

## Abstract

Ride and handling characteristics of passenger cars are mainly influenced by the suspension system. The design of suspension systems using passive components always involves a trade-off between the conflicting criteria characterizing road handling and passenger comfort. Active suspensions realized with sensors, controllers and actuators are able to apply additional suspension forces on demand and in this way ease the conflict between comfort, handling and safety. However, many of existing active suspension systems exhibit a demanding power consumption, primarily because of the system concept and the limitation to hydraulic power supply only. Inadequate control system designs may easily lead to further performance limitation.

The objective of this thesis is to demonstrate the effectiveness of a novel electrohydraulic active suspension system by investigating its concept, control design, and performance potential. The proposed active suspension system is based on a conventional passive damper and uses an electrohydraulic power-pack to exert active forces. At first, mathematical models of the actuator components are derived. These single models build together the comprehensive model of the actuator which is validated using experimental measurements. Further state-space models as well as an equivalent mechanical model are proposed for purpose of analysis and control design. The control system design phase includes a comparison between a model-free controller, i.e., the well known PID concept, and the proposed two-degree-of-freedom (2DOF) controller that considers the internal dynamics of the actuator, and consequently allows to shape the reference and disturbance responses separately. Subsequently the 2DOF controller, which proves to be superior, is adapted to the nonlinear framework by considering a linear parameter varying representation of the nonlinear plant. By combining a modal skyhook control, disturbance attenuation and warp control, the control system is then extended to the full car model. In addition to complex car model simulation results, the experimental results of both the test rig and test car confirm the concept applicability and effectiveness of the proposed control system. Finally, a novel approach to formulate preview control for active suspensions and its realistic implementation using discrete-time zero-phase filters are introduced.

## Kurzfassung

Die Fahrdynamik von Personenkraftwagen wird vor allem von der Fahrwerksauslegung bestimmt. Dabei unterliegt die Abstimmung des passiven Fahrwerks dem grundlegenden Designkonflikt zwischen Komfort-, Handling- und Sicherheitsanforderungen. Aktive Federungssysteme, die aus Sensoren, Steuergeräten und Aktuatoren bestehen, sind in der Lage, zusätzlich aktive Kräfte zu stellen und können somit den Designkonflikt reduzieren. Allerdings weisen viele der vorhandenen aktiven Federungssysteme einen hohen Energieverbrauch auf, vor allem wegen der volltragenden Bauweise und der Beschränkung auf hydraulische Energieversorgung. Ineffiziente Regelalgorithmen können darüber hinaus zu einer Leistungsverschlechterung führen. In der vorliegenden Arbeit wird das Konzept eines neuartigen elektrohydraulischen aktiven Federungssystems mit Fokus auf dessen Reglerentwurf sowie der experimentellen Realisierung untersucht. Der Aktuator des vorgeschlagenen Federungssystems basiert auf einem konventionellen passiven Dämpfer, der mit einer elektrohydraulischen Motor-Pumpen-Einheit gekoppelt wird. Zunächst werden mathematische Modelle der einzelnen Komponenten erstellt, die anschließend zu einem Gesamtaktuatormodell zusammengeführt werden. Dieses Modell dient vor allem der Simulation, um das Verhalten des Aktuators zu prognostizieren. Weitere Zustandsraummodelle sowie ein mechanisches Ersatzmodell werden für die Systemanalyse und den Reglerentwurf hergeleitet. Der Entwurf des Regelsystems umfasst einen Vergleich zwischen einem modellfreien Ansatz, dem klassischen PID-Regler, und dem vorgeschlagenen Zwei-Freiheitsgrad (2FHG) Regler, der die interne Dynamik des Aktuators berücksichtigt und damit die Entkopplung von Führungs- und Störverhalten ermöglicht. Anschließend wird der nichtlineare Regler basierend auf der Struktur des überlegenen 2FHG Reglers und einer zeitvarianten Darstellung des Aktuatormodells entworfen. Durch die Kombination des modalen Skyhook-Ansatzes mit der Störunterdrückungs- und Verspannungsregelung wird das Regelsystem auf die Gesamtfahrzeugebene übertragen. Sowohl die Simulationsergebnisse des komplexen Fahrzeugmodells als auch die experimentellen Resultate des Prüfstandes und des Versuchsträgers bestätigen dabei die Tauglichkeit des vorgeschlagenen Federungskonzeptes sowie die Effizienz der angewendeten Regelalgorithmen. Schließlich wird für das aktive Federungssystem ein vorausschauender Regelansatz sowie dessen realistische Implementierung mittels phasenfreier zeitdiskreter Filter vorgestellt.