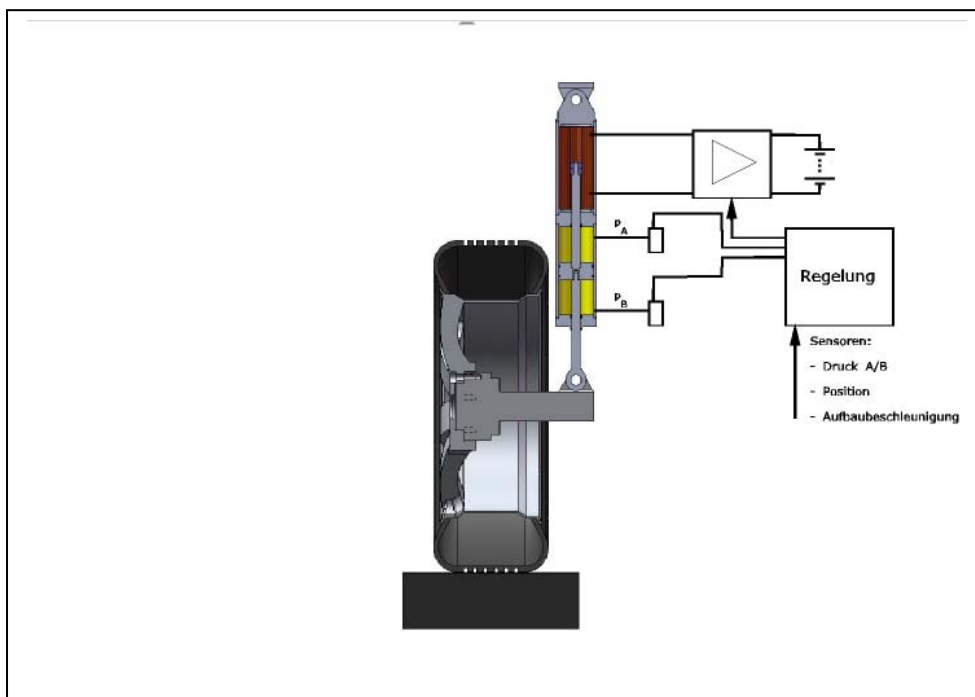


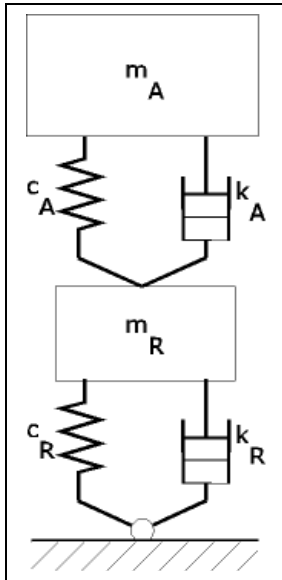
Energie-Rückgewinnung aus Vertikaldynamik eines Fahrzeuges

*Simulation und Berechnung zu Patentanmeldung "Energieoptimiertes Elektrofahrzeug",
INTERTRONIC Gresser GmbH*

Die Energierückgewinnung aus einem aktiven Federbein [Beschreibung siehe 1, erste Abschätzung siehe 2] soll anhand einer dynamischen Analyse näher betrachtet werden. Verwendet wird das CAD-Programm SolidWorks 2010 Premium mit dem Simulationspaket SolidWorks Motion.

Hierzu wird statt des aktiven Federbeins (siehe Bild) ein Modell eines konventionellen Federbeins verwendet. Der Regelkreis des aktiven Federbeins, bestehend aus elektrischem Aktor, Hydraulikteil und Regelelektronik wird hier durch das Feder-Schwingungsdämpfer-System gebildet.





Ein konventionelles Federbein, bestehend aus Reifen, Radmodul, Aufbaufederung und -Dämpfung sowie Aufbau (Karosserie) kann durch das oben abgebildete 2-Massen-System dargestellt werden. Die Masse m_A stellt hierbei die anteilige Masse des Aufbaus dar. Das Gewicht der ungefederten Masse des Radmoduls wird über m_R abgebildet. Mit c_R und k_R werden die Federungs- und Dämpfungseigenschaften des Reifens berücksichtigt. Federung und Schwingungsdämpfer der Aufbaufederung sind durch die Kenngrößen c_A und k_A erfasst.

Fahrbahnunebenheiten werden zuerst vom Reifen aufgenommen. Je nach Unebenheit und Reifeneigenschaften werden diese bereits vom Reifen gefiltert ("geschluckt") bzw. auf die ungefederte Masse des Radmoduls übertragen. Das Radmodul ist über Federung und Schwingungsdämpfer (Stoßdämpfer) mit dem Aufbau gekoppelt. Die Abstimmung dieser Komponenten erfolgt so, dass einerseits ein möglichst guter Fahrbahnkontakt erhalten bleibt, andererseits die Schwingungen des Aufbaus möglichst reduziert werden. Federung und Dämpfung müssen hierbei sowohl Sicherheits- als auch Komfortaspekte berücksichtigen.

Die Dämpfungsarbeit im Schwingungsdämpfer wird über viskose Reibung in Wärme umgewandelt und tritt damit komplett als Verlustenergie auf. Die Feder arbeitet verlustfrei. Die Federenergie beim Einfedern wird teilweise an den Aufbau übertragen und trägt damit zur vertikalen Aufbaubeschleunigung bei. Beim Ausfedern hält die in der Feder gespeicherte Energie den Fahrbahnkontakt sicher. Hier sind allerdings trotz Anpassung der Federkennlinie überschüssige Energieanteile zu sehen.

Beim aktiven Federbein wird die Dämpfung über die Gegenkraft des elektrischen Aktors im Generatorbetrieb realisiert. Die beim konventionellen Federbein verlorene Dämpfungsarbeit kann damit vollständig zur Energierückgewinnung genutzt werden. Für die Energierückgewinnung wird die Federenergie anteilmäßig und der aus der Aufbau-bewegung resultierende Anteil berücksichtigt.

Für die Simulation wird ein entsprechendes CAD-Modell, bestehend aus den Komponenten Fahrbahn, Radmodul, Federbein und Aufbau erstellt. Dieses wird um die Simulationskomponenten Feder und Dämpfer zwischen Fahrbahn und Radmodul sowie Feder und Dämpfer zwischen Radmodul und Aufbau ergänzt. Die Anregung erfolgt, indem die "Fahrbahn" in vertikaler Richtung über eine Simulationskomponente "Linearmotor" bewegt wird.

Folgende Parameter wurden für das Modell verwendet (siehe [3]):

Radmasse	mR	=	40 kg
anteilige Aufbaumasse	mA	=	400 kg
Reifensteifigkeit	cR	=	150000 N/m
Aufbaufedersteifigkeit	cA	=	20000 N/m
Reifendämpfung	kR	=	100 Ns/m
Aufbaudämpfung	kA	=	1500 Ns/m

Die Anregung erfolgte mit einer Amplitude von 10mm bei 10Hz.

Zur Auswertung der Simulation dienten folgende Simulationsergebnisse:

- Vertikalbewegung des Aufbaus (z-Richtung)
- Reaktionskraft des Dämpfer2 (z-Komponente Aufbaudämpfung)
- Reaktionskraft der Feder2 (z-Komponente Aufbaufederung)
- Reaktionskraft des Dämpfer1 (z-Komponente Reifendämpfung)
- Reaktionskraft der Feder1 (z-Komponente Reifensteifigkeit).

Die zahlenmäßige Auswertung erfolgte überschlägig, d.h. es wurden die Maximalwerte für die (nicht konstanten) Kräfte abgelesen und Mittelwerte gebildet.

Folgende Ergebnisse (Näherungswerte) konnten abgeleitet werden:

Dämpfungsarbeit:

$$F = +/- 500N, \quad F' = 250N \quad W = 2 * 250N * 10*10^{-3}m = 5 J$$

Aufbaubewegung:

$$z = 2mm \quad W = 4000N * 2*10^{-3}m = 8 J$$

Federenergie:

überschüssige Federkraft ca. 200N, $F' = 100N$, Federweg ca. 3mm

$$W = 100N * 3*10^{-3}m = 0,3 J$$

Für den Reifen ergibt sich ein Energieverlust von ca. 5 J.

Der Reifen nimmt damit ca. 30% der Gesamtenergie (18,5 J) eines Einfedervorganges auf.

Für das Gesamtfahrzeug ergibt sich eine mögliche Energierückgewinnung von

$$4 * 13,3 J = 53,2 J$$

pro "Unebenheit".

Geht man von einer "Unebenheit" von 10mm pro Meter Fahrstrecke aus, ergibt sich pro 100km eine Energierückgewinnung von

$$5,3 * 10^6 J = \mathbf{1,5 kWh / 100km} \quad (1 kWh = 3,6 * 10^6 J)$$

Dieses Ergebnis stellt keine genaue Berechnung der Energierückgewinnung aus der aktiven Federung eines Fahrzeugs dar, sondern soll eher die mögliche Größenordnung verdeutlichen. Geht man von einem Energiebedarf von 10 ... 20 kWh pro 100 km für den Antrieb eines Elektrofahrzeugs aus, könnte der Anteil der Energierückgewinnung aus dem "Fahrwerk" mit 1,5 kWh bei ca. 10% liegen.

Berücksichtigt werden muss jedoch ein erforderlicher Energieaufwand je nach Ausführung des aktiven Fahrwerks für elektromotorisch erbrachte Rückstellkräfte und/oder Betrieb einer Hydraulikeinheit.

Für die Beurteilung der Fahrbahnunebenheit wurde hier von 10mm/1m Fahrbahn ausgegangen. Dies ist ein rein hypothetischer Wert. Zur Betrachtung dynamischer Vorgänge sind hier neben Höhe und Häufigkeit einer Fahrbahnunebenheit auch Form sowie Fahrzeuggeschwindigkeit von Bedeutung. Daraus ergibt sich, welcher Anteil vom Reifen "geschluckt" bzw. wie groß die Dämpfungsarbeit wird.

Nicht berücksichtigt sind bei vorliegender Betrachtung weitere Ein-/Ausfederungsvorgänge, die sich aus den Nick- und Wankbewegungen des Aufbaus (beispielsweise beim Bremsen/Beschleunigen) ergeben.

[1,2] ... *Funktionsbeschreibung und Abschätzung
Energierückgewinnung aus aktivem Fahrwerk
Zink, 11,2009*

[3] ... *Bernd Heißink, Metin Ersoy
Fahrwerkhandbuch*