Die AUMOVIO Brake System Roadmap:   
Den technologischen Wandel meistern

Zuverlässigkeit ist bei Bremsen unverzichtbar und Kompromisse sind keine Option. Das ändert sich auch im Zeitalter neuer Fahrzeugarchitekturen und neuer Bremssysteme nicht. Eher wird diese Grundhaltung und das über Jahrzehnte gewachsene Know-how in Zukunft noch wichtiger. Denn es gilt, Bremsen für kommende Anforderungen auszurüsten und das absolute Vertrauen in sie zu bewahren. Die Bedeutung und Notwendigkeit des Bremsens als Funktion bleiben also unberührt. Ansonsten ändert sich aber fast alles.

Die großen technologische Trends treiben neue Konzepte für Fahrzeuge voran: Die **Elektrifizierung des Antriebsstrangs** und die wachsenden Möglichkeiten des **automatisierten Fahrens** (AD) beeinflussen die Fahrzeugarchitektur. **Digitalisierung und Vernetzung** prägen ihre **elektrische und elektronische Architektur (E/E-Architektur)** grundlegend. Sie **basiert zunehmend auf Software**, die in Zukunft den Charakter von Autos und das Fahrerlebnis bestimmen wird.

Von der isolierten zur integrierten Bremsfunktion

Was bedeutet das alles für Bremsen? Veränderung – langfristig in manchen Bereichen sogar radikale Veränderung! Um diese Entwicklung zu verstehen, hilft ein Blick in die Vergangenheit: Bislang waren Bremssysteme in erster Linie mechanische Anordnungen mit Unterdruckbremskraftverstärkern und hydraulischer Kraftübertragung vom Bremspedal zur Radbremse. Dank elektronischer Sicherheitssysteme wie dem Antiblockiersystem (ABS) und der elektronischen Stabilitätskontrolle (ESC) leisten sie auch ohne Eingreifen des Fahrers in Grenzsituationen einen Beitrag zur Fahrsicherheit. Gleichzeitig müssen Bremsen heute auch zur Effizienz des Fahrzeugs beitragen – also zur Vermeidung von CO2-Emissionen – und künftig auch die Partikelemissionen beim Reibungsbremsen reduzieren. Um die Vielzahl an neuen Anforderungen zu erfüllen, entwickelt AUMOVIO als Bremssystemspezialist mit 120-jähriger Tradition neue Bremssystemtechnologien. Die **Brake System Roadmap** von AUMOVIO skizziert diese weitreichende, schrittweise Transformation, die modernste hydraulische und elektromechanische Bremssysteme umfasst. Werfen wir einen Blick auf diese Entwicklung!

Bewährte One Box Bremssysteme: mehr Freiheit für Fahrzeugarchitektur durch elektronische Betätigung

Das erste, 2016 eingeführte One Box Bremssystem **MK C1** von AUMOVIO war ein wichtiger Evolutionsschritt: Zum ersten Mal wurden Bremskraftverstärkung sowie Steuerungs- und Sicherheitsfunktionen in einer einzigen, kompakten Einheit kombiniert. Daraus ergab sich mehr Freiheit für die Fahrzeugarchitektur, etwa weil mehr Platz für Komponenten verfügbar war. In One Box Systemen wird der Bremsbefehl elektrisch über das Bremspedal übertragen und erzeugt innerhalb von 150 Millisekunden einen präzisen Bremsdruck – schneller als jedes herkömmliche Hydrauliksystem und unabhängig von der körperlichen Kraft des Fahrers. Denn das Verhalten des Pedals wird nur simuliert: Tritt der Fahrer auf das Pedal, fließt die Bremsflüssigkeit nur bis in den sogenannten Simulator, der den gewohnten Pedalwiderstand simuliert. Der hydraulische Druck für die Radbremsen wird über einen elektrischen Drucksteller separat erzeugt. Da es keine hydraulische Verbindung zwischen Pedal und Bremse gibt, können E-Generator und Reibungsbremsen ohne einen am Pedal spürbaren Übergang zwischen den Funktionen zusammenarbeiten. So wird ein konstantes Pedalgefühl erzeugt.

Darüber hinaus erhöht die Umstellung auf die elektronische Übertragung des Bremsbefehls (Brake-by-Wire) die Effizienz von Elektrofahrzeugen. Nachdem der Fahrer auf das Bremspedal tritt, entscheidet das intelligente System, ob es die Bremsen auslöst oder ob der Bremsbefehl zur Energiegewinnung durch Rekuperation via E-Generator genutzt werden soll, damit so wenig kinetische Energie wie möglich „verbrannt“ wird. Die MK C1 leistet mit zu 100 Prozent regenerativem Bremsen einen wesentlichen Beitrag zu sicherem, dynamischem und umweltbewusstem Fahren. Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen reduziert sie laut WLTP-Tests die CO2-Emissionen pro Kilometer sogar um fünf Gramm.

Alle Bremssysteme sind mit sogenannten Fallback-Konzepten ausgestattet, die die Bremsfunktion auch im Falle eines Systemausfalls aufrechterhalten: entweder durch hydraulische Mechanismen mit Ventilen und Druckleitungen oder durch elektrisch redundante Architekturen mit unabhängiger Stromversorgung und Betätigung. An den Rädern bleibt das Bremsen weiterhin ein hydraulischer Vorgang (sogenanntes „Nassbremsen”).

Die 2022 eingeführte **MK C2** ist die zweite Generation des One Box Bremssystems von AUMOVIO. Sie verfügt über Multi-Logic, d. h. zwei Leiterplatten und zwei Prozessoren, mit denen im Falle eines Fehlers noch mehr Funktionen als bei der MK C1 aufrechterhalten werden können. So kann beispielsweise die Feststellbremse redundant betätigt werden, wodurch auf eine teure mechanische Getriebesperre zur Festsetzung des Fahrzeugs verzichtet werden kann. Diese Vorteile und der Erfolg am Markt mit nahezu **15 Millionen produzierten Einheiten** machen die MK C-Serie mit ihrem elektromechanischen Aufbau zur Grundlage für weitere Evolutionsschritte der Brake System Roadmap von AUMOVIO.

Distributed Brake Systems: Höhere Effizienz durch intelligente Redundanz

One Box Lösungen schaffen für hochautomatisiertes Fahren (HAD) Redundanzen, indem sie ein Hauptbremssystem mit einem zweiten System ergänzen, das meist im Leerlauf ist und nur bei Bedarf zum Einsatz kommt. Dagegen verfügen **Distributed Brake Systems** über **zwei unabhängige Aktuatoren**, die immer gemeinsam zur Bremskraft beitragen. Der entscheidende Effekt: Da diese beiden Aktuatoren im Normalfall zusammenarbeiten, können sie kompakter, leichter und damit effizienter ausgelegt werden. Jedes der beiden Systeme kann im Notfall aber auch allein eine hohe Bremskraft erzeugen und sorgt so für die notwendige Sicherheit.

Ermöglicht wird dieses Zusammenspiel durch die E/E-Architektur vieler moderner Fahrzeuge: Die erforderlichen redundanten Bordnetze in Distributed Brake Systems sind in der Regel mit Starterbatterien, Hochvoltbatterien, Gleichstromwandlern und gegebenenfalls Stützkondensatoreinheit ausgestattet. Neben Elektrofahrzeugen haben auch viele moderne Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor eine solch redundante E/E-Architektur. Daher sind Distributed Brake Systems nicht nur auf batterieelektrische Fahrzeuge beschränkt.

Als echtes Brake-by-Wire-System ist das Distributed Brake System ideal auf die Anforderungen und Möglichkeiten moderner Fahrzeugkonzepte zugeschnitten:

* Die reduzierte Anzahl von Bremsbestandteilen sorgt für **Flexibilität in der Fahrzeugarchitektur**, da sie weniger Platz beanspruchen und frei angeordnet werden können. So entstehen Fahrzeugkonzepte, die Fahrzeuginnenräume und -dimensionen neugestalten, beispielsweise das Skateboard-Chassis von Elektrofahrzeugen, auf das verschiedene Karosserien montiert werden können.
* Die **Kosten für E-Pedale** sinken, da dasselbe Modell für viele Fahrzeugtypen verwendet werden kann.
* Da der Abstand zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe nicht mehr durch menschliche, sondern ausschließlich durch elektromechanische Kraft überwunden werden muss, kann das Luftspiel zwischen den beiden Bremselementen vergrößert werden. So entsteht ein geringerer Restreibungsmoment, wodurch die **Energieeffizienz** steigt.

Erste Distributed Brake Systeme von AUMOVIO werden voraussichtlich ab 2027 serienreif sein.

Halbtrockene Bremssysteme: der Übergang zu elektromechanischen Bremsen

Die zunehmende Flexibilität in der E/E-Architektur ebnet auch den Weg von hydraulischen („nassen“) zu elektrischen („trockenen“) Bremsen. Dabei spielen halbtrockene Bremssysteme mittelfristig eine wichtige Rolle. In aktuellen Bremssystemen wie den One-Box-Lösungen baut die Hydraulik weiterhin Druck auf, um die Bremssättel der Scheibenbremsen zu betätigen. Je weiter sich jedoch die E/E-Architektur und die Fahrzeugarchitektur entwickeln, desto spannender werden flexiblere Anordnungen. Halbtrockene Bremssysteme bremsen an der Hinterachse nicht mehr hydraulisch und haben im Vergleich zu nassen Bremssystemen mehrere Vorteile:

* **Weniger Hydraulikflüssigkeit:** An der Hinterachse ist kein regelmäßiger Wechsel der Bremsflüssigkeit erforderlich, was die Umweltverträglichkeit verbessert und den Wartungsaufwand reduziert.
* **Kürzere Bremswege:** Die Trockenbremsen an der Hinterachse ermöglichen ein schnelleres, radindividuelles Bremsen. Dies verbessert die Notbremsleistung und unterstützt die für automatisierte Fahrfunktionen erforderlichen schnellen Reaktionszeiten.
* **Keine starren Hydraulikleitungen:** Die Installation an der Hinterachse ist einfacher. Als Absicherung bleibt aber das hydraulische System an der Vorderachse bestehen.
* **Optimierte Rekuperation:** Durch den voneinander gelösten Bremsbetrieb an Vorder- und Hinterachse können Fahrzeuge das maximale Rekuperationspotenzial ausschöpfen.
* **Reduziertes Restdrehmoment:** Elektromechanische Bremsen greifen schneller als herkömmliche hydraulische Bremsen. Deshalb kann das Luftspiel größer eingestellt werden. Das Restdrehmoment ist dadurch deutlich geringer und steigert die Fahrzeugeffizienz.

Die **Dezentralisierung** und die „Zerteilung“ des herkömmlichen Bremssystems werden den Freiheitsgrad für die Fahrzeugarchitektur weiter erhöhen. Die Entwicklung im Markt bestätigt diesen Trend: AUMOVIO hat einen ersten europäischen Großserienauftrag für die Produktion eines halbtrockenen Bremssystems erhalten. Der Auftrag wurde von einem deutschen OEM-Automobilhersteller vergeben. Der Produktionsstart (SOP) ist für 2028 geplant. Das Herzstück des Systems ist ein elektromechanischer Bremssattel, der an der Hinterachse zum Einsatz kommt. Europa zieht somit nach ersten Aufträgen in Asien und Nordamerika nach und bestätigt damit die globale Dynamik elektromechanischer Bremssysteme.

Volltrockene Bremssysteme: Vollständige Dezentralisierung in integrierte Module

Die nächste Evolutionsstufe kommt vollständig ohne Hydrauliksystem aus: Alle vier Radbremsen werden elektromechanisch betätigt und sind somit vollständig trocken. Der derzeitige Fokus auf Druckerzeugung und -modulation mit herkömmlichen Domänensteuerungen ist in diesem System nicht mehr erforderlich. Ein trockenes Bremssystem besteht aus den vier trockenen Radbremsen (basierend auf Bremssätteln oder Trommelbremsen) und einer Reihe von Software-Funktionsblöcken, die aus Sicherheits- und Redundanzgründen auf mehreren der vorhandenen Hochleistungsrechner (HPC) laufen. Alternativ bieten integrierte Radsteuergeräte die für die Sicherheit erforderliche Redundanz.

AUMOVIO hat bereits einen ersten trockenen Prototyp entwickelt und ist bereit, in die Großserie zu gehen. Um die umfassende Umstellung auf trockene Bremssysteme überhaupt zu ermöglichen, müssen die einzelnen Funktionen eines Bremssystems als eigenständige Produkte in modularen, validierten und bewährten Softwareblöcken gebündelt werden, die über standardisierte Schnittstellen nach dem Prinzip der Wiederverwendbarkeit in verschiedene Fahrzeuge integriert werden können.

Ausblick: Neue Bremssysteme für die Entwicklung softwaredefinierter Fahrzeuge

Motion-Funktionen bleiben der Grundpfeiler der aktiven Fahrsicherheit. Nirgendwo wird dies deutlicher als bei Bremssystemen. Allerdings ändern neue E/E-Architekturen und Fahrzeugfunktionen wie AD die Rahmenbedingungen für eben diese Motion-Funktionen. AUMOVIO sucht aktiv den Dialog mit Fahrzeugherstellern, um die Weiterentwicklung von Bremssystemen gemeinsam voranzutreiben. Dies ist umso wichtiger, da viele Vorteile zukünftiger Systeme für Bremsfunktionen weniger bedeutend sein werden als für die Fahrzeuge selbst.

Während Funktionen flexibler werden, bleibt Sicherheit das oberste Gebot

In isolierten Funktions- und Hardwareeinheiten zu denken, reicht nicht mehr aus. Neue Bremssysteme werden modular und skalierbar sein, sodass ehemals zentralisierte Komponenten flexibler im Fahrzeug positioniert werden können. So wird beispielsweise in Elektrofahrzeugen gegen Ende des Jahrzehnts die Integration von Antriebsfunktionen und Bremssystemen erwartet. Langfristig ist auch die Zusammenführung von Radführungselementen, Federung und Dämpfung geplant. AUMOVIO entwickelt bereits eine sogenanntes Corner Moduls ist bereits im Gange und baut dazu auf seine mehr als hundertjährige Erfahrung mit sicherheitsrelevanten Systemen auf.

Dieses Know-how und die damit verbundene Philosophie fließen in die kollaborative und koordinierte Entwicklungsarbeit ein, die sogar über bisherige Domänengrenzen hinausgeht. AUMOVIO unterstützt den Fokus auf Fahrsicherheit in Gesamtsystemen mit umfassender Expertise im E/E-Architekturen, etwa bei HPCs für das automatisierte Fahren, die kombiniert mit integrierten Steuereinheiten die nötige Redundanz und Fallback-Struktur haben. Beispiele hierfür sind Radsteuergeräte, Safety and Motion Integration-Plattformen sowie HPCs für automatisiertes Fahren. So lassen sich trotz neuer Systemeigenschaften und neuer, verteilter Architekturen mehr Sicherheit, Fahrkomfort und Zuverlässigkeit gewährleisten.

Bilder und Bildunterschriften

|  |  |
| --- | --- |
| Ein Bild, das Himmel, Wolke, Gelände, Screenshot enthält.  KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.  01\_AUMOVIO\_BSR\_Vision | Elektrifizierung, Digitalisierung und Effizienzanforderungen – AUMOVIO entwickelt Bremslösungen für die sich grundlegend verändernde E/E-Architektur von Fahrzeugen. |
| 02\_AUMOVIO\_BSR\_Roadmap | Die Brake System Roadmap von AUMOVIO skizziert eine weitreichende, schrittweise Transformation, die modernste hydraulische und elektromechanische Bremssysteme umfasst. |
| 03\_AUMOVIO\_BSR\_Portfolio | In der Brake System Roadmap beschreibt AUMOVIO Lösungen für die Trends und Herausforderungen, vor denen die Automotive-Industrie steht. |
| 04\_AUMOVIO\_BSR\_One\_Box\_Highres\_DE | Die 2016 eingeführten One Box Systeme kombinierten erstmals Bremskraftverstärkung, Steuerungs- und Sicherheitsfunktionen in einer einzigen Einheit. So schufen sie Platz und Flexibilität innerhalb der Fahrzeugarchitektur für andere Komponenten. |
| 05\_AUMOVIO\_BSR\_Distributed\_Highres\_DE | Distributed Brake Systems verfügen über zwei unabhängige Aktuatoren, die immer gemeinsam zur Bremskraft beitragen. Dadurch kann AUMOVIO kompaktere, leichtere und somit effizientere Bremsen entwickeln. |
| 06\_AUMOVIO\_BSR\_Semi\_Dry\_Highres\_DE | Elektromechanische Bremsen ermöglichen die Dezentralisierung herkömmlicher Bremssysteme und dadurch eine flexiblere Fahrzeugarchitektur. |
| 07\_AUMOVIO\_BSR\_Dry\_Highres\_DE | Dry Brake Systems kommen vollständig ohne hydraulische Bremskomponenten aus. Die Bremsen befinden sich direkt an den Rädern, die Steuerfunktionen auf Softwareebene. |
| 08\_AUMOVIO\_BSR\_One-Box\_Products | Mit 100 Prozent regenerativer Bremsen leistet die MK C-Serie als aktuelles One Box System von AUMOVIO einen wesentlichen Beitrag zu sicherem, dynamischem und umweltbewusstem Fahren. Seit der Einführung im Jahr 2016 wurden die MK C 1 (links) und später die Nachfolgeserie 2 (rechts) insgesamt fast 15 Millionen Mal verkauft. |
| 09\_AUMOVIO\_BSR\_Distributed\_Products | In einem Distributed Brake System sind beide Aktuatoren – einer mit dem Vorteil einer schnellen Flüssigkeitsvolumenabgabe, der andere mit dem Vorteil der Druckerzeugung – funktional aufeinander abgestimmt. |
| Ein Bild, das Uhr enthält.  KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.    10\_AUMOVIO\_BSR\_Electric\_Caliper | Ruckelfreies Notbremsen, weniger Restdrehmoment und kein Bedarf an Bremsflüssigkeit: Der elektromechanische Bremssattel bietet gegenüber hydraulischen Bremssätteln in halbtrockenen und volltrockenen Bremssystemen eine Vielzahl von Vorteilen. |