

Steuerbares Motorlager mit magnetorheologischer Flüssigkeit

Controllable engine mounting with magnetorheological fluid

Prof. Dr.-Ing. habil. **H. Janocha**, Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA), Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Kurzfassung

Im Rahmen eines kürzlich abgeschlossenen Verbundvorhabens wurde für den Einsatz in Kraftfahrzeugen ein neuartiges Hydrolager mit magnetorheologischer Flüssigkeit (MRF) als hydraulisch wirkendes Fluid aufgebaut (MR-Hydrolager). Mit diesem semiaktiven Motorlager können durch Anlegen eines steuerbaren Magnetfeldes die Lagereigenschaften gezielt beeinflusst werden. So lässt sich die Lagersteifigkeit in einem weiten Frequenzbereich zwischen niedrigen und hohen Werten stufenlos variieren, und eine drehzahlabhängige Reduktion der Steifigkeit in akustisch kritischen Frequenzbereichen wird möglich. In diesem Beitrag werden die Anforderungen an ein solches MR-Hydrolager, seine Funktion und konstruktive Gestaltung sowie Ergebnisse erläutert, die mit einem entsprechend ausgestatteten Personenkraftwagen auf einer Prüfanlage erzielt worden sind.

Abstract

During a recently completed co-operative project, a novel hydraulic support containing a magnetorheological (MR) fluid was developed for application in automobiles. The properties of this semi-active engine mounting can be influenced systematically via a controllable magnetic field. In this way, the mounting stiffness can be varied continuously between low and high values over a wide range of frequencies. Thus, the stiffness can be reduced at acoustically critical frequencies depending on the engine speed. This paper describes the requirements placed on such an MR hydromount, presents its function and design as well as reports test results that were achieved in a test stand on a passenger automobile equipped with MR hydromounts.

1. Problemstellung

Maßnahmen zur Gewichtsreduktion von Kraftfahrzeugen führen zwangsläufig zu leichteren Karosserien, die jedoch dazu neigen, empfindlicher auf Schwingungen zu reagieren. Gleich-

zeitig setzen die Automobilhersteller auf sparsamere Motoren. Folglich werden vermehrt leistungsstarke Dieselmotoren entwickelt, die schwingungstechnisch und akustisch problematischer sind als Ottomotoren und daher noch besser isoliert werden müssen. Parallel zu dieser Entwicklung fordern Verbraucher sowohl innen wie außen geräuschärmere Fahrzeuge, die Fahrgäste und Umwelt möglichst wenig mit Vibrationen belästigen.

Aufgrund der geschilderten Situation steigen auch die Anforderungen an Motorlagerungen; diese müssen eine Reihe von Funktionen erfüllen, die widersprüchliche Lagereigenschaften verlangen. Eine Hauptaufgabe von Motorlagern ist zunächst, das Aggregat im Fahrzeug zu positionieren; Abweichungen sind unter den vielfältigen Belastungszuständen der Aggregatlagerung nur in engen Toleranzen zulässig. Evaluiert man die beobachtbaren Lagerungsphänomene und die Maßnahmen zur Verringerung der unerwünschten Eigenschaften, so stellt man fest, dass sich Zielkonflikte ergeben, die mit konventionellen Lagern nicht beherrschbar sind.

Die Aufgabe des nachfolgend beschriebenen Verbundvorhabens bestand darin, den Zielkonflikt zwischen Akustikkomfort einerseits und Fahrkomfort andererseits aufzulösen. Hierzu war eine Motorlagerung zu entwickeln, die in ihrer Grundabstimmung den akustischen Komfortansprüchen genügt, d. h. weiches Lager und niedrige Dämpfung, und durch geeignete Einflussnahme auf die Lagersteifigkeit den Ansprüchen an den Fahrkomfort Rechnung trägt, d. h. hartes Lager und hohe Dämpfung.

2. Stand der Technik

Bei Kraftfahrzeugen der Ober- und Mittelklasse werden als Motorlager am häufigsten Hydrolager eingesetzt. Diese Lager können aufgrund der Tilger- bzw. Dämpferwirkung der Hydraulikflüssigkeit in gewissen Grenzen so abgestimmt werden, dass in dem für fahrbahnerregte Schwingungen (Stuckern) relevanten Frequenzband eine relativ hohe Dämpfungswirkung erzielt werden kann, ohne jedoch im akustisch wichtigen höheren Frequenzbereich zu sehr an Isolationswirkung zu verlieren. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der heute bekannten semi-aktiven und aktiven Lagerprinzipien sowie deren wichtigsten technischen Eigenschaften.

Bei Fahrzeugen mit im Leerlauf besonders kritischen Motoren werden schaltbare Hydrolager, so genannte dämpfungssteuerbare Hydrolager (DSHL), bereits serienmäßig eingesetzt. Bei diesen kann die hydraulische Dämpfung bzw. Tilgerwirkung z. B. durch einen zuschaltbaren Bypass beeinflusst werden. Während beim normalen Hydrolager für alle auftretenden Betriebszustände ein Abstimmkompromiss gefunden werden muss, können beim DSHL die Lagereigenschaften getrennt und damit etwas besser für die Zustände „Leerlauf“ und „Fahren“ eingestellt werden. Diese Lager sind deshalb vorwiegend für eine

reine Leerlauf-Verstellung geeignet, da hier die Verbesserung des einen Kriteriums (z. B. Akustik) immer mit einer gleichzeitigen Verschlechterung des anderen (z. B. Stuckern) einhergeht.

Tabelle 1: Eigenschaften aktiver und semiaktiver Motorlager (Quelle: BMW AG)

Lagerprinzip	Verstellwirkung / Kraftwirkung				Bedämpfung von		Platzbedarf
	Leerlauf	Fahrbetrieb	in einer Richtung	räumlich	harmonischer Anregung	stochastischer Anregung	
Dämpfungssteuerbare Lager (DSHL)	X		X		X	X	mittel
Steifigkeitssteuerbare Lager (SSHL)	X		X	X	X	X	hoch
Aktive Lager / Tilger	X	X	X		X		sehr hoch

In seltenen Fällen werden auch aktive Lager bzw. Tilger serienmäßig eingesetzt. Solche Systeme lassen zwar eine Schwingungsbedämpfung über einen weiten Frequenzbereich zu, sind aber mit hohen Mehrkosten sowie einem größeren Platzbedarf verbunden. Aus Sicht des Kraftfahrzeug-Entwicklers ist erkennbar, dass die heute standardmäßig eingesetzten Lagerprinzipien weitestgehend optimiert sind und sich lediglich geringe funktionale Fortschritte erzielen lassen. Ein deutlicher „Quantensprung“ ist offensichtlich nur durch Beschreiten neuer Wege wie die Nutzung der MRF-Technologie erreichbar.

3. Lösungsansatz

Grundlage des nachfolgend beschriebenen MRF-Lagers ist eine vom Verbundpartner BMW AG entwickelte und zum Patent angemeldete Regelungsstrategie, mit der nahe dem Nulldurchgang des Aggregatschwingungsweges dem Lager während der Zeitspanne $\Delta t = t_2 - t_1$ eine zusätzliche Steifigkeit zugeschaltet und dann bis zum Erreichen des folgenden Schwingungsextremums abgebaut wird, s. Bild 1 [1]. Hierbei muss die Regelung ein veränderliches Schwingverhalten des Systems hinsichtlich Amplitude und Frequenz ebenso berücksichtigen wie temperaturbedingte Einflüsse auf das Schaltelement im Motorlager.

Um die grundsätzliche Eignung und Effizienz dieser Strategie abschätzen zu können, wurden mit Hilfe eines Ersatzmodells („1/4-Fahrzeugmodell“) vorab Rechnersimulationen durchgeführt, wobei unterschiedliche Fälle untersucht wurden:

- Regelgröße „Weg der Motormasse“,
- Regelgröße „Weg der Karosserie“,
- Regelgröße „Abstand Karosserie-Motor“,
- konstant weiches Lager (ungeregelt),
- konstant hartes Lager (ungeregelt).

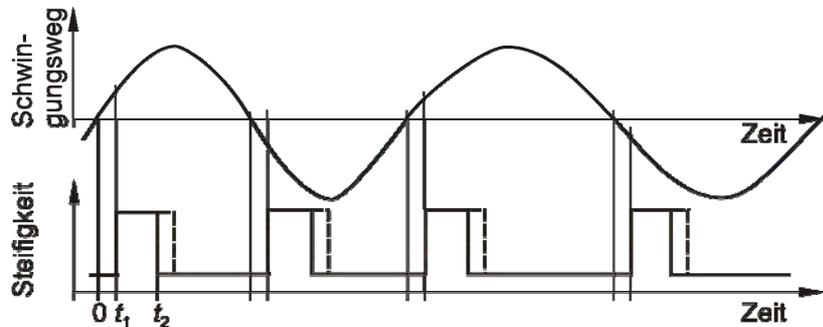


Bild 1: Prinzip der zugrunde gelegten Regelungsstrategie

Es wurden ausschließlich Vertikalbewegungen des Lagers betrachtet; hierbei kam ein stochastisches Anregungssignal zur Anwendung, das eine typische Straßenanregung wider spiegelt. Eines der Simulationsergebnisse zeigt Bild 2a, in dem die bewerteten Schwingstärken nach VDI-Richtlinie 2057 für die fünf genannten Varianten im Frequenzbereich 1...30 Hz abgebildet sind. Da im Bereich 8...9 Hz der größte Effekt für den Schwingungskomfort erwartet wird, ist dieser Bereich in Bild 2b separat dargestellt.

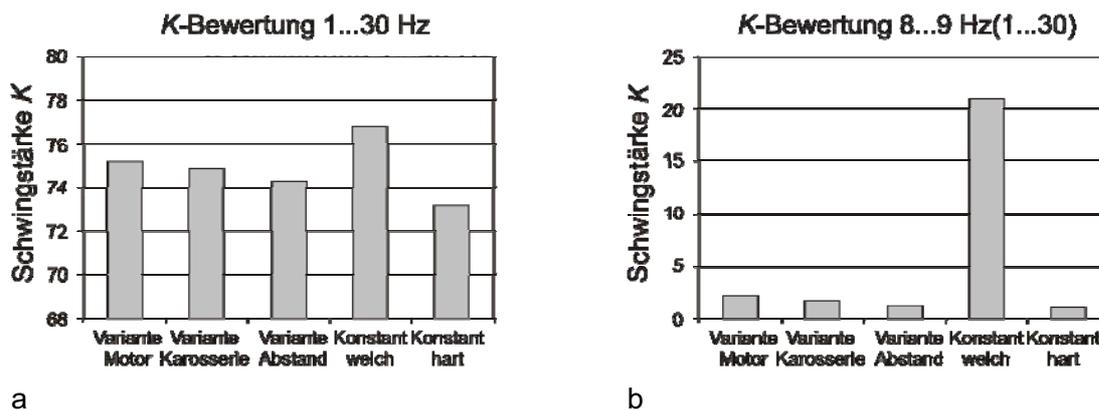


Bild 2: K-Bewertung der Schwingungsstärke. **a** Gesamter Frequenzbereich, **b** Frequenzbereich 8 bis 9 Hz (Quelle: BMW AG)

Man sieht, dass im Bereich der Motoreigenfrequenz (8...9 Hz) mit der periodischen Verstimmung des Lagers eine deutliche Reduktion der Wegamplituden der Motormasse und damit

auch der Karosserie erreicht wird. Die K -Werte für diesen Frequenzbereich belegen, dass eine wesentliche Verbesserung mittels der periodischen Steifigkeitsänderung gegenüber der konstant weichen Abstimmung möglich ist. Die K -Werte für die Varianten „Weg der Motor-masse“, „Weg der Karosserie“ und „Abstand Karosserie-Motor“ sind über den gesamten Frequenzbereich ähnlich gut wie für die konstant harte Abstimmung.

Dies bedeutet, dass durch das Prinzip der schnell verstellbaren Lagerung tatsächlich erhebliches Potenzial hinsichtlich der Verbesserung des niederfrequenten Schwingungskomforts erschlossen werden kann, ohne jedoch (wie bei der Variante „konstant hart“) die Fahrzeugakustik zu beeinträchtigen.

4. Realisierung

Die wesentlichen Anforderungen an das schaltbare MRF-Lager sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Anforderungen an das MR-Hydrolager

Schaltzeit (Anstiegs-/Abfallzeit)	3...8 ms
Grundsteifigkeit	150 N/mm
Zuschaltbare Steifigkeit	600 N/mm
Lastamplitude, die zu übertragen ist	± 500 N
Wegamplitude, innerhalb der die Last zu schalten ist	± 1 mm
Maximalweg des Lagers in Fahrzeug-Hochrichtung	± 15 mm
Frequenzbereich	7...14 Hz

Das Lager muss außerdem Umgebungstemperaturen von -40 bis $+120$ °C unbeschadet überstehen können, wobei seine grundsätzliche Funktion im Bereich von -20 bis $+90$ °C sicherzustellen ist.

4.1 MRF-Aktor

Aufgrund der kurzen erforderlichen Schaltzeit kann das angestrebte Lager mit konventionellen mechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Mitteln praktisch nicht realisiert werden. Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) ermöglichen hingegen infolge ihrer Reaktionszeiten im Millisekundenbereich den Aufbau eines schnell schaltenden Hydrolagers.

Um das MRF-Lager einfach aufbauen zu können, wurden die Basisfunktionen eines Motorlagers (Bereitstellung von Axialsteifigkeit und Quersteifigkeit) von zwei separaten Bauteilen übernommen, vgl. Bild 3. Die Quersteifigkeit sowie das Grundniveau der Axialsteifigkeit (150 N/mm) werden durch ein einfaches Gummi-Metall-Lager an der ursprünglichen Lagerposition des Aggregats realisiert („Grundlager“); der MRF-Aktor und die aktivierbare zusätzliche Axialsteifigkeit (600 N/mm) werden dem Motor-Grundlager parallel geschaltet. Auf diese Weise entfällt die Notwendigkeit zur Aufnahme von Querkräften durch das MRF-Lager.

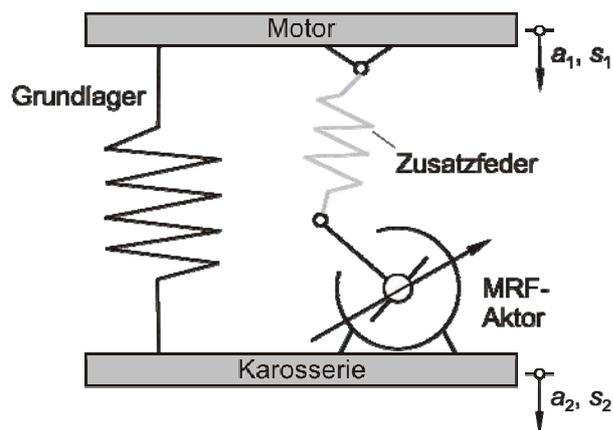


Bild 3: Konzept des MR-Hydrolagers

Ausgangspunkt für die Entwicklung des MRF-Aktors sind die potenziellen Betriebsmodi der MRF: Scher-, Fließ- und Quetschmodus, vgl. Bild 4 [2]. Der Quetschmodus weist einen stark nichtlinearen Charakter auf und ist deshalb nur für geringe Wegamplituden geeignet; aus diesem Grund wurde er hier nicht weiter berücksichtigt. Sowohl Fließ- als auch Schermodus eignen sich jedoch für die Realisierung eines aktiven Lagerelementes. Für beide Modi entwickelte der Projektpartner Freudenberg systematisch die Lagerkonzepte und erforderlichen Teilfunktionen.

Zunächst wurde ein Versuchsaktor für den Fließmodus entworfen. Kennzeichen dieses Lösungsansatzes ist die Erzeugung eines MRF-Volumenstroms im Magnetkreis bei motorseitiger Schwingungsanregung. Wird die Feldspule von einem elektrischen Strom i_A durchflossen, führt das zu einem lokalen Magnetfeld B im MRF-durchströmten Teil des Magnetkreises. Die Viskosität der MRF wird dadurch in diesem Bereich stark erhöht, was die gewünschte dynamische Verhärtung des Aktors zur Folge hat.

Für dieses Konzept wurden die Entwicklungsschritte Auslegung und Konstruktion durchgeführt. Eine Analyse des Entwurfs ergab jedoch sehr komplexe Zusammenhänge zwischen Rheologie, Magnettechnik, Strömungs- und Schwingungstechnik, so dass sich dieses Lager

nicht zur Untersuchung der auftretenden Zusammenhänge eignete. Seine Realisierung wurde aus diesem Grund zurückgestellt, und die weiteren Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf die Nutzung des Schereffektes.

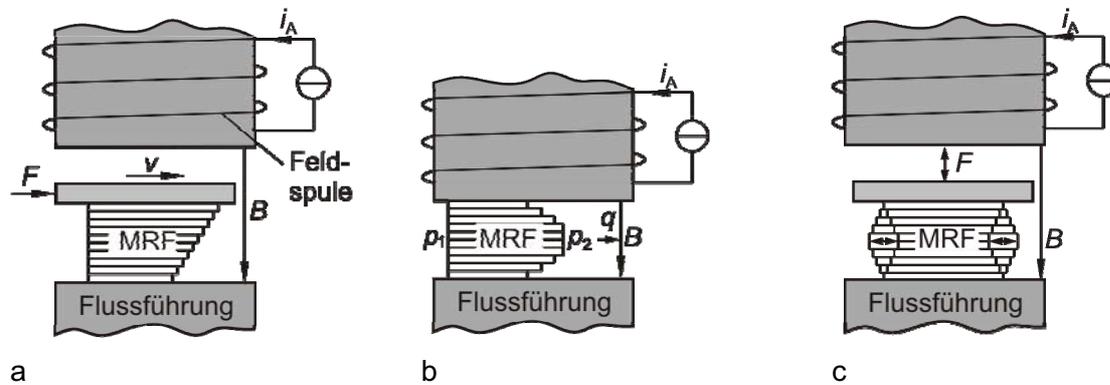


Bild 4: Betriebsmodi von MRF. **a** Schermodus, **b** Fließmodus, **c** Quetschmodus

Erste Ausführungen basierten auf einer linearen Bewegung des Scherkörpers in der MRF, was aber hohe Ansprüche an die präzise und reibungsarme Führung des Scherkörpers im Spalt und an die Abdichtung der MRF stellte. Zudem bedingt die Linearbewegung eine senkrechte Anordnung des MRF-Spalts (parallel zur Motorlagerachse), so dass sich die MRF bei längeren Stillstandszeiten an einem Ende des Spalts ablagern kann (Sedimentation). In diesem Bereich findet jedoch während des Betriebs des Lagers eine – wenn auch geringe – Verdrängung der MRF durch den Scherkörper statt. Verschleiß und unerwünschte Krafteinwirkungen am Scherkörper sind die Folge. Daher wurde für das fahrzeugtaugliche Versuchsmuster als Scherkörper ein drehbarer Hohlzylinder vorgesehen.

Der MRF-Aktor wird mit einem Hebel angelenkt und liegt mit der Zusatzfeder in Reihe. Bei eingeschaltetem Magnetfeld kommt die Steifigkeit dieser Feder voll zur Wirkung; bei abgeschaltetem Feld bleibt sie nahezu wirkungslos. Die Vorteile dieses Konzepts sind eine verringerte Sedimentation der MRF aufgrund der horizontalen Anordnung des MRF-Spalts sowie der Entfall eines Verdrängervolumens, da reine Scherung auftritt. Zudem lassen sich Lagerung und Abdichtung bei rotierenden Teilen wesentlich einfacher mit Hilfe handelsüblicher Wälzlager und Radialwellendichtringe realisieren. Schließlich kann man durch Ändern der Hebellänge die Übersetzung zwischen translatorischer und rotatorischer Bewegung einstellen, was einen zusätzlichen freien Parameter zur Abstimmung des Lagers schafft.

Die Eigenfrequenz des realisierten Lagers beträgt etwa 150 Hz und liegt damit oberhalb der Anregungsfrequenzen des Motors. Der magnetische Fluss im Spalt zwischen den Polen erreicht maximal 600 mT und wird von einer speziell für diesen Anwendungsfall entworfenen

Leistungselektronik gesteuert, vgl. Abschnitt 4.4. Bild 5 zeigt einen 3D-Schnitt dieses fahrzeugtauglichen Versuchslagers.

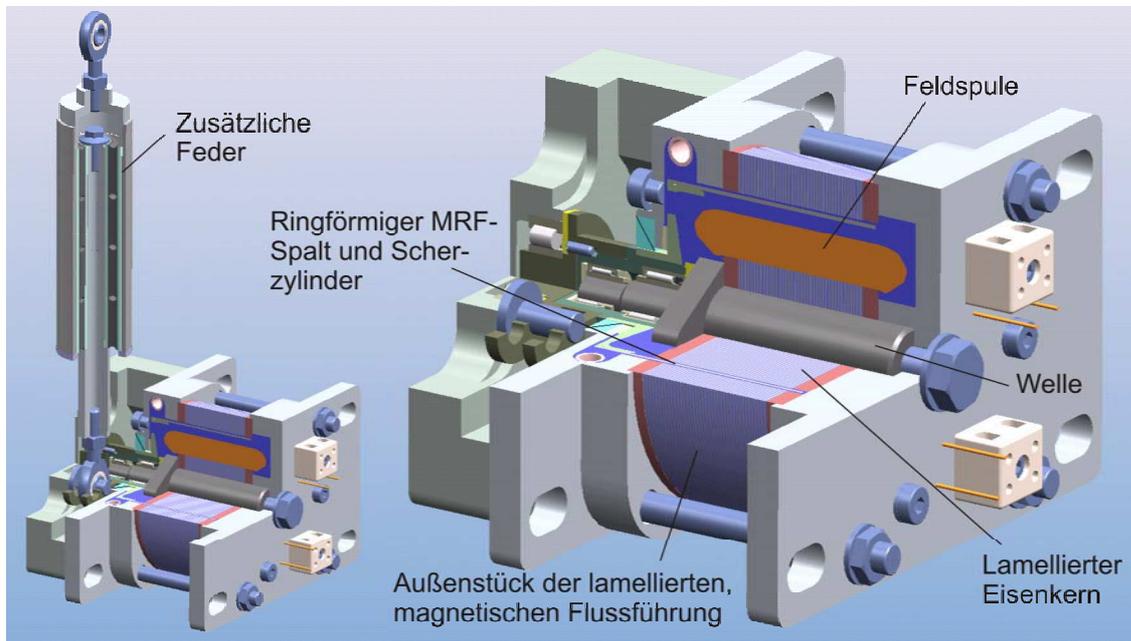


Bild 5: 3D-Schnitt des fahrzeugtauglichen Versuchslagers (Quelle: Technisches Entwicklungszentrum der Freudenberg Dichtungs- und Schwingungstechnik/Vibracoustic)

4.2 Magnetorheologische Flüssigkeit

Magnetorheologische Flüssigkeiten bestehen aus einer Trägerflüssigkeit, ferromagnetischen Partikeln sowie optionalen Zusätzen zur Verbesserung bestimmter anwendungsrelevanter Eigenschaften. Insbesondere werden Zusätze benötigt (im Bereich Schmierstoffe als „Additive“ bezeichnet), um die Sedimentationsneigung bzw. das zentrifugale Ausschleudern der spezifisch schwereren Magnetpartikel zu minimieren. Für den Einsatz in einem schaltbaren Motorlager muss eine MRF folgende Anforderungen erfüllen:

- Nicht zu hohe Basisviskosität,
- ausreichend große Schubspannung im Magnetfeld,
- hohe Sedimentationsbeständigkeit,
- gute Redispergierbarkeit.

Gegenstand der Arbeiten beim Projektpartner Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH war die Entwicklung eines Additivsystems, das universell und flexibel in Verbindung mit mineralischen Grundölen oder artverwandten Kohlenwasserstoffölen wie Hydrocrackaten, Poly-alpha-Olefinen und auch Estern verwendet werden kann. Die Mineralöl-Basis erlaubt den Einsatz von konventionellen Schmierstoff-Additiven zur optimalen Einstellung der Stabilität

gegen Sedimentation, aber auch der wichtigen Sekundäreigenschaften wie Reibungs- und Verschleißschutz, Alterungsstabilität, Korrosionsschutz usw. Mit einem Screening-Programm wurde eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Additiven auf ihre Wirksamkeit untersucht. Als Trägerfluide dienten besonders dünnflüssige hydrierte Spindelöle, da die Zugabe der Eisenpartikel bereits ohne Anlegung eines magnetischen Feldes die Basisviskosität erheblich ansteigen lässt.

Der Projektpartner Fraunhofer Institut für Silicatforschung ISC befasste sich mit der Entwicklung von anwendungsoptimierter MRF auf der Grundlage neuartiger Materialkonzepte. Dazu wurden umfangreiche Versuche durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen den relevanten Parametern Partikelkonzentration in der MRF, Partikelgrößenverteilung, Schergeschwindigkeit, magnetische Flussdichte und Temperatur einerseits sowie Schubspannung der MRF ohne/mit Magnetfeld und Sedimentation andererseits zu ermitteln [3]. Das Beispiel in Bild 6 zeigt einige der gemessenen Abhängigkeiten; deutlich erkennt man die starken systematischen Einflüsse des Feststoffgehaltes auf die MRF-Eigenschaften.

Diese und andere Untersuchungen bildeten die Basis für eine modellhafte Beschreibung der Fluide. Auf diese Weise entstand ein Leitfaden, mit dessen Hilfe die Eigenschaften der MRF über die Zusammensetzung und die Merkmale der enthaltenen Komponenten gesteuert werden können.

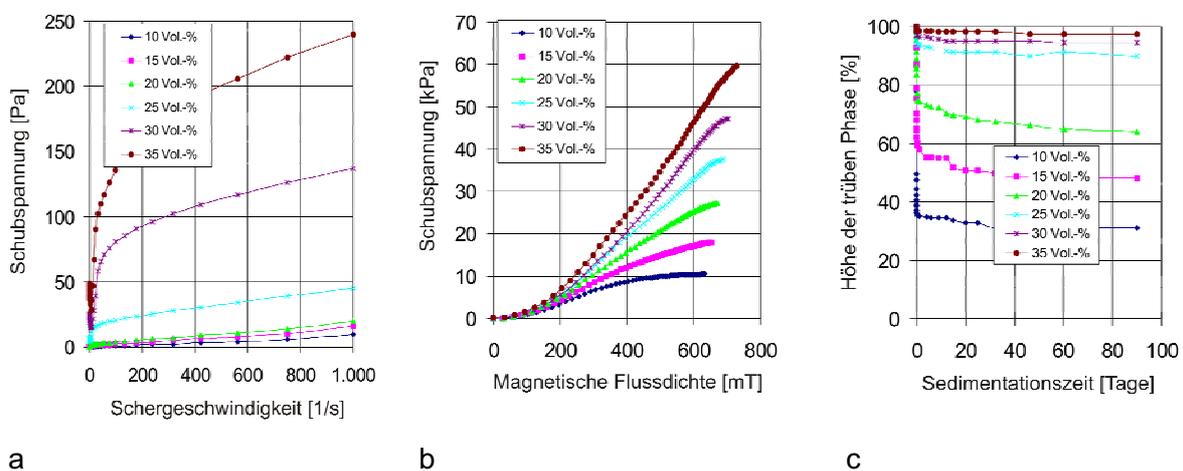


Bild 6: Einfluss des Feststoffgehaltes einer Modell-MRF auf **a** die Fließkurve ohne Magnetfeld (Maß für die Basisviskosität), **b** die magnetfeldabhängige Schubspannung, **c** den Sedimentationsverlauf (Quelle: Fraunhofer ISC)

4.3 Regelschaltung

Der Projektpartner Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (Universität des Saarlandes) war u. a. für die hardwaremäßige Umsetzung der in Kapitel 3 vorgestellten Regelungsstrategie zuständig. Zur Erfassung der erforderlichen Messgrößen wurden Beschleunigungssensoren eingesetzt, weil diese als sog. seismische Aufnehmer keinen externen Festpunkt benötigen. Zunächst werden die Beschleunigungssignale a_1 und a_2 (vgl. Bild 3) einer Bandpassfilterung unterzogen, die hier mit Hilfe eines Anstiegsratenbegrenzers und eines retriggerbaren Monoflops erfolgt, um fehlerverursachende Phasen- oder Zeitverzögerungen zu unterbinden, s. Bild 7, oberer Signalpfad. Bei Über- oder Unterschreiten eines einstellbaren „Beschleunigungsfensters“ wird das Zeitglied (Monoflop) aktiviert.

Im unteren Signalzweig wird aus a_1 und a_2 nach zweifacher Integration der Abstand s zwischen Motor und Karosserie bestimmt. Mit Hilfe der beiden Komparatoren erkennt man die Annäherung dieses Abstands an eine obere oder untere Wegschwelle, die relativ zur Ruhelage einstellbar ist. Erfolgt diese Annäherung im aktivierten Zustand des erwähnten Zeitglieds, wird dies als eine Bewegung im relevanten Zeitbereich angesehen, und an den Eingang des Leistungsverstärkers wird ein Rechtecksignal einstellbarer Dauer geliefert, d. h. das Motorlager wird hart geschaltet.

Nicht dargestellt ist eine Zusatzschaltung, die den Ausgangspuls während der Motorzündung unterdrückt bzw. unterbricht. In dieser Phase darf das Motorlager nämlich auf keinen Fall hart geschaltet werden, da infolge der hiermit verbundenen starken akustischen Kopplung andernfalls die Innengeräusche verstärkt würden.

4.4 Leistungselektronik

Die Leistungselektronik hat die Aufgabe, die Aktorinduktivität (Feldspule) mit unipolaren Stromimpulsen zu betreiben. Als Scheitelwert des Stromes war 13 A gefordert; seine Anstiegs- und Abfallzeiten sollten ≤ 1 ms sein bei einstellbaren Pulsdauern von 2 bis 25 ms. Eine Machbarkeitsstudie ergab, dass unter diesen Voraussetzungen in einem analogen Leistungsverstärker eine mittlere Verlustleistung von etwa 440 W auftreten würde. Bei einem Schaltverstärker, mit dem sich die in der Feldspule gespeicherte Energie teilweise zurückgewinnen ließe, wäre zur Regelung der Stromamplitude eine Schaltfrequenz von > 10 kHz erforderlich. Infolge der verhältnismäßig hohen Betriebsspannung von 170 V würde dies zu nennenswerten Verlusten in den Schalttransistoren und zu erhöhten Wirbelstromverlusten im Eisenkreis führen, d. h. ein grundsätzlicher Vorteil des Schaltverstärkers, nämlich sein hoher Wirkungsgrad, käme hier nur eingeschränkt zum Tragen.

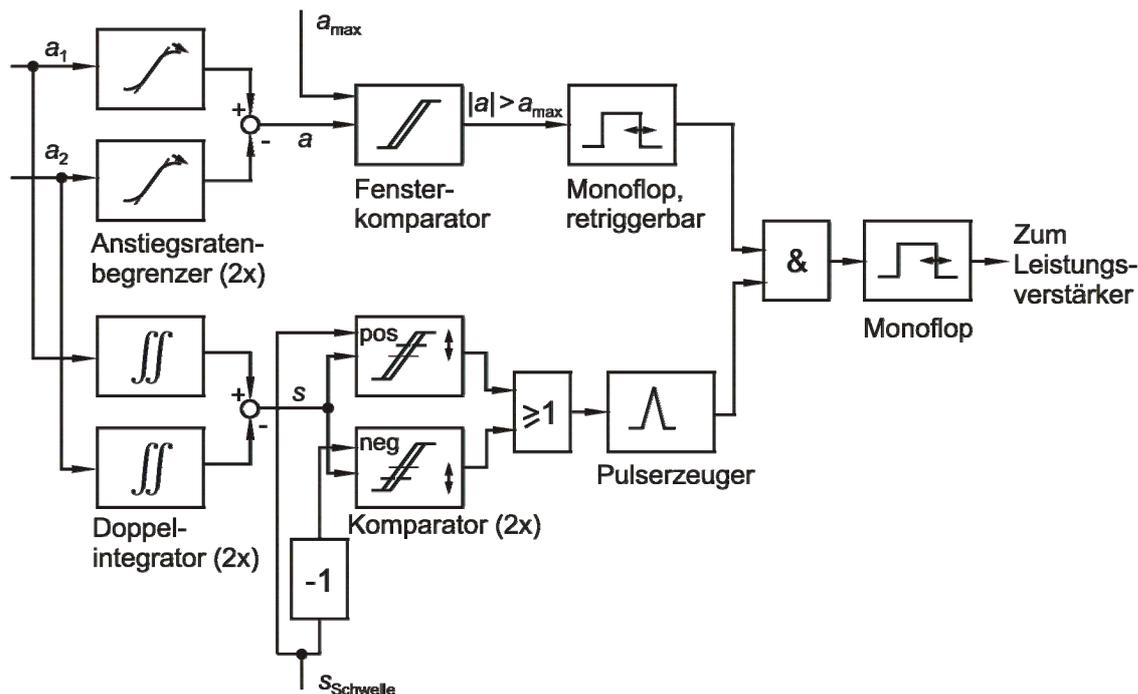


Bild 7: Struktur des Analogreglers

Die vom Projektpartner *D*ASS* mbH entwickelte Schaltung in Bild 8a liefert bessere Ergebnisse, indem sie elektrische Resonanzen nutzt und den Sollwert des Stromes bei deutlich verringerter Versorgungsspannung mit wenigen Schaltvorgängen aufrecht erhält. Hierzu wird der Kondensator C_0 auf die Spannung u geladen, so dass die in ihm gespeicherte elektrische Energie gleich ist der magnetischen Energie, die nach vollständiger Energieübertragung in der Lastinduktivität L enthalten ist. Zwischen den Zeitpunkten 0 und 1 ms sind die Transistoren T1 und T2 leitend; die Energie fließt von C_0 in die Last L und führt dort zum Stromanstieg bis zum Sollwert, s. Bild 8b. In der Zeitspanne 1 ms bis 10 ms bleibt der Transistor T2 leitend, und durch Schalten von T1 wird zwischen den Zuständen „Nachladen“ (aus der vergleichsweise niedrigen Batteriespannung) und „Halten“ über T2 und D1 ständig gewechselt. Der Spannungshochsetzer ist während dieser Zeit inaktiv und durch D3 überbrückt. Zum Zeitpunkt $t = 10$ ms werden beide Transistoren gesperrt; die Energie fließt über D1 und D2 aus der Last zurück in den Kondensator und lädt diesen im Idealfall wieder auf das ursprüngliche Potenzial auf.

Diese Elektronik benötigt für den Betrieb des Motorlagers eine Leistung von ungefähr 20 W. Gegenüber einem äquivalenten Analogverstärker beträgt die Energieeinsparung also 95 %, was einen wichtigen Vorteil für den Einsatz im Kraftfahrzeug darstellt.

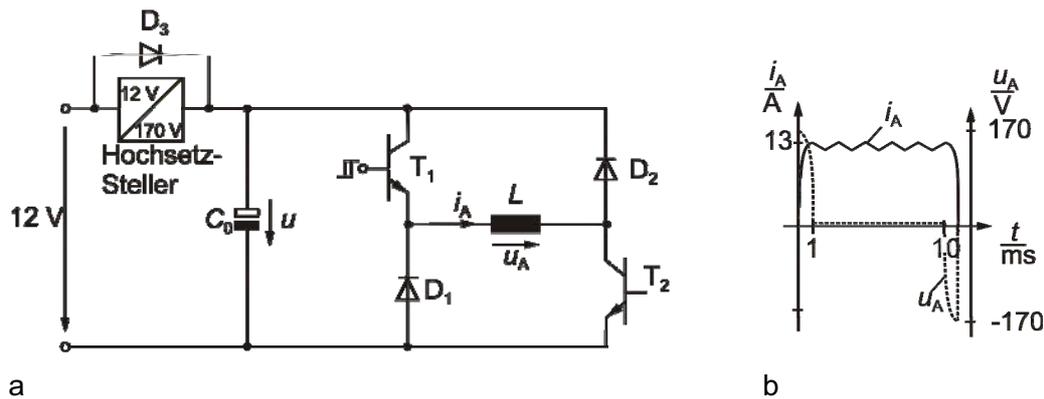


Bild 8: Leistungselektronik für MRF-Aktor. a Geräteplan, b Strom-Zeit- und Spannung-Zeit-Verläufe für $\Delta t = 11 \text{ ms}$ (Quelle: D*ASS mbH)

5. Versuchsergebnisse

Das in Kapitel 4 beschriebene Motorlager wurde zunächst auf einer Hochfrequenz-Prüfmaschine hinsichtlich seiner dynamischen Steifigkeitseigenschaften untersucht. Hierbei wurden u. a. Beginn (t_1) und Dauer (Δt) der Schaltpulse relativ zu den Nulldurchgängen des Wegsignals s (vgl. Bild 1) sowie Amplitude und Anstiegszeit des Stromes i_A variiert. Eines der Messergebnisse ist in Bild 9 dargestellt.

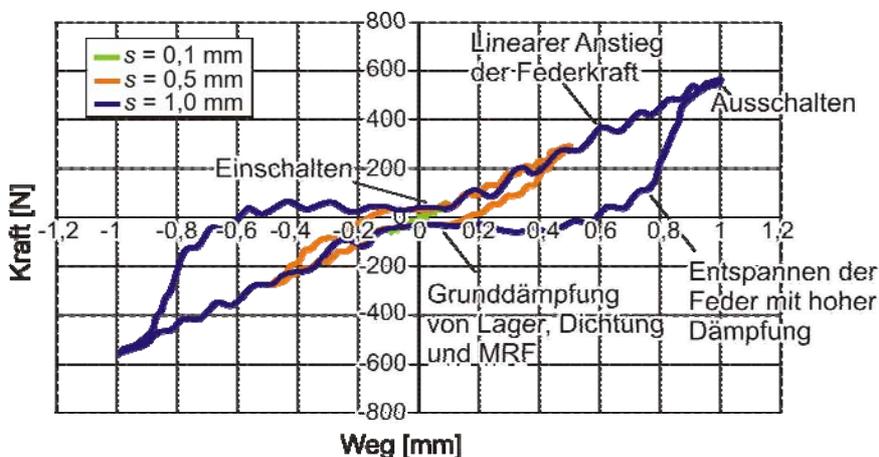


Bild 9: Kraft-Weg-Kennlinien des MR-Hydrolagers bei unterschiedlichen Wegamplituden ($\hat{I}_A = 7 \text{ A}$, $f = 11 \text{ Hz}$, $t_1 = 0$, $\Delta t = 23 \text{ ms}$) (Quelle: Technisches Entwicklungszentrum der Freudenberg Dichtungs- und Schwingungstechnik/Vibracoustic)

Es zeigte sich, dass für alle Betriebszustände der Aufbau der Aktorkraft schnell und hoch genug ist, um den geforderten Steifigkeitszuwachs von 600 N/mm zu erzielen. Damit wurde

bewiesen, dass mit MRF-Aktoren – zumindest unter Laborbedingungen – dynamisch und in Echtzeit in mechanische Schwingungsbewegungen eingegriffen werden kann.

Anschließend erfolgte eine niederfrequente Abstimmung des Musters für eine bestimmte Motor/Fahrzeug-Kombination auf einem so genannten Einmassen-Prüfstand. Hierbei wurde das Motorlager mit einer reibungsfrei gelagerten Masse, die der anteiligen Aggregatmasse des Zielfahrzeugs entspricht, statisch belastet und fußpunktseitig im relevanten Amplituden- und Frequenzbereich angeregt. Das Ziel war, die Dämpfungseigenschaften des Lagers so abzustimmen, dass eine möglichst geringe Resonanzüberhöhung der fahrbahnangeregten Hubeigenfrequenz des Aggregats und gleichzeitig eine gute Isolation der Karosserie von den höherfrequenten Motoranregungen erfolgt.

Anhand von Vergrößerungsfunktionen konnte nachgewiesen werden, dass der Pulsbetrieb des Lagers bei bestimmten Parametereinstellungen zu einer geringeren Resonanzüberhöhung führt als der Betrieb mit Konstantstrom. Der Kurvenverlauf für den Pulsbetrieb weist darüber hinaus auf eine ähnlich hohe Isolationswirkung, wie sie dem ungedämpften Fall eigen ist.

Um Fahrzeugversuche auf einer Vierstempel-Prüfanlage durchführen zu können, wurden schließlich zwei identische MR-Hydrolager in ein Fahrzeug BMW 320 d eingebaut; hierbei ersetzte man die serienmäßigen Hydrolager durch gleichartige Lager ohne Flüssigkeit. Die Bewertung der getesteten, unterschiedlichen Ansteuerungsvarianten ergab, dass jede Art von dynamischer Lageransteuerung einen Vorteil gegenüber der konstanten Steifschaltung bietet, da nicht nur eine bloße Verschiebung von Eigenfrequenzen stattfindet, sondern eine echte Verkleinerung der Schwingungsamplituden erfolgt.

6. Zusammenfassung

Es wurde der Nachweis erbracht, dass sich magnetorheologische Fluide zur Realisierung schnell schaltender Motorlager eignen. Die Ansprechzeiten sind extrem kurz, so dass mehrfach während einer Periode in eine niederfrequente Schwingung eingegriffen und diese beeinflusst werden kann.

Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Lösungen besteht darin, dass der Zeitverlauf des Kraftaufbaus beim MRF-Lager sehr flexibel gestaltet und somit wechselnden Betriebsbedingungen einfach angepasst werden kann. Verschiedenste Regelstrategien zur Ansteuerung der Aktorik sind denkbar; Kompromisse zwischen den dämpfenden Eigenschaften des Motorlagers und dessen akustischer Isolation sind letztlich kaum noch erforderlich.

Eine Schwachstelle der MRF ist ihre Neigung zur Sedimentation. Zwar ist dieser Prozess reversibel, d. h. bei Bewegung des Fluids werden die Partikel wieder aufgewirbelt, aber die

mögliche Ablagerung von Teilchen in „toten“ Bereichen des MRF-gefüllten Volumens kann zu einer langfristigen Herabsetzung der Funktion des Lagers und/oder zu erhöhter Reibung im Aktor führen. Darum sind in den Bereichen MRF-Entwicklung und Aktorgestaltung weitere Verbesserungen wünschenswert.

7. Literaturangaben

- [1] TIB ORDER-Katalog Hannover „Aktives Lagerungssystem mit magnetorheologischer Flüssigkeit (MRF) für den Automobilsektor (ALAS)“, Autor: Volker Hirsch, Signatur: F 05 B 2429 (öffentlicher Abschlussbericht)
- [2] Janocha, H. (Hsg.): Actuators – Basics and Applications. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag 2004
- [3] Trendler, A.-M., Böse, H.: Influence of particle size on the rheological properties of magnetorheological suspensions. Proc. 9th Int. Conf. Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Beijing 2004. Singapore: World Scientific Publishing 2005, S. 433-439

Die vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 03 N3105 finanziell gefördert. Die Verbundpartner sind im Beitrag namentlich aufgeführt; der Autor dankt ihnen für die effiziente und angenehme Zusammenarbeit.