

## **Intelligent eQUALIZER – Komponenten für ein aktives und intelligentes Automotive Fahrwerk**

**Voit, Harald; Eder, Josef; Klepatsch, Martin; Pfau, Stefan; Toth, Peter**  
Silver Atena GmbH, München

### **Kurzfassung**

Der zweifach ausgezeichnete TOP100 Innovator Deutschlands, die Silver Atena GmbH, entwickelte zusammen mit dem Partner RAPA die innovative Komponente für das derzeit beste aktive Fahrwerk der Welt. Es verbindet höchste Agilität und Fahrkomfort indem es individuell an jedem Rad die Feder- und Dämpferkräfte regelt. Notwendig hierfür ist das hochperformante Zusammenspiel von Hydraulik, Mechanik und Elektronik.

Die hochintegrierte Motor-Pumpen-Einheit (MPE), der sogenannte „Intelligent eQUALIZER“, wurde 2018 mit dem „Daimler Special Award for Innovation“ ausgezeichnet. Der Intelligent eQUALIZER besteht aus einer Innenzahnradhydraulikpumpe, einer permanenterregten Synchronmaschine (PMSM) sowie einem 48 V, 3,5 kW Steuergerät inklusive Software und hochdynamischer Regelung. Die Hauptherausforderung lag in sehr hohen Anforderungen hinsichtlich Bauraum, Stabilität, Leistung und Dynamik. In diesem Beitrag wird speziell auf die Elektronik und die Regelung der PMSM eingegangen.

Die Elektronik des Intelligent eQUALIZER besteht aus einer Leistungs- und einer Rechnerplatine. Beide Platinen sind bauraumoptimiert über einen Spritzgussträger verbunden. Zur Erfassung der Ist-Lage des Rotors dient ein Rotor-Positionssensor. Daneben stellt die Elektronik zahlreiche Zustandsgrößen der MPE über einen CAN-Bus zur Verfügung. Die integrierten Überwachungs- und Diagnosefunktionen ermöglichen größtmögliche Funktionssicherheit, so dass das Gesamtsystem mit ASIL-C entsprechend ISO 26262 bewertet ist.

Die größten Herausforderungen für die Regelung sind die auftretende Drehzahldynamik und Leistungsbeschränkungen durch Vorgaben des Bordnetzes. Ersteres tritt auf, da Einwirkungen der Fahrbahn auf das Fahrwerk sehr kurzfristig und hochdynamisch erfolgen. Letzteres, da der Intelligent eQUALIZER im Gesamtsystem Auto nur einen Nebenverbraucher darstellt. Zur Regelung des Fahrkomforts wird die PMSM im Vierquadrantenbetrieb mit der Möglichkeit zur Rückspeisung in die Batterie mit einer feldorientierten Regelung in Feldschwächung mit Raumzeigermodulation betrieben. Der Fahrkomfortregelung ist eine hochdynamische Leistungslimitierungsregelung überlagert.

## 1. Einführung

Grundsätzlich unterscheidet man in der Automobilindustrie zwischen passiven, semi-aktiven und aktiven Fahrwerken [1]. Während passive Fahrwerke, die in der Regel nur aus Feder und Dämpfer bestehen und keine Möglichkeit zum aktiven Eingriff bieten, schon seit den Anfängen des Automobils verwendet werden, sind semi-aktive und aktive Fahrwerke relativ neue Entwicklungen. Seit etwa 40 Jahren (siehe z.B. [2,3,4]) wird an aktiven Federungs- und Dämpfungssystemen geforscht, bei denen die Kraft an jedem Rad individuell geregelt werden kann. Das Ziel ist eine Verbesserung von sowohl Fahrkomfort als auch Fahrdynamik. Ende des letzten Jahrtausends erreichten die ersten Systeme die Serienreife. Weitere Entwicklungen, z.B. die kamerabasierte Erfassung der vorausliegenden Straße, trugen kontinuierlich zu einer Verbesserung des Fahrkomforts bei.

Der zweifach ausgezeichnete TOP100 Innovator Deutschlands, die Silver Atena GmbH, entwickelte zusammen mit dem Partner RAPA die Komponente Intelligent eQUALIZER für das derzeit beste aktive Fahrwerk der Welt. Es verbindet höchste Agilität und Fahrkomfort indem es als einziges System auf dem Markt individuell an jedem Rad die Feder- und Dämpferkräfte regelt und so nicht nur Wank-, sondern auch Nick- und Hubbewegungen entgegenwirkt. Notwendig hierfür ist das hochperformante Zusammenspiel von Hydraulik, Mechanik und Elektronik.

Zusätzlich zur Luftfederung ist dazu an jedem Rad innerhalb der Achse ein Dämpfer verbaut, der an beiden Arbeitskammern über ein verstellbares Dämpfungsventil sowie einen Hydraulikspeicher verfügt. Der Dämpfer ist über Hydraulikleitungen mit einer intelligenten Motor-Pumpen-Einheit (MPE) im 48 V-Netz verbunden, die durch Verschiebung von Hydrauliköl sehr schnell eine aktive Kraft innerhalb des Dämpfers aufbauen kann.

Diese hochintegrierte MPE, der sogenannte Intelligent eQUALIZER, wurde 2018 mit dem „Daimler Special Award for Innovation“ ausgezeichnet. Er besteht aus einer Innenzahnradhydraulikpumpe, einer permanenterregten Synchronmaschine (PMSM) sowie einem 48 V, 3,5 kW Steuergerät, das eine hochdynamische CPU-basierte Regelung der PMSM ermöglicht. Die Hauptherausforderungen für die Entwickler lagen dabei in den enormen Einschränkungen des zur Verfügung stehenden Bauraums, der geringen Zwischenkreisspannung und dennoch äußerst anspruchsvollen Anforderungen an Leistung und Dynamik des Systems. Aufgrund der Einbauposition des Aktors im Fahrzeugunterboden spielte bei der Entwicklung die mechanische Stabilität des Systems eine große Rolle. In diesem Beitrag wird speziell auf die Elektronik und die Regelung der PMSM eingegangen.

## 2. System

Der Intelligent eQUALIZER ergänzt die bestehende Luftfederung um eine teiltragende Hydropneumatik [5]. Während die Luftfeder die Grundlast des Fahrzeugaufbaus trägt, erzeugt die Hydropneumatik dynamische Kräfte, die den Kräften der Luftfeder überlagert sind. Dadurch kann der Fahrzeugaufbau aktiv abgestützt und gedämpft werden, z.B. bei Längs- und Querschleunigung oder bei der Fahrt auf unebenen Straßen. Beim Bremsen und Beschleunigen kann ein Eintauchen der Karosserie durch aktives Ansteuern des Intelligent eQUALIZER vermindert werden. Auf schlechten Straßen kann das System sogar elektrische Energie zurückgewinnen, so dass der Energiebedarf gegenüber dem Vorgängersystem, das mit einer riemengetriebenen Radialkolbenpumpe arbeitet, etwa halbiert wurde.

Ein zentrales Steuergerät übernimmt die Ansteuerung des Intelligent eQUALIZER an den einzelnen Rädern. Da das zentrale Steuergerät nicht nur die Sollwerte für den Intelligent eQUALIZER bereitstellt, sondern auch die Ventile und den Kompressor für die Luftfeder ansteuert, wird somit das gesamte Fahrwerk kontrolliert. Dieses übergeordnete Steuergerät sendet über CAN der ECU des Intelligent eQUALIZER Vorgaben zu angeforderten Begrenzungen (Leistung, Spannung) und die Sollwertvorgaben für die Regelung des Volumenstroms. Die durch das 48 V-Bordnetz versorgte ECU steuert den Motor des Intelligent eQUALIZER entsprechend der vorgegebenen Sollwerte an. Der Intelligent eQUALIZER sendet die an Saug- und Druckseite der Pumpe (wobei die Pumpe in beide Richtungen fördern kann) anliegenden Drücke zurück an das Steuergerät. Sowohl das zentrale Steuergerät als auch der Intelligent eQUALIZER wurden gemäß dem Sicherheitsstandard ISO 26262 entwickelt.

An jedem der vier Räder ist innerhalb der Achse ein Dämpfer verbaut, der sowohl am Kolbenraum wie auch am Ringraum jeweils über ein verstellbares Dämpfungsventil sowie einen Hydraulikspeicher verfügt. Beide Speicher sind über Hydraulikleitungen mit der bidirektionalen MPE verbunden (Abb. 1).

Durch den Intelligent eQUALIZER kann das Öl zwischen den Speichern bzw. Ringraum und Kolbenraum derart verschoben werden, dass eine Druckdifferenz innerhalb des Dämpfers entsteht, durch die eine aktive Kraft entweder für Zug oder Druck aufgebaut wird. Umgekehrt können Kräfte, die auf das Federbein wirken, zu generatorischen Zwecken verwendet werden (der Intelligent eQUALIZER wandelt mechanische in elektrische Energie um und speist diese über das 48 V-Bordnetz in die Batterie ein).

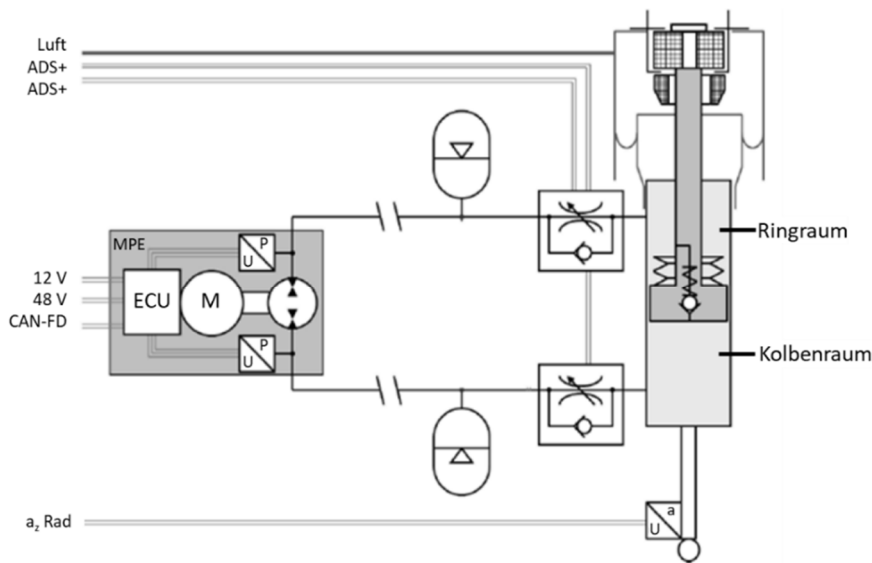


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau



Abb. 2: Finaler Zusammenbau des Intelligent eQUALIZER

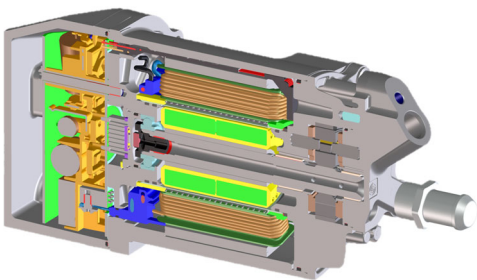


Abb. 3: Schnittbild des Intelligent eQUALIZER

### 3. Elektronik

Die Elektronik des Intelligent eQUALIZER besteht aus einer Leistungs- (Power Modul), einer Rechner- (Computing Modul) und einer Diagnoseplatine (siehe Abb. 5). Die Leis-

tungs- und Rechnerplatinen sind bauraumoptimiert über einen Spritzgussträger, welcher die Zwischenkreiskondensatoren, eine Eingangs-drossel und weitere Bauteile enthält, verbunden. Zur Erfassung der Ist-Lage des Rotors dient ein digitaler Rotor-Positionssensor, der über einen am Ende der Welle angebrachten Dauermagneten die zur Regelung notwendigen Informationen bereitstellt. Daneben stellt die Elektronik zahlreiche Zustandsgrößen des Intelligent eQUALIZER über einen CAN-FD-Bus zur Verfügung. Typische Größen wie Drehzahl, Temperatur, Eingangsspannung und Stromaufnahme werden ebenso überwacht und übermittelt wie der gemessene, tatsächliche Ist-Druck an den hydraulischen Anschlüssen des Intelligent eQUALIZER. Die integrierten Überwachungs- und Diagnosefunktionen ermöglichen größtmögliche Funktionssicherheit, so dass das Gesamtsystem mit ASIL-C entsprechend ISO 26262 bewertet ist.

Auf der Leistungsplatine (Power Modul) ist der Umrichter mittels einer diskreten B6-Brückenschaltung realisiert. Dabei sind je zwei diskrete MOSFETs parallelgeschaltet. Eine Besonderheit ist, dass die Strommessung differentiell über einen masseseitigen Strommesswiderstand (Low-Side Shuntmessung) in jeder Halbbrücke erfolgt. Dies reduziert den Schaltungsaufwand gegenüber einer High-Side-Messung und ist gleichzeitig genauer und weniger stör anfällig. Da es sich um ein 48 V Steuergerät handelt, erfolgt die Stromversorgung über Klemme 40 (Plusleitung direkt von der 48 V Batterie). Das Kernstück des Computing Moduls ist ein Hochleistungsprozessor aus der MPC57-Serie von NXP. Dieser Prozessor ist dank seiner modernen Architektur optimal für die hohen Anforderungen hinsichtlich funktionaler Sicherheit ausgelegt. Die Gründe für den Einsatz eines Prozessors dieser Leistungsklasse sind in Kapitel 4 aufgeführt.



*Abb. 4: Die Elektronik des Intelligent eQUALIZER. Oben die Rechnerplatine mit Diagnosemodul, unten die Leistungsplatine*

Der Hybridträger hat dabei die Aufgabe die beiden Platinen mechanisch und elektrisch miteinander zu verbinden und gleichzeitig große elektronische Komponenten wie Kapazitäten und Induktivitäten aufzunehmen (Abb. 5). Außerdem stellt der Hybridträger

die Anschlüsse für die 48 V-Versorgung zur Verfügung. Eine große Herausforderung bei der Konstruktion des Hybridträgers waren die rauen Umweltbedingungen. So muss die gesamte MPE in einem Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+130^{\circ}\text{C}$  voll funktionsfähig sein. Außerdem kommen noch erhebliche Vibrationen über die gesamte Lebensdauer von 8000 h hinzu.

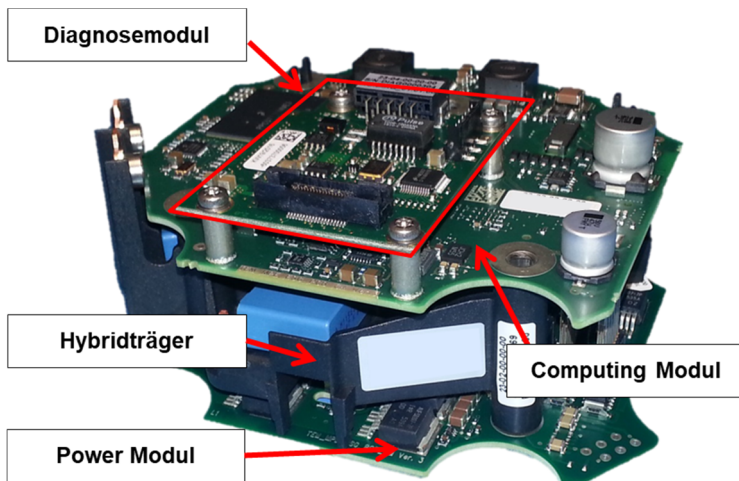


Abb. 5: Komponenten der Elektronik des Intelligent eQUALIZER

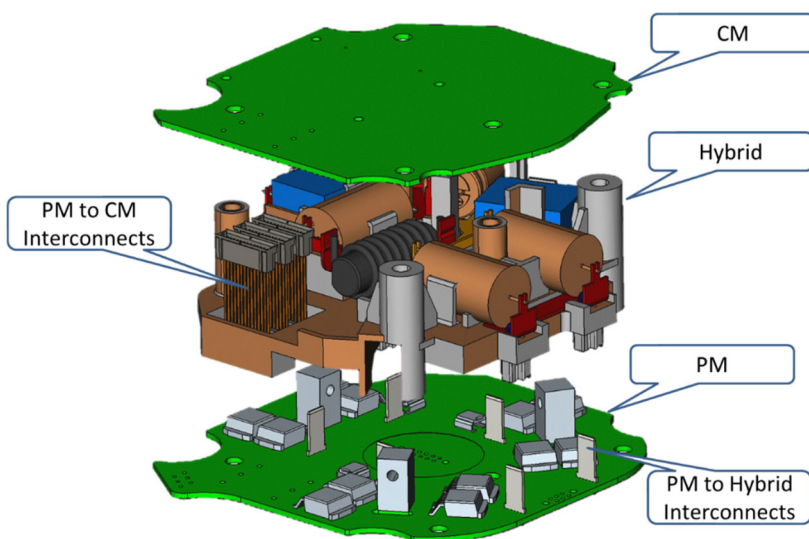


Abb. 6: Das Hybridmodul des Intelligent eQUALIZER

#### 4. Regelung

Die größten Herausforderungen für die Regelung sind die auftretende Drehzahldynamik und Leistungsbeschränkungen durch Vorgaben des Bordnetzes. Ersteres tritt auf, da Einwirkungen der Fahrbahn auf das Fahrwerk sehr kurzfristig und hochdynamisch (Stichwort Schlagloch) erfolgen. Letzteres, da das System selbst im Gesamtsystem Auto nur einen Nebenverbraucher darstellt. Dies kann zu konkurrierenden Dynamik-

und Leistungssollwerten führen. Wegen der hohen Safety-Anforderungen ist jedoch jederzeit sicherzustellen, dass die Regelung und das System für alle möglichen Zustände und unter Berücksichtigung aller thermischen Randbedingungen stabil bleiben.

Im Grunde wird die PMSM in klassischer Weise im Vierquadrantenbetrieb mit der Möglichkeit zur Rückspeisung in die Batterie mit einer feldorientierten Regelung in Feldschwächung mit Raumzeigermodulation betrieben. Über verschiedene Kennfelder des Motors wird der Sollstrom in rotorfesten Koordinaten ermittelt und dem Stromregler als Sollgröße vorgegeben (siehe Abb. 7). Um auch bei niedrigem Batterieladestand und damit niedriger zur Verfügung stehender Spannung möglichst viel Leistung in das Federbein einbringen zu können, wird bei der Raumzeigermodulation mittels Übermodulation der maximal mögliche Spannungsvektor eingeprägt.

Eine weitere Herausforderung für die Regelung war die enorm hohe Volatilität der Drehzahlsollwerte, die jedoch notwendig ist, um den gewünschten Fahrkomfort erreichen zu können. So kann es in der Spitze notwendig sein, die Drehzahl von -7000 rpm auf +7000 rpm innerhalb von 140 ms zu ändern. Dies entspricht einem Drehzahlgradienten von 100.000 rpm/s. Da der Grundstellbereich des Motors nur bis ca. 3000 rpm reicht, können höhere Drehzahlen nur über Feldschwächung realisiert werden. Allerdings liegt die Zeitkonstante des Motors bei 7 ms und somit ist der Motor zu träge. Um trotzdem diese hohen Drehzahlen innerhalb kürzester Zeit erreichen zu können, ist es notwendig den Feldschwächstrom  $i_d$  vorzusteuern sobald erkannt wird, dass Feldschwächung notwendig sein wird. Ohne einen entsprechend leistungsfähigen Motor und eine hochperformante ECU wäre dies nicht möglich. Als ECU kommt hier ein Hochleistungsprozessor aus der MPC57-Serie von NXP zum Einsatz. Dieser Prozessor bietet genug Leistung um eine Reglerfrequenz von 10 kHz zu ermöglichen und erfüllt darüber hinaus alle Anforderungen hinsichtlich funktionaler Sicherheit.

Die größte Herausforderung für die Regelung ist, dass der Intelligent eQUALIZER im Gesamtsystem Fahrzeug nur einen Nebenverbraucher mit geringer Priorität darstellt. Für den Fall, dass das Bordnetz nicht ausreichend Energie zur Verfügung stellt oder keine Rekuperationsenergie aufnehmen kann, muss der Intelligent eQUALIZER adäquat mit der Situation umgehen. Zu diesem Zweck ist der Fahrdynamikregelung eine Leistungslimitierungsregelung (LLR) überlagert. Die LLR sorgt dafür, dass die dynamisch vom Bordnetz vorgegebenen Grenzen an zur Verfügung stehender oder aufnehmbarer Energie zu keinem Zeitpunkt verletzt werden. Dazu muss im Millisekundenbereich die Leistung des Motors angepasst werden. Dies kann bis hin zum Leistungsabwurf führen, wenn für das Fahrwerk augenblicklich keine Energie vorhanden ist. Im generatorischen Fall, d.h. wenn der Motor Energie ins Bordnetz zurückspeisen will, kann es ebenso sein, dass das Bordnetz bzw. die Batterie diese Energie nicht aufnehmen können. Sollte dies der Fall sein, so wird im Inverter ein aktiver Kurzschluss (AKS) herbeigeführt und die erzeugte Energie über Wärmeverluste abgeführt.

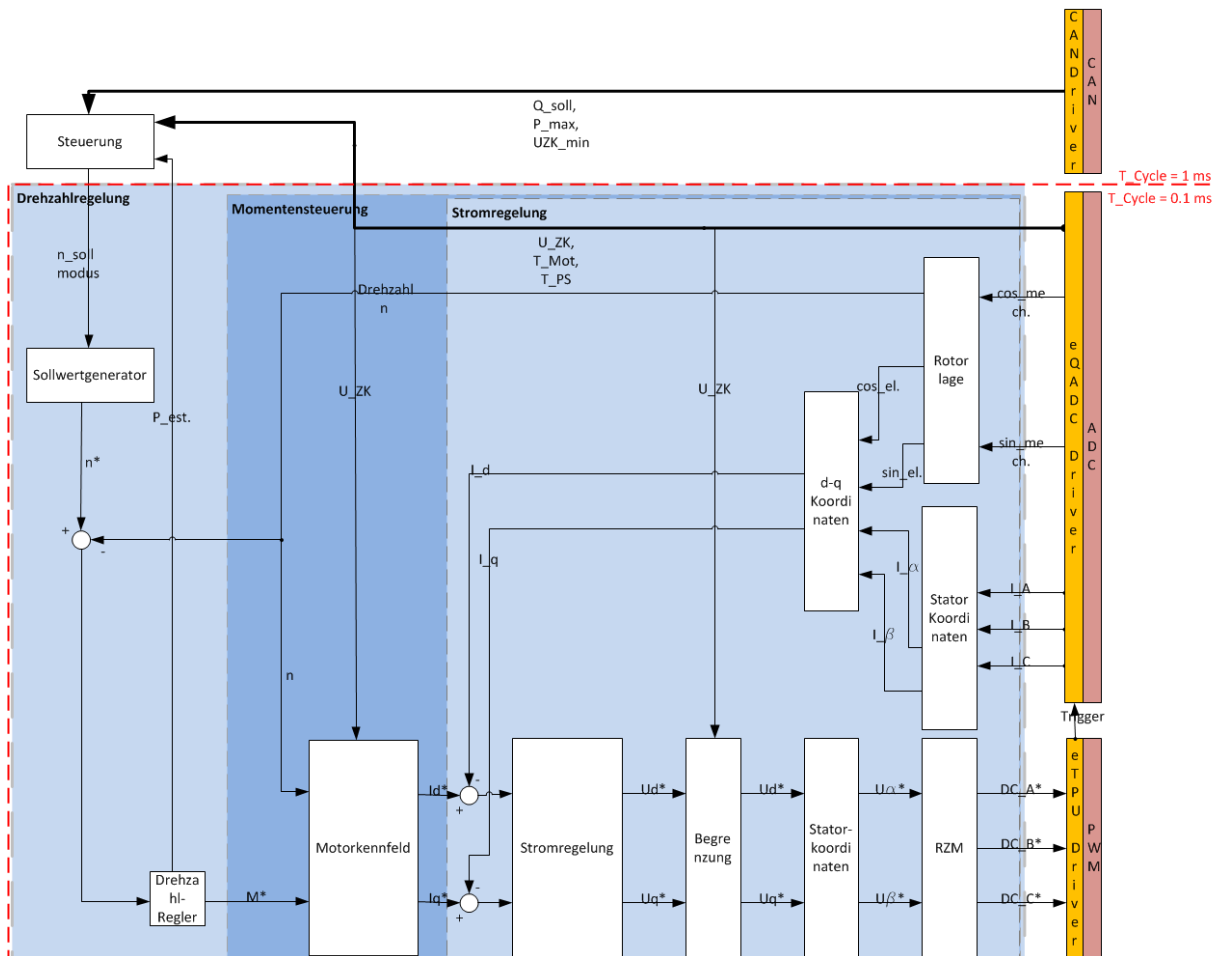


Abb. 7: Regelungsstruktur

## 5. Zusammenfassung

Mit dem Intelligent eQUALIZER wurde von Silver Atena ein hochmodernes und innovatives Steuergerät entwickelt, das für den zurzeit besten Fahrkomfort im Automotive-Bereich sorgt. Dazu vereint der Intelligent eQUALIZER innovative Konzepte aus der Elektronik und Regelungstechnik in einem kompakten und robusten Steuergerät. Die Platinen sind bauraumoptimiert über einen Hybridträger verbunden und durch die innovative Architektur den enormen Anforderungen hinsichtlich Leistung und Umweltbedingungen bestens gewachsen. Die Regelung der PMSM verbindet klassische Ansätze wie die feldorientierte Regelung mit innovativen Ansätzen wie einer hochdynamischen Leistungslimitierungsregelung. Das Gesamtsystem wurde daher folgerichtig mit dem „Daimler Special Award for Innovation“ ausgezeichnet.



## Literatur

- [1] Xue, X. D.; Cheng, K. W. E.; Zhang, Z.; Lin, J. K.; Wang, D. H.; Bao, Y. J.; Wong, M. K.; Cheung, N.: Study of Art of Automotive Active Suspensions. In: 4th International Conference on Power Electronic Systems and Applications, 2011, pp. 360-366.
- [2] Aburaya, T.; Kawanishi, M.; Kondo, H.; Hamada, T.: Development of an electronic control system for active suspension. In: 29th IEEE Conference on Decision and Control, vol. 4, 1990, pp. 2220-2225.
- [3] Hummel, K. M.; Seit, H.: Vorrichtung zur Beeinflussung der Federung von geländegängigen Fahrzeugen. DE Patent 3427508, 26 07 1984.
- [4] Ghazaly, N. M.; Moaaz, A. O.: The Future Development and Analysis of Vehicle Active Suspension System. In: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2014, pp. 19-25.
- [5] Aktives Fahrwerk E-ACTIVE BODY CONTROL. Online, Zugriff am 14.01.2020 <https://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/43615283>.

## Kontakt

Dr. Peter Toth  
Silver Atena GmbH  
Dachauer Straße 655  
80995 München  
E-Mail: [p.toth@silver-atenade](mailto:p.toth@silver-atenade)