

# Der „Himmelshaken“ - Transportgüter schweben scheinbar über der Fahrbahn

von  
**Christoph Stiebel**

## Aufgabenstellung

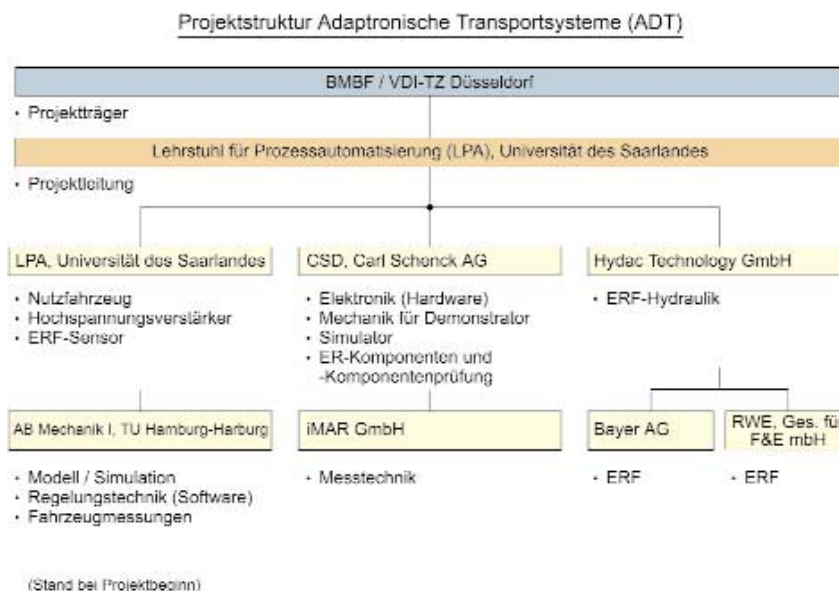
Beim Transport kranker Menschen und sensibler Güter stellt sich häufig das Problem, dass das Transportgut vor den beim Transport auftretenden Beschleunigungskräften geschützt werden muss. Die heute gängigen passiven Feder-Dämpfer-Systeme können diese Aufgabe nur bedingt erfüllen. Sie sind lediglich in der Lage, die Schwingungsamplituden der auf das Transportgut einwirkenden Beschleunigungskräfte in einem verhältnismäßig schmalen Frequenzbereich zu reduzieren. Ein weiterreichendes Ziel ist es jedoch, alle Kräfte, die von Unebenheiten der Fahrbahn herrühren zu eliminieren und Kräfte, die sich aus der Fahrdynamik ergeben (Kurvenfahrt, positive und negative Beschleunigungen) in

Im BMBF-Vorhaben „Adaptronische Transportsysteme mit elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERFs) zur Beförderung sensibler Güter“ entstand unter der Leitung des Lehrstuhls für Prozessautomatisierung und des VDI-Technologiezentrums in Düsseldorf eine breite, interdisziplinäre Zusammenarbeit von Industrie und Forschung. Sie bildete die Basis für die Entwicklung und Untersuchung einer aktiv gelagerten Transportplattform, mit deren Hilfe es gelang, das sensible Transportgut scheinbar über der Fahrbahn schweben zu lassen. Als Ergebnis dieser Förderung entstand ein mechatronisches Gesamtsystem, bei dem von der Sensorik über die Regelung und Ansteuerlektronik der ERF-Ventile bis hin zur ERF-Hydraulik durchgehend Neuland zu beschreiten war. Die komplexe Struktur des Verbundforschungsprojektes spiegelte sich in einer eng verzahnten Kooperation der Projektpartner wider.

die stabile Richtung senkrecht zur Auflage des Transportgutes umzulenken. Nur so ist es möglich, dass Transportgüter einerseits erschütterungsfrei über der Fahrbahn „schweben“ und sich andererseits wie ein Zweiradfahrer in die Kurve legen, um die entstehenden Zentri-

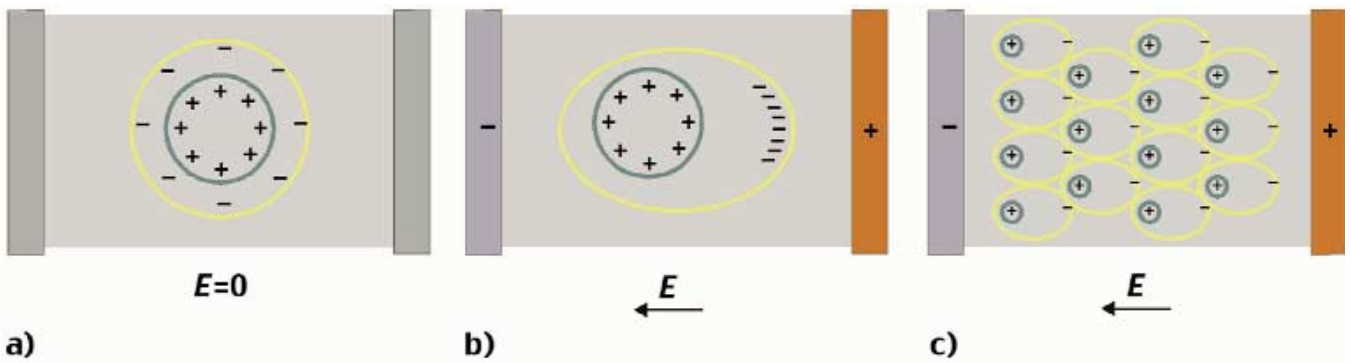
fugalkräfte abzufangen. Eine solche Aufgabe kann am besten mit Hilfe eines aktiven Systems gelöst werden. Auf Grund der erforderlichen Wege und Kräfte kommt für die Realisierung eines solchen Systems nur eine hochdynamische Hydraulik in Frage. Hydrauliksysteme zeichnen sich besonders durch große zu übertragende Kräfte aus; eine hohe Dynamik gehört nicht zu den Stärken hydraulischer Systeme. So sind Schaltzeiten im Millisekundenbereich mit konventioneller Hydraulik nicht zu schaffen, wohl aber mit elektrisch steuerbaren Hydraulikflüssigkeiten, sog. elektrorheologischen Flüssigkeiten.

**Abb. 1: Projektstruktur des BMBF-Verbundforschungsprojektes „Adaptronisches Transportsystem mit elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERFs) zur Beförderung sensibler Güter“)**



## Elektrorheologische Flüssigkeiten

Elektrorheologische Flüssigkeiten (ERF) sind Fluide, deren Fließeigenschaften durch Anlegen eines elektrischen Feldes reproduzierbar verändert werden können. Über die elektrische Feldstärke lässt sich die Konsistenz zwischen flüssig und fest



**Abb. 2: Wirkungsweise der elektrorheologischen Flüssigkeiten (ERF). In die ERF sind polare Teilchen suspendiert<sup>2)</sup>**  
 a) Ohne elektrisches Feld bildet sich eine kugelförmige Ionenwolke  
 b) Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes deformiert sich die Ionenwolke  
 c) Die Ionenwolken benachbarter Teile überlagern sich und bilden unter dem Einfluss des elektrischen Feldes mechanisch belastbare Ketten

nahezu beliebig variieren. Geschickt eingesetzt, ermöglicht dieser Effekt völlig neue Möglichkeiten in der Fluidtechnik. Anwendungsbeispiele sind elektrisch einstellbare Dämpfer, Kupplungen, Ventile ohne mechanisch bewegliche Teile oder hochdynamische Hydraulik-Stellzylinder, in die Ventilfunktionen integrierbar sind; solche Ventile benötigen keine mechanisch bewegten Komponenten mehr.

Elektrorheologische Flüssigkeiten von RWE und von der Bayer AG wurden vergleichsweise untersucht. Zum Einsatz kam schließlich eine ERF der Bayer AG mit dem Namen Rheobay. Sie besteht aus einer nichtpolaren Trägerflüssigkeit (Silikonöl), in die polarisierbare Feststoffteilchen dispergiert sind. Im elektrischen Feld bilden diese Partikel mechanisch belastbare Ketten und verwandeln das Fluid in einen elastomerartigen Stoff. Da sich die mechanischen Eigenschaften unmittelbar über eine rein elektrische Größe (elektrische Feldstärke)

steuern lassen, ist dieser Effekt im wahrsten Sinne des Wortes „mechatronisch“.

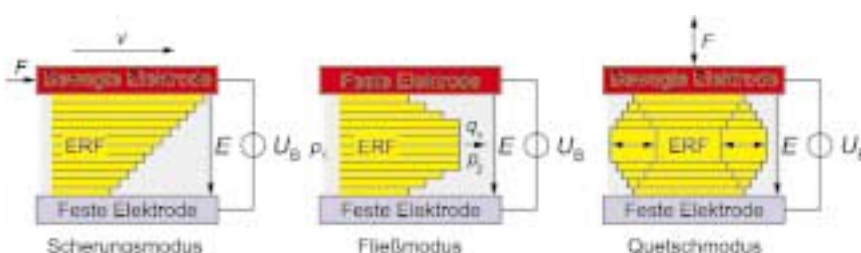
Auf dreierlei Weise lässt der ERF-Effekt sich nutzbar machen: Ein ERF-Wandler enthält Elektroden, zwischen denen sich die ERF befindet und an die eine Steuerspannung gelegt wird. Je nach Anwendung bewegen sich die beiden Elektroden und das Fluid relativ zueinander. Beim Scherungsmodus wird von der bewegten auf die feststehende Elektrode eine Kraft übertragen, die sich mit dem elektrischen Feld steuern lässt (Anwendung: Kupplung, Bremse, Dämpfer). Der Strömungsmodus hingegen zeichnet sich dadurch aus, dass die ERF durch zwei feststehende Elektroden fließt. Über das elektrische Feld lässt sich der Fließwiderstand stufenlos bis hin zur vollständigen Verfestigung des Fluides einstellen (Anwendung: Ventil). Beim Quetschmodus schließlich bewegen sich die parallelen Elektrodenplatten aufeinander zu oder von

einander weg. Die dabei entstehende Quetschströmung überträgt eine Normalkraft, die sich über das elektrische Feld steuern lässt (Anwendung: Schwingungstilger).

### ERF-Hydraulik

Drei hochdynamische Hydraulik-Stellzylinder haben die Aufgabe, die Transportplattform zu stabilisieren. Konventionelle Hydraulik wäre hierfür zu langsam. Ventilschaltzeiten unter 1 ms im Proportionalbetrieb können nur Stellzylinder aufbringen, die ohne bewegte mechanische Teile funktionieren. Genau dies leisten die integrierten ERF-Ventile, die nach dem Strömungsmodus arbeiten. Die von der Carl Schenck AG entwickelten Stellzylinder sind jeweils mit vier im Zylinderrohr integrierten elektrorheologischen Ventilen bestückt, die zu einer Vollbrücke geschaltet sind. Die Ventile kommen im Gegensatz zu konventionellen Servoventilen ohne bewegliche Teile aus und arbeiten daher hochdynamisch und verschleißfrei. Da die Ventile einzeln ansteuerbar sind, lässt sich der Volumenstrom durch die ERF-Strömungswiderstände individuell den geforderten Gegebenheiten anpassen. Auf Grund der separaten Ansteuerbarkeit der ERF-Ventilbrücke ist es im Rahmen dieses Verbundprojektes erstmals gelungen, einem Differenzialzylinder die Stelldynamik eines Gleich-

**Abb. 3: Prinzipien von ERF-Energiewandlern<sup>2)</sup>**





**Abb. 4: Neu entwickelter hochdynamischer Arbeitszylinder mit integrierten ERF-Ventilen)**

laufzylinders aufzuzwingen, eine völlige Neuheit in der Hydraulik.

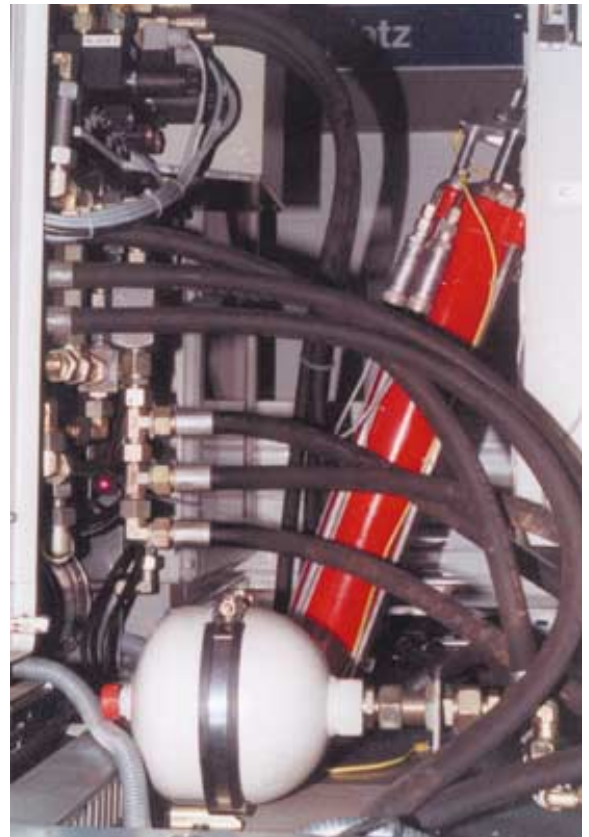
Neben den Stellzylindern sind im Rahmen eines solch komplexen Hydrauliksystems noch eine Vielzahl anderer Hydraulikkomponenten notwendig, beispielsweise Leitungen, Druckspeicher, Pumpen, Druckminderer. Inwiefern partikel-behaftete Fluide wie die ERF mit Standard-Hydraulikkomponenten verträglich sind, ist eine Frage, die im Vorfeld des Projektes niemand so recht beantworten konnte. Im Laufe der durchgeführten Untersuchungen hat sich jedoch herausgestellt, dass unter der Berücksichtigung gewisser Randbedingungen handelsübliche Standard-Hydraulikkomponenten problemlos verwendbar sind. Dies ist ein wichtiges Ergebnis für die Etablierung der ERF-Technologie. Somit wurde in enger Zusammenarbeit der Hydac Technology GmbH und der Carl Schenck AG das weltweit erste komplexe Hydrauliksystem, welches allein auf ERF basiert, realisiert und gleichzeitig konnte im Dauerbetrieb seine Funktionstüchtigkeit unter Beweis gestellt werden.

### Ansteuerelektronik für die ERF-Ventile

Jeder der drei Arbeitszylinder verfügt über vier integrierte ERF-Ventile, die über separate Hochspan-

nungsverstärker angesteuert werden.

Die Ansteuerspannung für die ERF-Ventile beträgt 4,5 kV bei einer elektrischen Leistung von bis zu 200 W je Ventil. Die Generierung der Hochspannung aus der 24 V-Bordspannung des Transportfahrzeugs ist einer der Schlüssel zu dieser neuen Technologie: Die Verstärker müssen bei kleiner Baugröße und mit einem hohen Wirkungsgrad Anstiegszeiten der Ausgangsspannung von unter 1 ms (0 V bis 4,5 kV) aufweisen, um die für das System erforderliche Dynamik zu gewährleisten. Gleichzeitig stellen die ERF-Ventile für ihre Ansteuerelektronik eine extrem nichtlineare Last dar mit Rückwirkungen von der Mechanik auf die Elektrik (Änderungen der Lastwiderstände und -kapazitäten, Generierung von Überspannungen, Kurzschlüssen und Lichtbögen). Diese Eigenschaften erfordern spezielle Schutzmaßnah-



**Abb. 5: ER-Hydraulik als Kombination von Standard-Hydraulikkomponenten (Pumpen, Hydraulikleitungen, Druckspeicher, ...) und den neu entwickelten hochdynamischen Arbeitszylindern mit integrierten ERF-Ventilen (roter Arbeitszylinder im Bildhintergrund)!**

**Abb. 6: Schaltschrank mit 12 Hochspannungsverstärkern zur Ansteuerung der ERF-Ventile)**



men und ließen die am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung durchgeführte Entwicklung der Hochspannungsverstärker zu einer Herausforderung werden, die nur in enger Zusammenarbeit mit den Entwicklern der ERF-Ventile und in vielen praktischen Tests gemeistert werden konnte.

### Inertiales Messsystem

Zur Lageregelung werden die am Fahrzeugrahmen und an der entkoppelten Ladeplattform auftretenden Beschleunigungen von zwei separaten, inertialen Messsystemen in jeweils sechs Freiheitsgraden erfasst. Die hierfür benötigten inertialen Messsysteme wurden eigens für dieses Projekt von der Firma iMAR entwickelt, einem Spin-off des Lehrstuhls für Prozessautomatisierung. Hierbei kamen marktübliche, preiswerte Sensoren neuester Technologie (Beschleunigungsmesser in Mikrotechnik, mikromechanisch gefertigte Kreisel) zum Einsatz. Darüber hinaus wurde ein Messwert erfassungssystem auf Mikrocontroller-Basis realisiert, das die Lagewinkel, Drehraten und Beschleunigungen der dynamisch bewegten Plattform und des Versuchsträgers zur Verwendung bereitstellt. Ferner werden die Abweichungen der Plattform von der ideal querkräftfreien Ausrichtung berechnet und für Regelungszwecke zur Verfügung gestellt. Schwerpunkt bei der Entwicklung des inertialen Messsystems bildete die Erstellung geeigneter Algorithmen zur dynamischen Neigetechnik und zur Sensor-Fehlerkompensation. Das Messsystem arbeitet fahrzeugautonom und verwendet neben den Drehraten- und Beschleunigungssensoren die Fahrzeuggeschwindigkeit zur Berechnung des künstlichen Horizonts. Auf Grund der Verwendung preiswerter Sensoren musste der Fehlermodellierung (beschleunigungsabhängige Kreiseldriften, Temperatur- und Vibrationseinflüsse etc.) besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

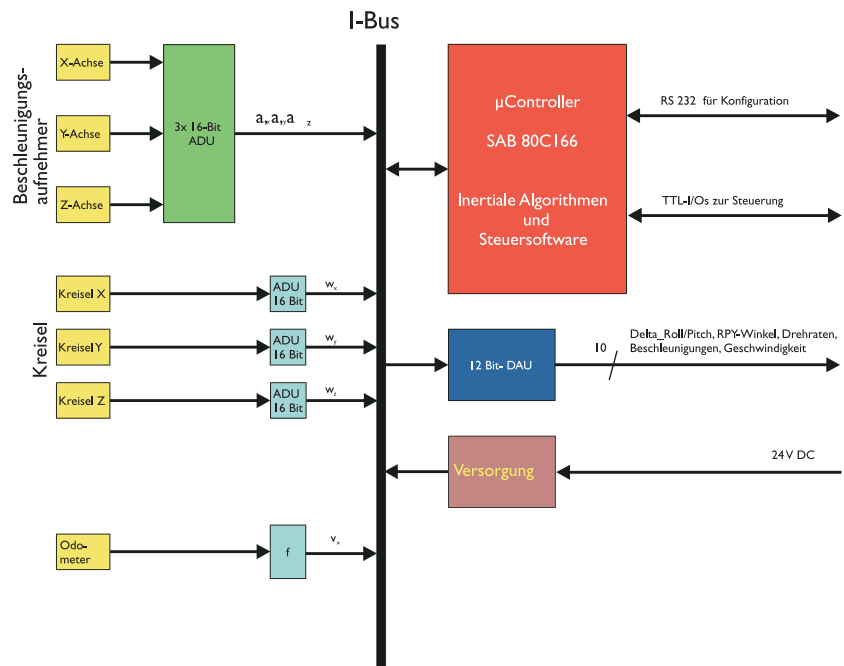


Abb. 7: Struktur des inertialen Messsystems für die Messung der Bewegungsgrößen!



Abb. 8: Mechanischer Aufbau der aktiven Transportplattform

### Regelungstechnik / Simulation

Im Rahmen einer umfangreichen Systemstudie wurden zunächst Testfahrten auf einer Versuchsstrecke und einem Fahrsimulator durchgeführt. Die hierbei gesammelten Messergebnisse dienen als Grundlage für Simulationen und zur Auslegung des Systems. Die realisierte Transportplattform ruht auf drei Vorlastzylindern und drei Stellzylindern, die jeweils gelenkig mit der Plattform und der Fahrzeuginnenfläche verbunden sind. Die Vorlastzylinder kompensieren das statische Gewicht von Plattform

und Zuladung und können im Regelungsbetrieb als passive Feder-Dämpfer-Elemente angesehen werden. Der erforderliche regelungstechnische Eingriff in die Bewegung des Systems erfolgt über drei Stellzylinder, die ERF-Aktoren. Über diese Aktoren ist es möglich, die Vertikal-, Wank- und Nickbewegungen der Transportplattform gegenüber dem Fahrzeug aktiv zu beeinflussen. Eine Zentralführung verbindet über ein Kardangelenk die Transportplattform mit dem Rahmen.

Für die Regelung des Systems wurde eine kaskadierte Regelungs-



**Dipl.-Ing. Christoph Stiebel**, geb. 1969 in Saarbrücken, studierte Elektrotechnik an der Universität des Saarlandes und machte dort 1996 seinen Abschluss. Seit 1996 arbeitet er unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA) der Universität des Saarlandes. Den Schwerpunkt seiner Arbeit bildet die Entwicklung von speziellen Leistungsverstärkern für Neue Aktoren (elektorrheologische Flüssigkeiten, piezoelektrische Wandler). Von 1997 bis 1999

war er im BMBF-Verbundvorhaben „Adaptronische Transportsysteme mit elektorrheologischen Flüssigkeiten (ERFs) zur Beförderung sensibler Güter“ tätig.

struktur gewählt. Die Bewegungen der Transportplattform und des Fahrzeugrahmens werden von jeweils einem inertialen Messsystem erfasst und an die Regelungselektronik weitergegeben. In der äußeren Kaskade erfolgt die Umrechnung der ermittelten Bewegungsgrößen der Transportplattform auf die erforderlichen Stellwege der drei ERF-Aktoren. In der inneren Kaskade befinden sich die linearen Regler der einzelnen ERF-Aktoren. Die Realisierung der Regelungs- und Steuerungssoftware erfolgt in Form einer Bedieneroberfläche, mit der das Transportsystem über einen Personal Computer vom Bediener überwacht und gesteuert werden kann. Gleichzeitig übernimmt ein Real-time-code, der auf einem Prozessrechner implementiert wurde, die Steuerungs- und Regelungsaufgaben in Echtzeit.

Auf einem Straßensimulator wurde das System in Betrieb genommen,

die Regelungssoftware optimiert und das Verhalten des Gesamtsystems untersucht. Der anschließend durchgeführte Feldversuch bildete den Projektabschluss, bei dem das Demonstratorsystem seine Funktionalität auch unter realen Bedingungen erfolgreich unter Beweis stellte.

### Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das im Projekt entwickelte System bietet hohen Nutzen für Kranenbeförderung, Gütertransporte und andere Anwendungen. Darüber hinaus hat es den Beweis erbracht, dass selbst komplexe Hydrauliksysteme dauerhaft mit ERF betrieben werden können. Das System lässt sich als Grundlage zum Lösen von unterschiedlichen Problemen der Schwingungskämpfung nutzen. Es hat alle wesentlichen Funktionsprüfungen erfolgreich absolviert und wird

nun, so hoffen seine Entwickler, in verschiedenen Applikationen zu technisch hochwertigen Lösungen beitragen. Wünschenswert für die Zukunft wäre, wenn sich auf der Basis der erzielten Ergebnisse weitere Anwender mit der ERF-Technologie anfreunden könnten.

### Danksagung

Unser Dank gilt den Teilprojektleitern: Prof. Dr.-Ing. U. Weltin der AB Mechanik I der TU Hamburg-Harburg, Herr K. Büsing der Bayer AG, Dr.-Ing. H. Rosenfeldt der Carl Schenck AG, Dr.-Ing. B. Kirsch der Hydac Technology GmbH, Dr.-Ing. E. von Hinüber der iMAR GmbH und Dr.-Ing. K. Poppe der RWE, Ges. für F&E mbH, für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

### Literatur

- 1) Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes: Adaptronisches Transportsystem mit elektorrheologischen Flüssigkeiten (ERFs) zur Beförderung sensibler Güter, 2000, Förderkennzeichen: 13N6986/7
- 2) Rech, B.: Aktoren mit elektorrheologischen Flüssigkeiten. Universität des Saarlandes, Dissertation, 1996

**Abb. 9:** Die schnelle ERF-Hydraulik sorgt für eine aktive Entkopplung des Transportgutes vom Fahrzeugrahmen<sup>1)</sup>.

