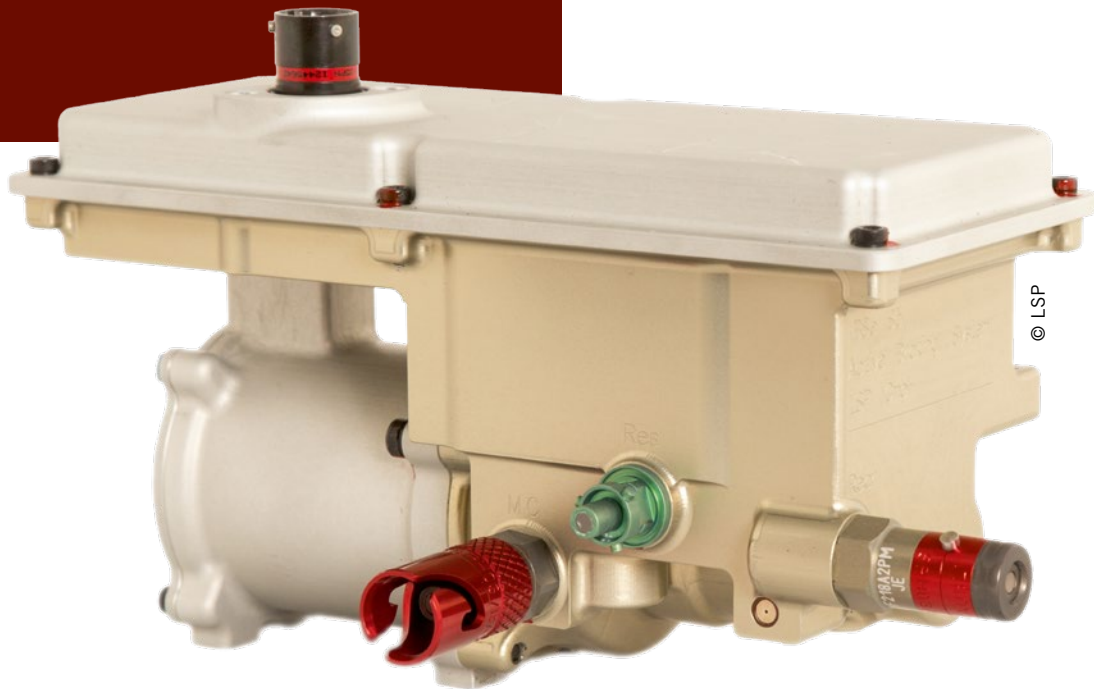


Brake-by-wire – Von der Formel E in die Vorentwicklung



AUTOREN



**Dipl.-Ing. (FH)
Christian Köglspurger**

ist Operativer Leiter der LSP GmbH
in Unterföhring.



Dipl.-Ing. Valentin Unterfrauner

ist Leiter Vorentwicklung bei der
LSP GmbH in Unterföhring.



Simon Zollitsch, M. Sc.,

ist Projektleiter Motorsport bei der
LSP GmbH in Unterföhring.

Für die in der Formel E geforderte maximale Rekuperationsfähigkeit der Fahrzeuge hat LSP Brake-by-Wire-Systeme zur Optimierung des Bremsvorgangs entwickelt. Diese werden inzwischen bei OEMs und Zulieferern für die Vorentwicklung neuer Fahrzeugarchitekturen eingesetzt.

GEÄNDERTE ANFORDERUNGEN AN DIE FAHRZEUGARCHITEKTUR

Mit der Elektrifizierung und dem autonomen Fahren ergeben sich neue Anforderungen an die Fahrzeugarchitektur, die ein weitreichendes Umdenken bei der Vernetzung von Antrieb, Lenkung und Bremse erfordern [1]. Einige Hersteller entwickeln für künftige Fahrzeuggenerationen schon heute fahrzeugeinheitliche elektrisch-elektronische (E/E) Architekturen sowie domänenunabhängige Fahrzeugsteuergeräte (Vehicle Control Units, VCUs). Doch diese lassen sich ohne geeignete Entwicklungswerkzeuge nicht umsetzen und testen. Für die Ansteuerung von Bremsvorgängen bietet das

Entwicklungsunternehmen LSP mit seinem Integrierten Bremssystem elektrisch (IBSe) ein sicher und einfach zu handhabendes Brake-by-Wire-System an, das sich für die Untersuchung und Vorentwicklung neuer Antriebs- und Fahrdynamikkonzepte eignet. Es wurde ursprünglich für die Formel E entwickelt und bietet deshalb, anders als Serienbremssysteme, die nötigen Freiheitsgrade für eine schnelle und zuverlässige Integration.

Die Formel-E-Rennserie startete 2014 und gewinnt zunehmend an Renommee im internationalen Motorsport. Damit die Rennen ohne Fahrzeugwechsel oder Ladestopp absolviert werden können, führte die FIA Ende 2018 nicht nur ein

neues Chassis mit 250 kW starkem Traktionsmotor und größerer Batterie (52 kWh) ein, sondern auch die Brake-by-Wire (BBW)-Technik. Damit soll die Rekuperationsfähigkeit der Fahrzeuge, also die Nutzung der Bremsenergie für den Antrieb, möglichst voll ausgeschöpft werden. Auf diese Weise wird in einem Formel-E-Rennen immerhin bis zur Hälfte der eingesetzten Energie während einer Rennrunde wieder zurückgewonnen.

MAXIMALE REKUPERATION ERFORDERT BRAKE-BY-WIRE (BBW)

Die Umsetzung einer optimalen Rekuperationsstrategie stellt hohe Anforderungen, da die Energiemenge, die rekuperierte werden kann, stark variiert. Zu den wichtigsten Parametern dafür zählen Ladezustand, Temperatur und Rennstrategie. Selbst während einer einzelnen Bremsung ist die Rekuperation aufgrund des spezifischen Drehzahl-Drehmomentenfeldes des Traktionsmotors nicht konstant. Zudem muss sichergestellt werden, dass im Zusammenspiel zwischen Traktionsmotor und Bremse die Fahrzeugstabilität erhalten bleibt [2]. Anfangs wurde in der Formel E die Rekuperation vor jeder Bremsung manuell eingestellt. Der Fahrer musste das vom Traktionsmotor zusätzlich aufgebraachte Bremsmoment durch ein verändertes Antreten des Pedals ausgleichen – selbst für professionelle Rennfahrer keine leichte Aufgabe.

BILD 1 zeigt exemplarisch die benötigte Aufteilung des Bremsmoments durch Reibbremse und Traktionsmotor an der Hinterachse, um eine angeforderte konstante Fahrzeugverzögerung von 2 g zu erzeugen. Auffällig ist, dass im Bereich von 125 km/h bis 25 km/h das vom Traktionsmotor erzeugte Bremsmoment ausreicht, um das Fahrzeug entsprechend der Vorgabe zu verzögern. Das Bremssystem benötigt folglich ein möglichst schnelles Ansprechverhalten zu Beginn der Bremsung und muss auch 0 bar Bremsdruck stellen können. Für die Anforderungen der Formel E entwickelte LSP das maßgeschneiderte BBW-System IBSe [3].

EINFACHES HYDRAULISCHES LAYOUT

Die Kompetenz zur Auslegung, Entwicklung und Produktion der Kernkomponenten Motor, Ventile und Elektronik hat LSP selbst im Haus, sodass es möglich war, eine ganzheitliche Systemauslegung zu realisieren. Vielschichtige Optimierungen und der gezielte Einsatz von Hochleistungswerkstoffen haben ein Systemgewicht von 1,5 kg und eine Systemgröße von lediglich 80 x 100 x 180 mm ermöglicht.

Das Bremssystem wird direkt zwischen dem Masterzylinder und den Radbremsen angeschlossen und über eine offene CAN-Bus-Schnittstelle angesteuert, **BILD 2**. Es besteht aus den integrierten Modulen Druckversorgungseinheit,

Ventilblock und Elektronik. Als Druckversorgungseinheit dient ein hydrostatischer Kolbenaktuator. Den Hydraulikkolben betätigt dabei ein gewichtsoptimierter EC-Motor über einen effizienten Kugelgewindetrieb hydrostatisch im geschlossenen Bremskreis. Leckagefreie und drosselarme Kugelsitzventile stellen die hydraulische Verbindung für die verschiedenen Betriebsmodi her.

INTEGRIERTE RÜCKFALLEBENE FÜR MAXIMALE SICHERHEIT

Um maximale Sicherheit zu gewährleisten, verfügt das IBSe über eine hydraulische Rückfallebene. Im Betriebsmodus ist die Radbremse vom Masterzylinder getrennt. Der Bremsdruck wird durch den Kolbenaktuator gestellt. Tritt ein Fehler am Bremssystem oder der VCU auf, schaltet das System innerhalb weniger Millisekunden in die Rückfallebene um. Der Kolbenaktuator wird dabei vom Hydraulikkreis getrennt und die Radbremsen direkt mit der Hydraulikkammer des Masterzylinders verbunden. Das IBSe ist dabei so ausgelegt, dass es im unbetätigten Zustand in der sogenannten Rückfallebene ist und erst zu Beginn jeder Bremsung in den Betriebsmodus geschaltet wird. Somit befindet sich das System intrinsisch im sicheren Systemzustand. Zahlreichen Erprobungen auf der Rennstrecke haben bestätigt, dass das Umschalten in die Rückfallebene auch während der Bremsung für den Fahrer problemlos beherrschbar ist.

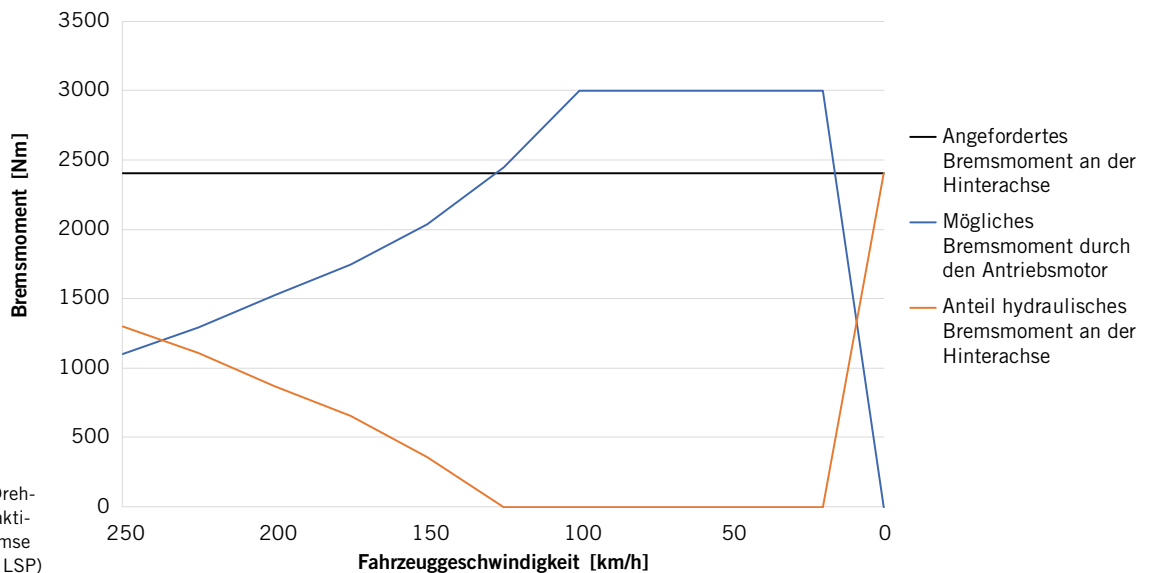


BILD 1 Aufteilung der Drehmomente zwischen Traktionsmotor und Reibbremse an der Hinterachse (© LSP)

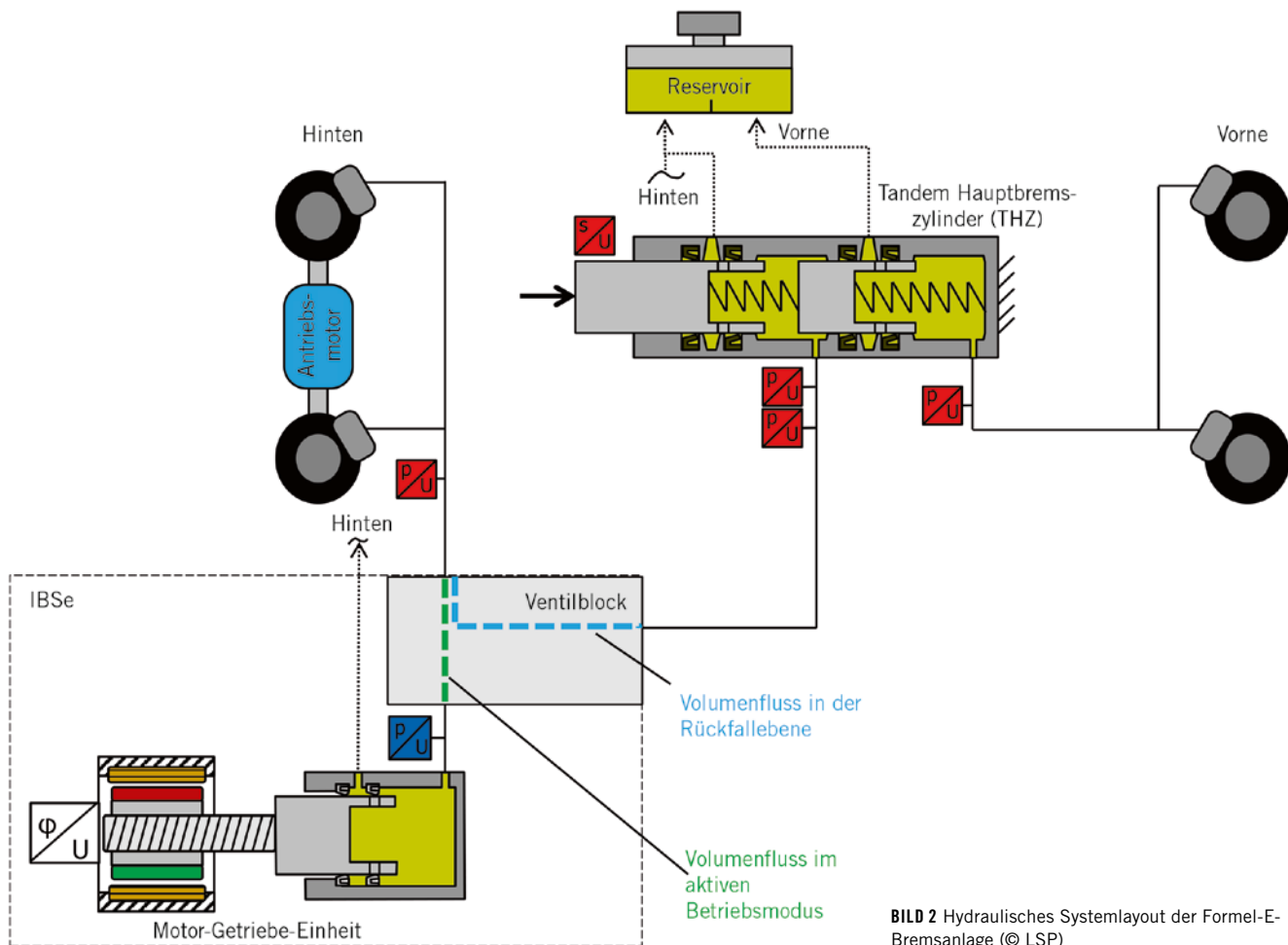


BILD 2 Hydraulisches Systemlayout der Formel-E-Bremsanlage (© LSP)

KONSTANTES VERZÖGERUNGSVERHALTEN UND PEDALGEFÜHL

Konventionelle Bremssysteme ermöglichen es nur eingeschränkt, den Bremsdruck vom Pedaldruck zu entkoppeln, beziehungsweise an beiden Achsen unterschiedliche Drücke zu stellen. Soll bei einer Bremsung viel Energie über den Traktionsmotor rekuperiert werden, würde die betreffende Achse überbremsst. Dies führt zu einer Vertrimmung der Bremsbalance und einer reduzierten Bremsleistung, da das Bremspotenzial des Fahrzeugs nicht mehr voll ausgeschöpft werden kann. Um im Rahmen der Fahrzeugstabilität zu bleiben, ist es somit nicht möglich, das volle Rekuperationspotenzial des Traktionsmotors auszunutzen. Dies sind sowohl im Motorsport als auch im Straßenverkehr inakzeptable Einschränkungen.

Beim IBSe hingegen findet eine Entkopplung zwischen Fahrer und Radbremse statt. Auf diese Weise kann das

System den Bremsdruck vollkommen variabel zwischen 0 bar und Maximaldruck modellieren. Die VCU berechnet in Echtzeit aus dem Pedaldruck die vom Fahrer gewünschte Verzögerung, spaltet diese in Drehmomente für den Traktionsmotor und die Reibbremse auf und schickt entsprechende Steuerbefehle an die jeweiligen Aktoren. So kann das volle Rekuperationspotenzial des Traktionsmotors ausgenutzt werden und gleichzeitig die gewünschte Fahrzeugbremsbalance und Bremsleistung aufrechterhalten werden. Für den Fahrer bleiben das Pedalgefühl und die Fahrzeugverzögerung konstant und vor allem unabhängig davon, wie stark der Traktionsmotor eingreift.

In der Formel E treibt, so wie in den meisten Fahrzeugkategorien, der Traktionsmotor nur eine Achse an. Somit wird das BBW-System auch nur in den betreffenden Bremskreis installiert. Der zweite Bremskreis bleibt konventionell direkt an die entsprechende Kammer im Masterzy-

linder angeschlossen und erzeugt somit das Pedalgefühl für den Fahrer. Falls das Fahrzeug über zwei elektrisch angetriebene Achsen verfügt und achsweise Bremsmomentverteilung erfordert, wird ein IBSe in Verbindung mit einem Pedalweg-Simulator eingesetzt.

HOCHDYNAMISCHE DRUCKREGELUNG UND INTEGRIERTE DIAGNOSEN

Als Regelstrategie wird die proprietäre Kolbendruck-Regelung (Piston Pressure Control, PPC) eingesetzt [4, 5, 6]. Kernbestandteile der PPC-Regelung sind die Nutzung der Druckvolumenkennlinie der Radbremsen sowie des Stroms des Elektromotors für eine Druckschätzung. Die PPC-Regelung wurde über 15 Jahre optimiert und enthält nun selbstkalibrierende Modelle, sodass auch bei Veränderungen im Betrieb (Temperatur, Verschleiß) der Steller immer hochdynamisch und präzise den gewünschten

Bremsdruck regelt. **BILD 3** zeigt das Bode-Diagramm der IBSe-Einheit für Drücke zwischen 10 und 70 bar (60 bar Amplitude peak to peak). Druckverläufe mit bis zu 10 Hz lassen sich mit einer Dämpfung von unter 0,5 dB und einem Phasenverzug von unter 45° abbilden. In der Anwendung bedeutet dies, dass mit einem maximalen Gradienten von 860 bar/s innerhalb von 110 ms ein Druckaufbau von 0 bar auf 80 bar gestellt werden kann. Dafür benötigt das IBSe in der Spitze 450 W. Da die Leistungsaufnahme zwischen den Bremsungen lediglich 7,5 W beträgt, kommt das System auf weniger als 15 W durchschnittliche Leistungsaufnahme während eines Formel-E-Rennens.

Kolbenaktuatorsysteme liefern in Echtzeit und ohne zusätzliche Sensoren eine Vielzahl an Informationen über Druck und Volumenaufnahme im Hydraulikkreis. Dies bringt bedeutende Vorteile für die Diagnosefähigkeit und Sicherheit des Bremssystems mit sich. So können beispielsweise der Verschleiß- und Entlüftungszustand oder gegebenenfalls Leckagen des Bremssystems online erkannt werden. Dies ist insbesondere bei zukünftigen Anwendungen wie etwa beim autonomen Fahren essenziell.

VARIABLE EINSETZBAR IN DER VORENTWICKLUNG

Die Kombination verschiedener BBW-Module ermöglichen eine Erweiterung

des Systems und damit eine deutliche Erhöhung des Funktionsumfangs, **TABELLE 1**. Je nach Anzahl der verwendeten Bremssysteme kann der Druck an einer Achse, an jeweils zwei Achsen oder radindividuell gestellt werden.

Durch die hochdynamische Druckmodulation können selbst Fahrzeugstabilitätsfunktionen wie Traktionskontrolle (Traction Control, TC) und elektronische Stabilitätskontrolle (Electronic Stability Control, ESC) mit allen relevanten Unterfunktionen präzise abgebildet werden. Ein weiterer Anwendungsfall sind Untersuchungen auf dem Gebiet der Drehmomentverteilung (Torque Vectoring, TV) sowie Lenkung durch radindividuelle Bremsengriffe, zum Beispiel als Redundanz zur elektrischen Servolenkung (Electric Power Steering, EPS).

Die klar strukturierte und vor Fehlbedienung geschützte CAN-Bus-Schnittstelle erlaubt eine schnelle und unkomplizierte Anbindung an das bestehende Fahrzeugkommunikationsnetzwerk. Damit einher geht eine Auflösung der klassischen Kontrollstruktur in einem Fahrzeug hin zu einem zentralen Fahrzeugsteuergerät, das alle vorhandenen Subsysteme wie Bremse, Lenkung oder Antrieb geeignet ansteuert [6, 7].

Der Einbau des IBSe-Systems ins Fahrzeug ist einfach, da es kein eigenes Pedalinterface besitzt, sondern lediglich in den bestehenden Bremskreis per hydraulischer Schnellkuppler eingefügt wird. Es

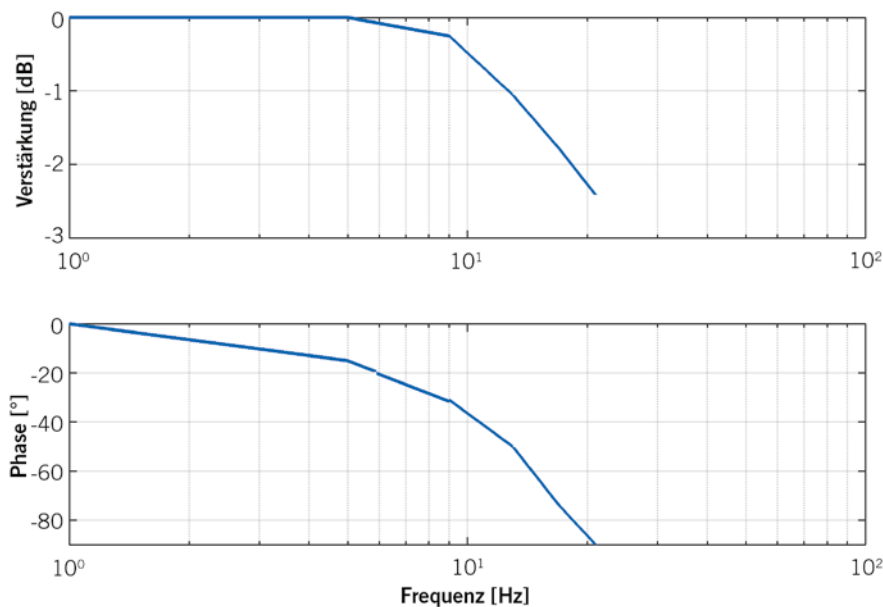


BILD 3 Bode-Plot des IBSe-Bremssystems bei Druckanforderungen von 10 bar auf 70 bar (© LSP)

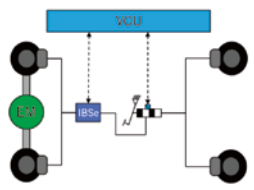
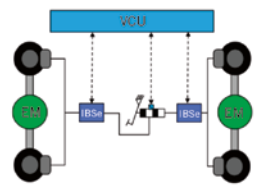
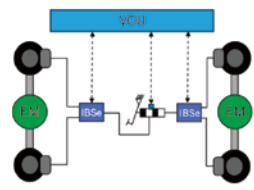
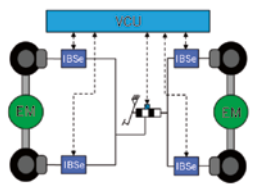
Systemlayout	Bremskraftverstärkung, EBD	Bremsenblending	Antriebssystem	ESC, TC, Torque-Vectoring
a) 	✓	1 Achse	1 x Antriebsmotor	–
b) 	✓	2 Achsen	1-4 x Antriebsmotor	–
c) 	✓	2 Achsen oder 4 Räder	1-4 x Antriebsmotor	✓
d) 	✓	2 Achsen oder 4 Räder	1-4 x Antriebsmotor	✓

TABELLE 1 Übersicht verschiedener Bremssystem-Layouts auf IBSe-Basis (© LSP)

müssen also keine aufwendigen Umbauten an der Spritzwand vorgenommen werden. Das ursprünglich für die Formel E entwickelte Bremssystem IBSe ist damit ein gutes Beispiel für den Transfer vom Rennsport hin zur Serienentwicklung. Erste Applikationen in den Bereichen hochautomatisiertes Fahren, Entwicklung Antriebsarchitekturen, Fahrdynamik oder fahrzeugeinheitliche E/E-Architektur wurden bereits erfolgreich umgesetzt.

FAZIT UND AUSBLICK

Derzeit auf dem Markt verfügbare Serienbremssysteme können die spezifischen Anforderungen im Motorsport und der Vorserienentwicklung neuer Antriebs- und Fahrdynamikkonzepte nicht darstellen. LSP bietet mit dem IBSe eine schnell zu integrierende, fehlersichere Lösung an, die insbesondere durch seine offene Schnittstelle besticht. In Zukunft ermöglicht ein bereits in Entwicklung befindliches BBW-Baukastensystem schnelle und flexible Entwicklungen von neuen

Fahrdynamikregelstrategien und Redundanzkonzepten für das hochautomatisierte und autonome Fahren.

LITERATURHINWEISE

- [1] Zerfowski, D.; Buttle, D.: Paradigmenwechsel im Automotive-Software-Markt. In: ATZ 121 (2019), Nr. 9, S. 28-34
- [2] Breuer, B.; Bill, K. H.: Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 2006
- [3] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglsperger, C.; Winzer, R.; Prüll, C.: Bremsvorrichtung, insbesondere für elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge. Internationale Patentanmeldung WO2018215397A1, Anmeldung: 22.5.2018
- [4] Leiber, T.; Leiber, H.: Bremssystem mit elektromotorisch angetriebenem Kolben-Zylinder-System. Patente DE102005018 649 B4, DE 102005063659 B4, Anmeldetag: 21.4.2005
- [5] Leiber, T.; Leiber, H.: Druckmodulatorsteuerung. Patent DE 10 2005 055 751 B4, Anmeldetag: 21.11.2005
- [6] Leiber, T.; Köglsperger, C.; Unterfrauner, V.: Modulares Bremssystem mit integrierten Funktionen. In ATZ 113 (2011), Nr. 6, S. 466-473
- [7] Borovnik, C.: Die fahrende Forschungsplattform für Komponenten. Online: <https://engineered.thyssenkrupp.com/modular-research-platform-die-fahrende-forschungsplattform/>, aufgerufen am 7.11.2019



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com

