



© Daimler

Vollautomatische Bestimmung des Gepäckraumvolumens

AUTOREN



Dr. Andreas von Dziegielewski
ist ein Geschäftsführer und
Softwareentwickler der
Rmags GmbH in Mainz.



Dr. Rainer Erbes
ist Softwareentwickler der
Rmags GmbH in Mainz.

Das nutzbare Volumen eines Pkw-Laderaums ist ein wichtiges Kaufkriterium. Die gängigen DIN-, ISO- und SAE-Industrienormen schreiben die Ausschöpfung des Laderaums mit Messquadern vor. Neben der Bestimmung am realen Automobil wird immer mehr eine virtuelle Beladung im CAD-System vorgenommen. Beide Verfahren bedeuten sehr viel aufwendige Handarbeit. Aber mit der Software TrunkPacker von Rmags lässt sich das Volumen eines Kofferraums nun vollautomatisch berechnen. Weiter ermöglicht die Software die Durchführung von Packstudien mit beliebigen Objekten wie etwa Golftaschen, Kinderwagen oder Koffern.

NORMEN ZUR BESTIMMUNG DES LADEVOLUMENS

Die Angabe des Kofferraumvolumens in Katalogen erfolgt gemäß den Normen ISO 3832 und DIN 70020 in Litern. Als zulässiges Messmittel erlauben die Normen ausschließlich die Verwendung von Ein-Liter-Quadern mit den Kantenlängen $200 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$. Die maximal mögliche Anzahl solcher Quader, die ohne Verformung im Gepäckraum platziert werden können, ergibt dann das Fassungsvermögen. Auf diese Weise wird ein nachvollziehbares und reproduzierbares Verfahren definiert, mit dem sich das sinnvoll nutzbare Lade-raumvolumen eines Pkw bestimmen und zwischen verschiedenen Automobilherstellern vergleichen lässt. Die Empfehlung zu dieser Messmethode stammt vom Verband der Automobilindustrie (VDA). Die Messmethode wurde in die internationale Norm ISO 3832 aufgenommen und ist ein Teil der deutschen Norm DIN 70020, die allgemein die Maße und Gewichte eines Fahrzeugs spezifiziert. Bei offenen Gepäckräumen kann sich das Kofferraumvolumen nach der DIN-Norm auf verschiedene Bereiche beziehen. Das sind die hinter der zweiten Sitzreihe und hinter den Vordersitzen. Dazu gehört auch der größte Gepäckraum, **BILD 1**.

Auch die US-amerikanische Norm SAE J1100 sieht die Verwendung von Messquadern vor. Die verwendeten Quader sollen jedoch ein Set stilisierter Koffer darstellen und haben dementsprechend unterschiedliche Größen, **BILD 2**. Sie reichen von Reisekoffern mit 67 l Volumen bis hin zu kleinen Schuhkartons mit knapp 6 l Volumen. Als Besonderheit gibt es noch einen Messkörper, der der Form einer Golftasche nachempfunden wurde, der ebenso gepackt werden kann. Die SAE-Norm schreibt weiter genau vor, wie viele Quader welchen Typs verwendet werden dürfen und in welcher Reihenfolge diese zu packen sind.

NOTWENDIGKEIT DER VOLLAUTOMATISCHEN AUSLITERUNG

Das Kofferraumvolumen neuer Fahrzeugreihen wird heute bereits während des Entwicklungsprozesses anhand von digitalen Fahrzeugmodellen bestimmt und optimiert. Bisher ist dies mit viel mühsa-

mer Handarbeit verbunden: Der Konstrukteur platziert jeden Quader manuell im CAD-System und prüft visuell die Dichte und Kollisionsfreiheit der so erstellten Packung.

Dieses manuelle Vorgehen bedeutet einen enormen Zeitaufwand, denn die Kofferraumgröße liegt bei einer Limousine bei circa 500 l, das Durchladevolumen von einem Kombi bei circa 1400 l bis 1900 l und bei einer Großraumlimousine bei bis zu 2200 l. Entsprechend ergibt sich eine schier endlose Anzahl an Möglichkeiten für die Anordnung der Messquader. Liegt bereits ein Prototyp des Fahrzeugs vor, so findet gewöhnlich eine Überprüfung der CAD-Ergebnisse durch eine manuelle Ausliterung am physikalischen Modell mittels Kunststoff- oder Schaumpolystyrol-Quadern

statt. Auch dieses Vorgehen bedeutet einen hohen Arbeitsaufwand.

Bei beiden manuellen Verfahren kann der ermittelte Wert für das Kofferraumvolumen stark schwanken, abhängig von der Erfahrung des Ingenieurs und der investierten Zeit. Um eine optimale Packung zu finden, müssten zudem sehr viele verschiedene Anordnungen der Quader überprüft werden.

Ziel der Entwicklung der Software TrunkPacker von Rmags war daher die vollautomatische Bestimmung einer möglichst optimalen Packung des Kofferraums mit Normquadern, um sowohl eine konstant hohe Packungsgüte als auch eine große Zeitersparnis zu erreichen. Mit der Software lässt sich das Volumen eines Gepäckraums gemäß der gängigen Industrienormen ISO 3832,

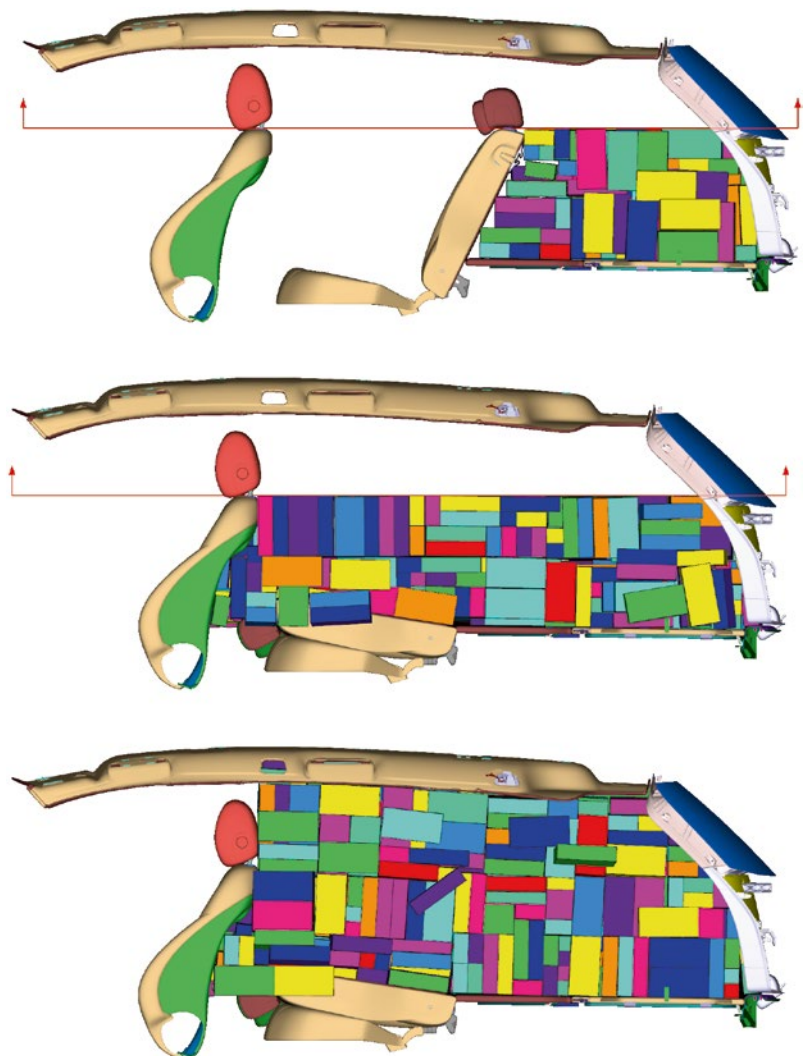


BILD 1 Volumenbestimmung in Europa mit Einheitsquadern – bei einem offenen Kofferraum kann sich das Kofferraumvolumen nach der DIN-70020-Norm auf verschiedene Bereiche beziehen: hinter der zweiten Sitzreihe (oben), hinter den Vordersitzen (Mitte) oder das größte Gepäckraumvolumen (unten) © Rmags

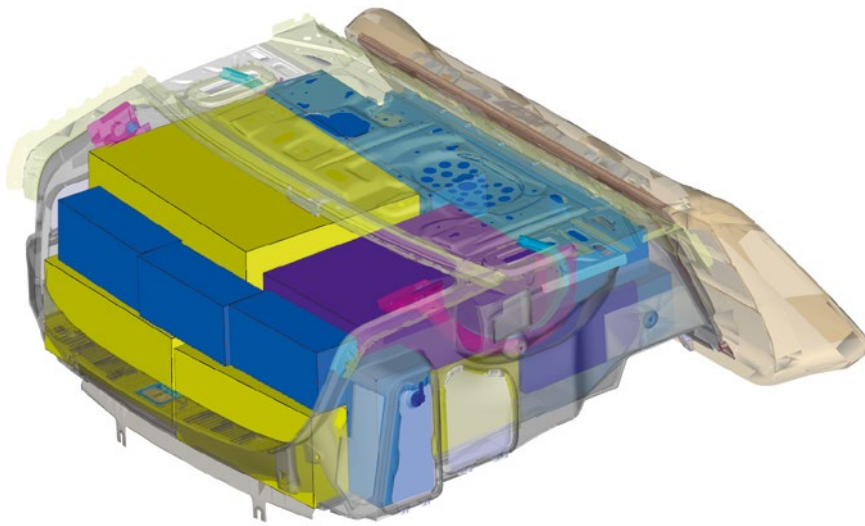


BILD 2 Volumenbestimmung in den USA mit unterschiedlich großen Gepäckstücken – Kofferraumvolumen eines geschlossenen Gepäckraums ermittelt nach der US-amerikanischen Norm SAE J1100 (© Daimler)

DIN 70020 und SAE J1100 vollautomatisch am virtuellen Modell bestimmen.

SICHT DES WISSENSCHAFTLERS AUF DIE VOLUMENBESTIMMUNG

Aus mathematischer Sicht handelt es sich beim Kofferraumpacken, also bei der Bestimmung des Kofferraumvolumens mit Quadern, um ein beweisbar schwieriges Problem. Es ist aus der Komplexitätsklasse „NP-schwer“. Würde man eine einfache Lösung für das Kofferraum-Packproblem finden, so könnte man (zumindest theoretisch) einige der schwierigsten Probleme der theoretischen Informatik mit diesem Wissen ebenfalls lösen. In der Praxis versucht man solche Probleme näherungsweise optimal zu lösen.

Eine mögliche Herangehensweise, um eine möglichst optimale Packung zu konstruieren, ist die Verwendung eines heuristischen Optimierungsverfahrens namens simulierte Abkühlung (Simulated Annealing). Der Algorithmus nimmt dabei zufällige Veränderungen an den aktuell besten Packungen vor, wobei temporär auch ungünstigere Packungen akzeptiert werden können. Der Algorithmus „kühlt“ die Suche im Lauf der Zeit ab, das heißt die Veränderungen werden schwächer, und schlechtere Packungen werden seltener zugelassen. Der Prozess erinnert an das Gefrieren von Wasser: Geschieht die Abkühlung hinreichend langsam, so bilden sich kristalline Strukturen, die ein globales Energieoptimum des Systems darstellen.

Die wissenschaftlichen Erfahrungen und Erkenntnisse, die den Grundstein für den heutigen TrunkPacker legen,

sind in einer langjährigen Forschungs-kooperation entstanden. Daran beteiligt waren neben den Entwicklern von Rmags und Daimler auch das Institut für Informatik der Universität Mainz sowie das Max-Planck-Institut für Informatik (MPI) in Saarbrücken.

Seit Mitte 2014 übernimmt Rmags die Weiterentwicklung, die Wartung und den Vertrieb der Software an andere Automobilhersteller und -zulieferer. Prof. Dr. Elmar Schömer von der Universität Mainz begleitete sämtliche Forschungsarbeiten, die im Rahmen der Kooperation entstanden sind. Er leitet die Arbeitsgruppe Algorithmische Geometrie und ist Experte für das Lösen von Packproblemen. Seine Expertise auf diesem Gebiet konnte er schon für ähnliche Fragestellungen einsetzen: beim Layout von Schnittmustern, bei der Anordnung von Transportgütern in Containern oder bei der Optimierung der Querschnitte von Unterseekabeln [1].



BILD 3 Packstudie mit verschiedenen Gegenständen: Der TrunkPacker findet automatisch die einzig mögliche Platzierung der grünen Golftasche unter Benutzung der seitlichen Mulden; für den braunen Einkaufskorb und pinkfarbenen Kinderwagen wird bei der Anordnung die Vorgabe eingehalten, dass diese aufrecht stehen sollen (© Daimler)

SICHT DES ANWENDERS AUF DIE VOLUMENBESTIMMUNG

Die durchschnittliche Arbeitszeit zur Ermittlung des Kofferraumvolumens über alle Baureihen hinweg konnte bei Daimler dank der TrunkPacker-Software um 70 % reduziert werden. Diese große Zeitersparnis ist möglich, da die Software sich nahtlos in den Arbeitsablauf der Ausliterung integrieren lässt: vom Übertragen der Kofferraumgeometrie aus dem CAD-System in den TrunkPacker über die Berechnung bis hin zur Bereitstellung der erzeugten Packungen für das CAD-System. Auch werden Volumenbestimmungen nun viel häufiger vorgenommen, was eine bessere Beeinflussung der Produktentstehung und schließlich einen optimalen Kofferraum ermöglicht. Seitens Daimler wurde das Forschungsprojekt von Matthias Kreuz initiiert und während der gesamten Zeit von Sascha Mudnic geleitet.

Gerade bei den Packalgorithmen nach ISO/DIN-Norm führt eine längere Laufzeit zu einer erhöhten Qualität der Packung, wobei für optimale Packungen je nach Größe des Kofferraums schon mehrere Stunden Rechenzeit bereitgestellt werden sollten. Daher wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, über einen Auftragsplaner mehrere Berechnungen zeitlich zu planen und nacheinander beispielsweise über das Wochenende ausführen zu lassen.

Um die Packungsqualität in der zur Verfügung stehenden Zeit zu verbessern, arbeiten alle Packalgorithmen parallelisiert. Der TrunkPacker wurde bewusst als Stand-Alone-Software konzipiert, also nicht etwa als ein Plug-in zu gängigen CAD-Programmen, denn nur so kann die volle zur Verfügung stehende Rechenleistung ausgenutzt werden. Gleichzeitig bindet er keine Lizenzen von Drittsoftware.

Dem Anwender wird auch die Möglichkeit gegeben, berechnete Packergebnisse manuell nachzubearbeiten und weiter zu optimieren. Die wichtigsten Funktionen hierbei sind Hinzufügen, Verschieben und Verdrehen von Quadern. Dafür wurde eine Echtzeit-Kollisionskontrolle und eine Fangfunktion implementiert: Die virtuellen Quader rasten an den gewünschten Positionen ein und können sich nicht überlappen.

Bei dem Produktionsprozess von realen Kunststoffquadern sind Fertigungsungenauigkeiten unvermeidbar. Auch können die Quader nach einiger Zeit Abnutzungsspuren aufweisen, typischerweise an Ecken und Kanten. Um dem Rechnung zu tragen, lässt die Norm ISO 3832 Toleranzen bei den Abmessungen der Messquader zu. So dürfen die Quader an jeder Kante um maximal 1 mm verkürzt sein und die Ecken und Kanten mit einem Radius von bis zu 10 mm abgerundet werden. Um die Norm vollständig abzubilden und die Vergleichbarkeit mit einer physikalischen Ausliterung am realen Fahrzeug herstellen zu können, wurde bei der Erstellung der Algorithmen darauf geachtet, dass sie auch mit abgerundeten und verkürzten Messquadern arbeiten können.

In der Realität sind die Verkleidungen des Kofferraums zudem nicht vollständig steif, sondern erlauben gewisse Verformungen. Dies lässt sich im virtuellen Modell durch Werkstoffeigenschaften simulieren, die der Anwender einstellen kann und die vom Algorithmus dann bei Kollisionsberechnungen berücksichtigt werden.

Der TrunkPacker bietet auch ein Packen in Schichten an. Diese Schichtalgorithmen unterteilen den Kofferraum in (meist horizontal ausgerichtete) Schichten und befüllen diese Schichten mit Normquadern. Die so erzeugten Packungen lassen sich später besser am physikalischen Modell reproduzieren, da schichtweises Packen im Gepäckraum auch dem menschlichen Vorgehen entspricht.

PACKSTUDIEN MIT BELIEBIGEN GEGENSTÄNDEN

Für den Endkunden stellt das Gepäckraumvolumen allein noch nicht notwendigerweise ein Maß für die Praktikabilität der Kofferraumgeometrie dar. Ihn könnte vielmehr interessieren, ob sein neues Automobil ihn in den



BILD 4 Packstudie mit einem Set von Koffern verschiedener Größe: die Anordnung der Koffer im Kofferraum erfolgt vollautomatisch (© Daimler)

BILD 5 Packstudie mit dynamischer Bewegungshülle: blau dargestellt ist der von der Golftasche überstrichene räumliche Bereich (Swept Volume), wenn diese in den Kofferraum gelegt wird; sowohl der Bewegungspfad als auch das hochpräzise Swept Volume wurden vollautomatisch berechnet (© Daimler)



nächsten Jahren entsprechend seiner Lebensumstände und Lebensgewohnheiten begleiten können wird. Mit der TrunkPacker-Software lassen sich daher auch Packstudien mit beliebigen Gegenständen wie beispielsweise Golftaschen, Getränkekisten oder Kinderwagen durchführen, **BILD 3**. Dabei können den Objekten verschiedene Zwangsbedingungen auferlegt werden. Beispielsweise kann ein maximal zulässiger Neigungswinkel angegeben werden, was insbesondere für Getränkekisten oder Einkaufskörbe sinnvoll ist.

Auch könnte es den Endkunden interessieren, ob sich sein Kofferset komplett im Gepäckraum verstauen lässt, **BILD 4**, oder ob er das verpackte Regal aus dem Möbelhaus nach Hause transportieren kann, nachdem er die Rückbank umgelegt hat. Mithilfe solcher Packstudien hat der Fahrzeughersteller die Gewissheit, dass sich seine Zielgruppe über eine durchdachte Kofferraumgeometrie freuen kann. Die Packstudien-Funktion befindet sich momentan in der letzten Testphase der Entwicklung und wird bei der nächsten Version für den Anwender zur Verfügung stehen.

Neben der Ermittlung von rein statischen Packungen interessiert gerade beim Packen von beliebigen Gegenständen auch die reale Packbarkeit, also die Frage, ob die Gegenstände auch nacheinander kollisionsfrei durch die Kofferraumöffnung hindurch im Laderaum platziert werden können. Hierzu arbeitet Rmags an Verfahren zur automatischen Planung und Überprüfung von Pfaden, entlang derer die Packgüter in den Laderaum eingebracht werden können. Die Berechnung von dynamischen Bewegungshüllen [2] (Swept Volumes, **BILD 5**) entlang dieser Pfade soll es ermöglichen, die Ergonomie des Laderaums besser zu verstehen und weitere zielgerichtete Optimierungen der Kofferraumgeometrie vornehmen zu können.

Ähnliche Fragestellungen sind den Entwicklern bei Rmags auch schon an anderer Stelle wie beispielsweise bei der Bewegungsplanung von Robotern oder bei der Überprüfung von Sicherheitsabständen zwischen sich bewegenden Bauteilen [3] begegnet. Die auf diesen Gebieten entwickelten Verfahren sollen in Zukunft helfen, die computergestützte Gestaltung der Kofferraumgeometrie weiter zu optimieren.

LITERATURHINWEISE

- [1] Müller, A.; Schneider, J. J.; Schömer, E.: Packing a Multidisperse System of Hard Disks in a circular Environment. In: Physical Review E, Vol. 79(2), 2009
- [2] von Dziegielewski, A.; Hemmer, M.; Schömer, E.: High Precision Conservative Surface Mesh Generation for Swept Volumes. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, PP(99), 2013, S. 1-9
- [3] Erbes, R.; Mantel, A.; Schömer, E.; Wolpert, N.: Parallel Collision Queries on the GPU – A Comparative Study of Different Cuda Implementations. In: Facing the Multicore-Challenge III, Vol. 7686 of LNCS, Springer, 2012

DANKE

Der Dank der Autoren gilt folgenden Mitwirkenden: Prof. Dr. Elmar Schömer (Universität Mainz), Matthias Kreuz und Sascha Mudnic (beide Daimler), Dr. Kai Werth und Dominik Will (beide Rmags). Dank auch an das Virtual Reality Center von Daimler in Sindelfingen für das Bereitstellen des Aufmacherbilds und der Bilder 2, 3, 4 und 5.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com

International, Digital, Interactive: The new eMagazine from MTZ

MTZworldwide – always in pole position when it comes to engine development & technology



Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com

MTZ eMagazine has 100 pages packed with information:

- ▶ company news and the latest products
- ▶ specialist articles from industry and research
- ▶ guest comment
- ▶ interview on the cover story



Keyword search: The search function enables you search for a keyword in the complete issue in a matter of seconds



Didactically prepared: Animations and editorial videos offer genuine added value and complement the specialist articles from the automotive industry



Responsive HTML5 implementation: This ensures that you have access to your eMagazine not only from desktops and laptops but also from smartphones and tablets



PDF downloads: The classic function for saving and downloading articles



Interactive contents: Jump immediately to your selected article with one click



User-friendly and direct without an app: HTML5 technology provides a direct link to the website, ensuring access without an app store