematische Nichtlinearität),
- Betrachtung des Gleichgewichtes am verformten System (statische Nichtlinearität),
- Ansatz elastisch-plastischen (im ersten Ansatz meist bilinearen) Materialverhaltens.

Während der Belastungsaufbringung in der Realität ggf. auftretendes lokales Beulen wird berücksichtigt. Unter Umständen sind ROPS-Berechnungen nicht ohne Unterbrechung durchführbar, da aufgrund der Komplexität des Systems nicht alle Grenzzustände, wie z.B. lokale Rissbildung, im Modell enthalten sein können. Weiterhin können sehr große Verformungen zu großen Elementverzerrungen führen und damit eine lokale Neuvernetzung erfordern.

Beim Aufbringen der gesamten Belastungsfolge werden unter anderem die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Nach dem Entlasten und vor dem Aufbringen einer neuen Belastungsrichtung erfolgt eine Übertragung der Knotenverschiebungen der verformten Geometrie auf eine neue unverzerrte Ausgangskonfiguration der Vernetzung. Aufgrund der üblichen isotropen (dehnungsrichtungsunabhängigen) Verfestigungsannahme ist dies zulässig. Lediglich die nach der Entlastung der plastifizierten Struktur verbleibenden Eigenspannungen werden so bei der erneuten Belastung vernachlässigt.
- Für die Abschätzung der plastischen Gesamtdehnung aufgrund der kumulierten Belastung wird die plastische von Mises-Dehnung der einzelnen Belastungsrichtungen additiv überlagert, was eine konservative Annahme darstellt.
- Ggf. kann es erforderlich sein, Elemente mit plastischer Gesamtdehnung oberhalb der Bruchdehnung in geeigneter Weise inaktiv zu setzen, wodurch unter anderem erreicht wird, dass gebeulte, aber auch andere stark plastifizierende Bereiche für die nachfolgende Belastung nicht mehr am Tragverhalten beteiligt sind.

Bild 2 zeigt als exemplarisches Teilergebnis der ROPS-Simulation die verformte Kabinenstruktur nach Aufbringung der seitlichen Prüflast. Insgesamt konnte, ausgehend von dem ersten Kabinenentwurf nach Anpassung von Blechstärken und Wanddicken einzelner Holme, das Erreichen der vorgeschriebenen Belastungs- und Energiegrenzwerte rechnerisch nachgewiesen und zudem gezeigt werden, dass die verformte Struktur nicht in den Verformungsgrenzbereich eindringt. Die anschließende ROPS-Prüfung gem. Bild 1 bestätigte dieses Ergebnis, sodass die Prüfanforderungen mit dem ersten Prototypen der Kabine erfüllt werden konnten. Gleiches gilt für den rechnerischen und experimentellen FOPS-Nachweis gem. Bild 3.

## Bewertung des Sichtfeldes mit Hilfe eines halbautomatischen Sichtfeldmessgerätes

### Motivation und Zielstellung

Eine ausreichende Sicht des Maschinenführers ist Grundvoraussetzung für das sichere Bedienen einer Baumaschine. Sie hilft, Gefahren für den Maschinenführer selbst und insbesondere sein Umfeld, zu reduzieren, sowohl beim Fahren der Maschine als auch während des Arbeitsprozesses.

Die Bewertung des Sichtfeldes erfolgt bei Erdbaumaschinen im Wesentlichen gem. den Vorgaben der ISO 5006:2006 „Erdbaumaschinen – Sichtfeld“ [1] und bedient sich einer rein manuellen Testmethode. Aufgrund der Relevanz der Sichtfeldbewertung und zur zielgerichteten Unterstützung der Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse moderner Kabinen hat die BG Bau, begleitet durch IBAF und gemeinsam mit dessen Schwesterunternehmen, der IAMT Prüfsysteme GmbH, ein neues halbautomatisches Sichtfeldmessgerät entwickelt [2].

### Messbedingungen und Anforderungen

Die gem. Norm vorgegebene Testmethode basiert auf dem „Schattenriss“. Dabei werden zwei horizontal verschiebbare Lichtquellen an definierten Augpositionen im Bereich des Bewegungsbereiches des Bedienerkopfes installiert. Bezogen auf die Aufstellfläche der Maschine werfen von diesen Positionen beleuchtete, sicht-



Bild 2: Schalenmodell der von IBAF für ein Untertagefahrzeug entwickelten Kabinenstruktur (vgl. Bild 1), verformte Struktur nach seitlicher Lastaufbringung mit Darstellung der von Mises-Dehnung

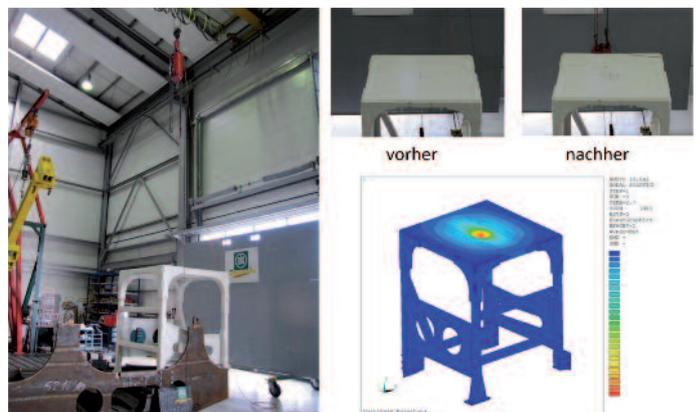


Bild 3: FOPS-Prüfaufbau mit Fallgewicht, Dachstruktur vor und nach der Prüfung, verformte FE-Struktur nach Einwirkung einer statisch äquivalenten vertikalen Ersatzlast

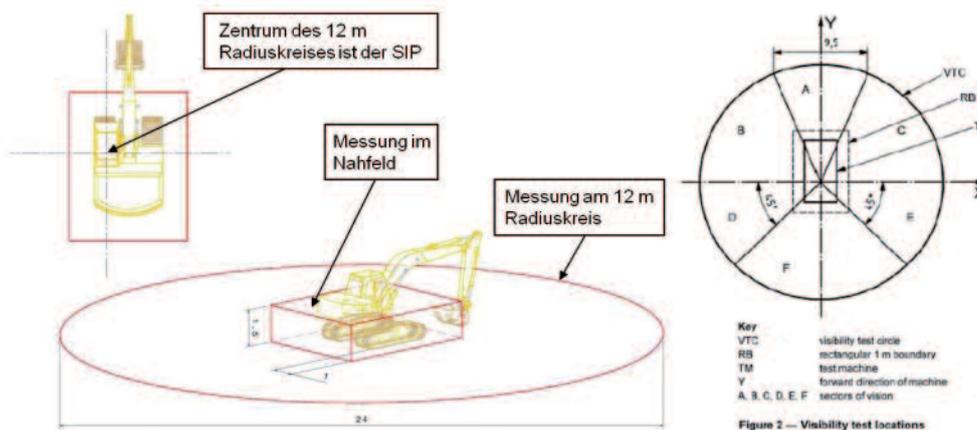


Bild 4: Testanordnung für die Sichtfeldbewertung; links: Sichtkreis und Nahfeld; rechts: Sektorenaufteilung des Sichtkreises nach ISO 5006:2006 [1].

verdeckende Bauteile und Strukturbereiche Schatten. Personen, Fahrzeuge oder Gegenstände, die sich im Bereich der Fahr- und Arbeitsfläche befinden können, dürfen dabei aus Sicherheitsgründen nicht vollständig verdeckt werden [3]. Das in der Maschinenumgebung zu bewertende Sichtfeld (vgl. Bild 4) wird durch einen Sichtkreis um den Sitz-Index-Punkt (SIP) mit vorgegebenem Radius begrenzt. Es entspricht dem Aktionsfeld der Maschine, in dem Gefahrensituationen auftreten. Für die Sichtfeldbewertung werden die einzelnen Sehnenlängen beschatteter bzw. verdeckter Bögen des Sichtkreises innerhalb definierter Sichtkreissektoren gem. Bild 4 ermittelt. Diese Sehnenlängen dürfen jeweils eine maschinentypabhängig festgelegte Anzahl und Größe nicht überschreiten. Darüber hinaus fordert die Norm, dass Personen im Nahfeld rings um die Maschine (1m Abstand) gesehen werden können.

#### Entwicklung eines halbautomatischen Sichtfeldmessgerätes

Mit dem neu entwickelten Sichtfeldmessgerät, einem halbautomatischen Roboter gem. Bild 5, kann das Sichtfeld einer Erdbaumaschine durch eine einzelne Person und ohne zusätzliche äußere Hilfsmittel vermessen werden. Das in der Norm beschriebene Messverfahren für die Messung in der Maschinenumgebung sowie im Nahfeld der Maschine wird vollständig und ohne Einschränkungen abgebildet, die Ergebnisse werden in einem standardisierten Messprotokoll dokumentiert. Es wird geprüft, ob die in der Norm festgelegten Anforderungen für den jeweiligen Maschinentyp erfüllt werden. Die Messergebnisse werden anhand von Fotos so aufbereitet, dass für den Konstrukteur anschaulich darstellbar die Abweichungen und möglichen Verbesserungen aufgezeigt werden. Anders, als in der Norm beschrieben, kann die Messung komplett aus der Kabine heraus erfolgen. An Stelle der Lampen wird ein Kamerasystem an einer Vorrichtung an dem auf dem Sitz genau positionierten Roboter installiert. Das Kamerasystem ist stufenlos horizontal verschiebbar und kann im Neigungswinkel in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp eingestellt werden. Die Vorrichtung selbst ist um die Vertikalachse drehbar (360°) ausgeführt. Die drei Verstellbewegungen Verschieben, Drehen und Neigen werden elektromotorisch realisiert. Die angefahr-

renen Winkel und Augenabstände werden automatisch erfasst und abgespeichert, damit sie für Auswertungszwecke zur Verfügung stehen. Die Basis für die Steuer- und Auswertesoftware bildet eine Datenbank, in der fahrzeugspezifische Daten, wie z.B. Länge, Breite, Höhe, Gewicht und charakteristische Daten für die Prüfung (Mittelpunkt und Radius des Kreises, Sektorgrenzen, usw.) hinterlegt sind. Zur Auswertung und Vermessung der Verdeckungen werden aufgenommene Einzelbilder durch eine automatische Stitchingfunktion zu einem 360°-Panoramabild gem. Bild 5 zusammengefasst. Durch Projektion der Referenzlinien für Kreis, Nahfeld und Sektoren in das Panoramabild werden Bezugspunkte festgelegt, auf deren Basis die entstandenen Verdeckungen im jeweiligen Sektor grob markiert werden können. Die Markierungen werden genutzt, um in einem zweiten Schritt Einzelbilder der einzelnen Verdeckungen aufzunehmen. Schließlich werden die Größen der Verdeckungen sektorweise mit den in der Datenbank hinterlegten zulässigen Werten verglichen.

### Messtechnische und simulationsgestützte vibroakustische Bewertung und Optimierung von Kabinen und offenen Fahrerständen

#### Motivation und Zielstellung

Beim Betrieb mobiler Arbeitsmaschinen sind die Bediener zwangsläufig Belastungen durch Vibrationen und Schall ausgesetzt. Vor diesem Hintergrund legen Richtlinien zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkung durch Vibrationen bzw. Lärm, wie die EU-Richtlinien 2002/44/EG bzw. 2003/10/EG, Expositionsgrenzwerte fest und definieren Auslösewerte. Bei deren Überschreitung sind Maßnahmen zur Lärm- bzw. Vibrationsreduzierung einzuleiten. Expositionsgrenzwerte und Auslösewerte sind durch Messungen am Arbeitsplatz zu überprüfen. Folglich muss zumindest der Prototyp einer Maschine vorhanden sein.

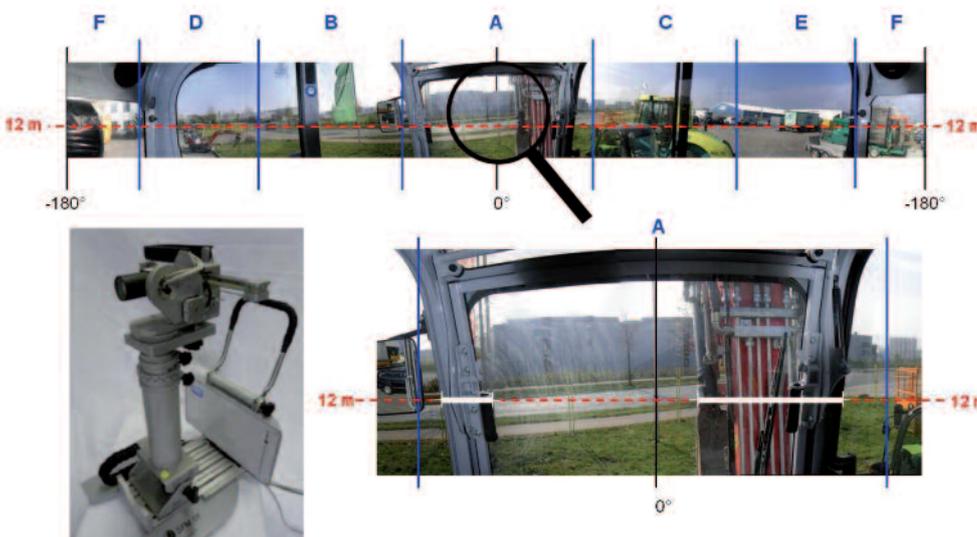


Bild 5: Sichtfeldmessroboter, Panoramabild mit projiziertem 12 m-Kreis und Einzelbild mit markierten Verdeckungen. [Quelle: BG Bau und IAMT Prüfsysteme]

IBAF bringt in diesem Zusammenhang, beispielsweise durch den Einsatz von mit Laserscannern gekoppelten akustischen Kameras, neue messtechnisch gestützte Methoden zur Anwendung. Diese dienen weniger der Überprüfung der Grenzwerte, sondern vielmehr der Identifikation relevanter Erreger und Übertragungswege und unterstützen damit die Weiterentwicklung und Optimierung der Maschinen und Kabinen.

Vergleichbar mit den oben beschriebenen strukturellen Ansätzen zur entwicklungsbegleitenden Bewertung der ROPS- und FOPS-Sicherheit unterstützt IBAF darüber hinaus die frühen Phasen der Entwicklung auch im Bereich der Akustik durch begleitende Simulationen. Je früher und je detaillierter das akustische Systemverhalten im Entwicklungsprozess Berücksichtigung findet, desto effizienter können maßgeschneiderte Konzepte und Maßnahmen zur Lärmreduzierung entwickelt werden. Im Ergebnis werden auf dieser Basis Entwicklungszeiten und -kosten reduziert und im Sinne der Anwender anforderungsgerechte, praxistaugliche Lösungen geschaffen.

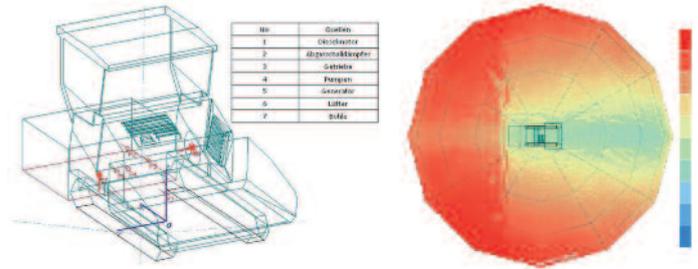
**Neue Mess- und Simulationsmethoden im Bereich der Akustik**

Am Beispiel eines offenen Fahrerstandes wird die Leistungsfähigkeit innovativer akustischer Mess- und Simulationsmethoden unter Verwendung von akustischen Kameras und 3D-Laserscannern sowie auf Basis simulationsgestützter Lärmprognosen skizziert [4].

In der Praxis werden zur Ermittlung des akustischen Istzustandes am Fahrerstand Schalldruckmessungen im Bereich des Fahrerkopfes (rechtes bzw. linkes Ohr, Positionierung in Anlehnung an Normvorgaben) mit Einzelmikrofonen durchgeführt. Im Ergebnis liegen für den betrachteten Betriebszustand Summenschalldruckpegel an den Messpunkten vor, ggf. können ergänzend die zugehörigen Frequenzspektren analysiert werden. Die Identifikation relevanter Schallquellen und Schallübertragungswege gelingt auf diesem Weg im Regelfall nicht. Akustische Kameras hingegen ermöglichen die detaillierte Visualisierung und Lokalisierung von Schallemissionen durch Messungen mit Mikrofonarrays [5]. Dabei können selbst komplexeste Systeme mit verteilten Einzelschallquellen bei instationärer Betriebsweise analysiert werden. Weitergehende Möglichkeiten ergeben sich durch die Kopplung der Kamerasysteme mit einem 3D-Laserscanner zur Erfassung der dreidimensionalen Kontur der Strukturen, wie beispielsweise einem Fahrerstand. Die mit der Kamera messtechnisch erfassten Emissionen können so exakt den schallemittierenden Komponenten und Strukturbereichen zugeordnet werden. Auch akustische Randbedingungen, die beispielsweise zu Reflexionen führen, werden erfasst.

Bild 6 zeigt am Beispiel eines Straßenfertigers Messungen mit einem 3D-Laserscanner und einer akustischen Kamera (Kugelarray mit 48 Mikrofonen) im Bereich des Fahrerkopfes. Gem. dem sich ergebenden akustischen Bild sind wesentliche auf den Fahrer einwirkende Immissionsanteile auf Emissionen des Antriebsstranges, die durch den Bodenbereich und die Vorderwand des Fahrerstandes zum Fahrerohr übertragen werden, zurückzuführen. Würden bei dieser Maschine Grenzwerte überschritten oder würde der Hersteller im Sinne einer Produktoptimierung eine weitere Reduktion der auf den Bediener einwirkenden Geräusche anstreben, müssten entsprechende Maßnahmen an dieser Stelle ansetzen.

Simulationsmodelle zur Lärmprognose bilden die einzelnen Schallquellen und die Maschinenstruktur mit ihren spezifischen akustischen Eigenschaften gem. Bild 7 auf Basis von 3D-CAD-Modellen ab [4]. Die hierauf aufbauenden Berechnungen der abgestrahlten Schallfelder können bereits in der Planungs- oder Entwicklungsphase einen Beitrag zum akustischen Systemverständnis liefern. Durch



**Bild 7: Modell zur akustischen Simulation einer Gesamtmaschine und Emissionsplot in der Draufsicht als Grundlage zur Abschätzung der Immission im Bereich des Fahrerstandes**

Variantenberechnungen werden somit in einer frühen Phase die Auswahl und Detailgestaltung von Konzepten zur akustischen Optimierung, die Festlegung des Maschinenlayouts im Sinne der Anordnung von akustisch relevanten Komponenten, die Bewertung der Wirksamkeit von z.B. Trennwänden, Hauben oder Verkleidungen sowie die Auswahl und Gestaltung von Schalldämpfern und Dämmsystemen unterstützt.

Für das konkrete Beispiel eines Straßenfertigers gem. Bild 7 wurden der Dieselmotor, das Pumpenverteilergetriebe, die Hydraulikpumpen sowie der vor dem Fahrerstand angeordnete Abgaschalldämpfer als Punktschallquellen berücksichtigt. Für die Bohle wurden mehrere verteilte Punktschallquellen nebeneinander angeordnet. Der Schalldämpfer und die Bohle werden als offene Schallquelle betrachtet. Mehrere bzgl. ihrer akustischen Eigenschaften geeignete parametrisierte Wände bilden z.B. die Abschottung des Fahrerstandes oder die Einhausung des Motorraums unter Berücksichtigung der seitlichen Öffnungen für die Luftkühlung ab. Über die im Bild exemplarisch in der Draufsicht gezeigte, simulierte Schalldruckverteilung im Umfeld der Maschine hinaus können Schalldruckpegel und die dazugehörigen Frequenzspektren in jedem anderen interessierenden Raumpunkt ausgewertet werden. Auf diesem Weg gelingt auch eine erste Abschätzung und Charakterisierung der am Fahrerohr zu erwartenden Immissionen.

Im Falle geschlossener Kabinen ist auf Basis des skizzierten Vorgehens das auf die Kabine einfallende Luftschallfeld abzuschätzen. Mit dieser Kenntnis sind die akustischen Anforderungen an eine neu zu entwickelnde oder zu optimierende Kabine deutlich besser zu fixieren, als dies üblicherweise der Fall ist. Alternativ kann das einfallende Luftschallfeld an bestehenden Maschinen messtechnisch erfasst werden. Hierzu werden die Begrenzungsflächen des für die Kabine zur Verfügung stehenden Bauraums festgelegt und auf diesen Messpunkte für Schalldruckmessungen definiert. Bild 8 zeigt exemplarische Messergebnisse für unterschiedliche Betriebszustände einer mobilen Maschine. An jedem Messpunkt sind die betriebszustandsabhängigen Frequenzspektren bekannt. Ausgehend von derartigen Ergebnissen wird für den Entwickler oder Konstrukteur ersichtlich, welchen Bereichen der Kabine aus akustischer Sicht generell besondere Bedeutung zukommt und welche Frequenzen die Immissionen dominieren. Auf dieser Basis können geeignete konstruktive und werkstofftechnische Konzepte erarbeitet werden, um eine geräuschoptimierte Kabine zu entwickeln.

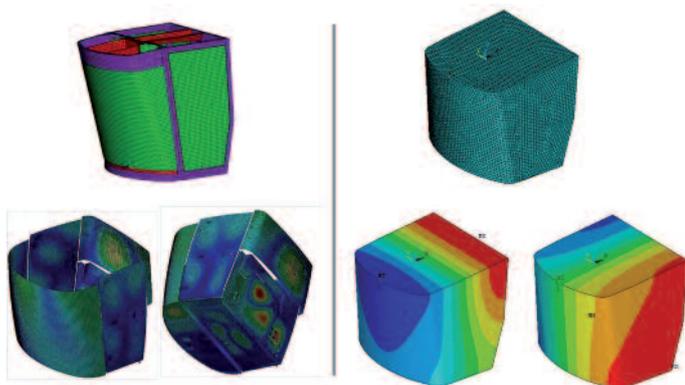
Neben der Luftschallbeaufschlagung der Kabine ist die Körperschallanregung über die im Regelfall elastisch ausgeführte Kabinenlagerung zu berücksichtigen. Hier kommt der Abstimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes der Kabinenlager auf die maschinenseitig zu erwartenden Anregungsfrequenzen eine besondere Bedeutung zu. Da eine vollständige Entkopplung in der Regel nicht gelingt, ist sicher zu stellen, dass keine akustisch relevanten Eigenfrequenzen und Eigenformen der Kabinenstruktur angeregt werden. Eine FE-gestützte Modalanalyse der Struktur ist dabei aufgrund der zu erwartenden Eigenfrequenzdichte im akustisch relevanten Anregungsfrequenzbereich im Allgemeinen nicht zielführend.



**Bild 8: Exemplarische Messergebnisse zur Charakterisierung des auf den Bauraum einer neu zu entwickelnden Kabine einfallenden Schallfeldes für unterschiedliche Betriebszustände**



**Bild 6: Messungen der Geräuschimmission im Bereich des Fahrerkopfes mit einer akustischen Kamera, Immissionsplot zur Schallquellenlokalisierung**



**Bild 9: Vibroakustische Simulation; links: FE-Strukturmodell einer Kabine mit Teilergebnissen einer Körperschallanalyse zur Identifikation akustisch relevanter Strukturbereiche; rechts: FE-Modell mit Ergebnissen einer Modalanalyse zur Identifikation akustischer Eigenformen des eingeschlossenen Luftvolumens**

IBAF führt daher für die Kabinenstrukturen FE-gestützte Körperschallanalysen in den aufgrund der zu erwartenden Anregungen relevanten Frequenzbereichen durch. Ergebnisse derartiger Analysen sind frequenzabhängige relative Körperschallmaße für die einzelnen Strukturbereiche der Kabine. Auf dieser Basis sind akustisch relevante Strukturbereiche zu identifizieren und ggf. erforderliche konstruktive Modifikationen, wie Rippen, Sicken, Blechstärken- oder Materialänderungen etc. vergleichend zu bewerten. Bild 9 zeigt als ein exemplarisches Teilergebnis einer Körperschallanalyse die akustisch relevante Schwingungsnellenverteilung einer Konstruktionsvariante einer Kabinenstruktur.

Im Weiteren bietet sich eine Überprüfung des Kabineninneren bzgl. akustischer Eigenformen des eingeschlossenen Luftvolumens an. Die üblichen Abmessungen moderner Kabinen und die Wellenlängen typischerweise vom Antriebsstrang angeregter Schwingungen können in ungünstigen Fällen zum Auftreten stehender Wellen, d.h. akustischer Resonanzen, im Kabineninneren führen. Dieser Effekt macht das Bedienen der Maschine über längere Zeiten unmöglich, losgelöst von der hiermit verbundenen Überschreitung vorgegebener Expositionsgrenzwerte. Abhilfe schafft in einem solchen Fall in der Regel lediglich die Anpassung der geometrischen Abmessungen der Kabine, d.h. ein modifizierter Kabinenentwurf. Sollte die Kabine ROPS-Anforderungen erfüllen müssen, wäre ggf. auch diesbezüglich ein neuer Nachweis der modifizierten Kabine erforderlich. Folglich kommt der simulationsgestützten Abschätzung der Eigenfrequenzen und Eigenformen des eingeschlossenen Luftvolumens in einer frühen Entwicklungsphase eine besondere Bedeutung zu. Bild 9 zeigt das FE-vernetzte Volumen einer neu entworfenen Kabine und Ergebnisse einer Modalanalyse zur Identifikation der akustischen Eigenformen.

## Zusammenfassung

Die skizzierten Entwicklungs- und Simulationsmethoden unterstützen die sicherheits- und praxisgerechte Gestaltung von Fahrerarbeitsplätzen. Die hierbei zu berücksichtigten spezifischen Anforderungen aus Norm- und Regelwerken wurden in ihren relevanten Grundzügen skizziert. An konkreten Beispielen aus der Baumaschinentechnik wurden strukturmechanische Ansätze zur Bewertung der ROPS- und FOPS-Sicherheit sowie neue Möglichkeiten der messtechnischen und simulationsgestützten vibroakustischen Bewertung und Optimierung von Fahrerinnen und offenen Fahrerständen aufgezeigt. Ein speziell für Baumaschinen entwickeltes halbautomatisches Sichtfeldmessgerät wurde vorgestellt.

Sämtliche Ergebnisse können direkt in die Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse von Maschinen- und Komponentenherstellern einfließen und die Produktoptimierung unterstützen. Letztendlich kommen die Ergebnisse den Maschinenführern in Form sicherer und praxistauglicher Produkte zu Gute.

## Quellenverzeichnis

- [1] ISO 5006:2006, Earth-moving machinery – Operator’s field of view – Test method and performance criteria (Erdbaumaschinen-Sichtfeld-Testverfahren und Anforderungskriterien)
- [2] Bandmann, M.: 15 Jahre Maschinenrichtlinie 98/37/EG – Die neue Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, Plenarvortrag anlässlich des Empfangs der BG Bau zur Bauma 2010, Wissensportal baumaschine.de, 2010
- [3] Hoske, P.; Bürkle, K. et al.: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Maschinen (Teil 1), Wissensportal baumaschine.de, 2010
- [4] Scholten, J.; Baranski, F.: Innovative Methoden zur Entwicklung lärmarmer Baumaschinen, Tagungsbandbeitrag zur 5. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, 2012
- [5] Feierabend, J.: Die Akustische Kamera – ein effektives Werkzeug zur Schallquellenlokalisierung, Maschinenakustik 2008, VDI-Bericht 2052, Düsseldorf, 2008