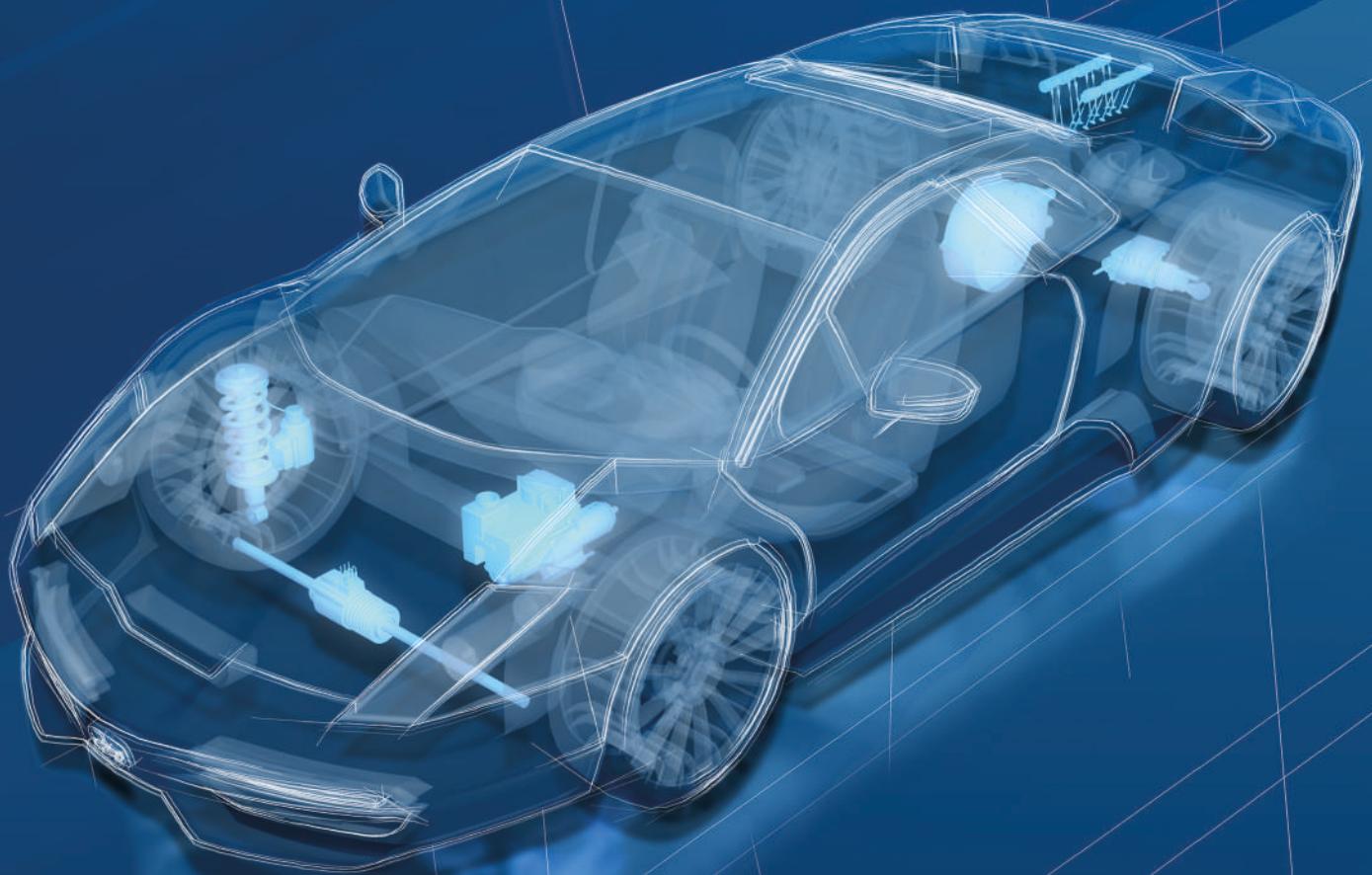


ATZ extra



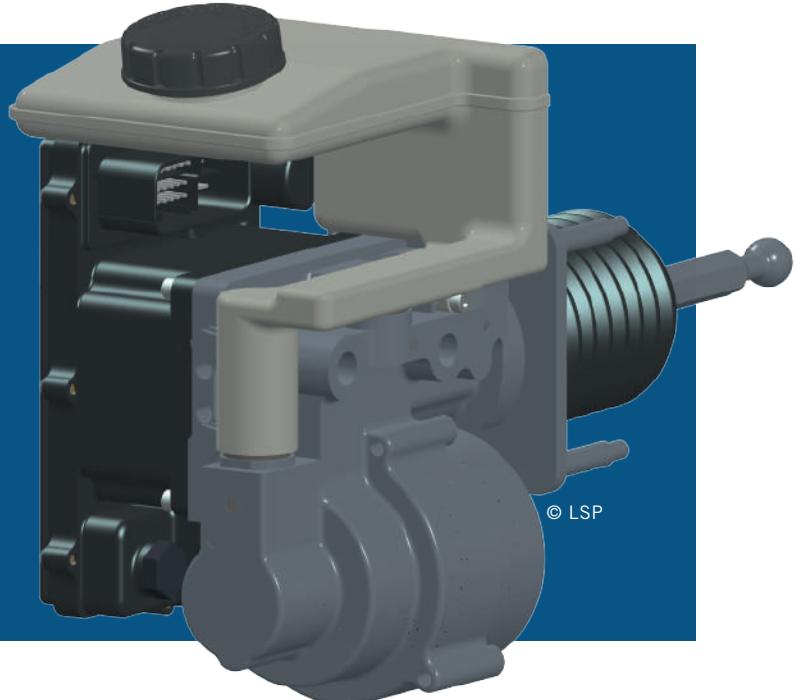
Impact of Automated Driving on Future Brake Systems

Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf zukünftige Bremssysteme

自动驾驶对未来制动系统的影响

今後のブレーキシステムに対する自動運転の影響

Brake Boosters for Automated Driving



© LSP

AUTHORS



Dr.-Ing. Thomas Leiber
is Chief Executive Officer of
LSP GmbH in Unterföhring
(Germany).



Heinz Leiber
is Consultant of IPGate AG
in Freienbach (Switzerland).



Dr.-Ing. Anton van Zanten
is Consultant of IPGate AG
in Freienbach (Switzerland).

With automated driving, ESC systems and electro-mechanical brake boosters become even more important than before. The engineering services provider LSP faces up to this trend and compares electro-mechanical brake boosters considering an increasing degree of SAE automation levels. As a new development, the compact X-Boost brake booster, featuring a very light and narrow design, is presented in detail for the first time.

DISRUPTIVE CHANGES

The automotive industry is undergoing a disruptive process of change. In addition to the increasing market penetration of electric vehicles, various SAE levels of automated driving will be realized from level 3 (Highly Automated Driving, HAD) and level 4 (Fully Automated Driving, FAD) up to level 5 (Autonomous Driving, AD), with the requirements on passenger car brake systems increasing at each level of automation.

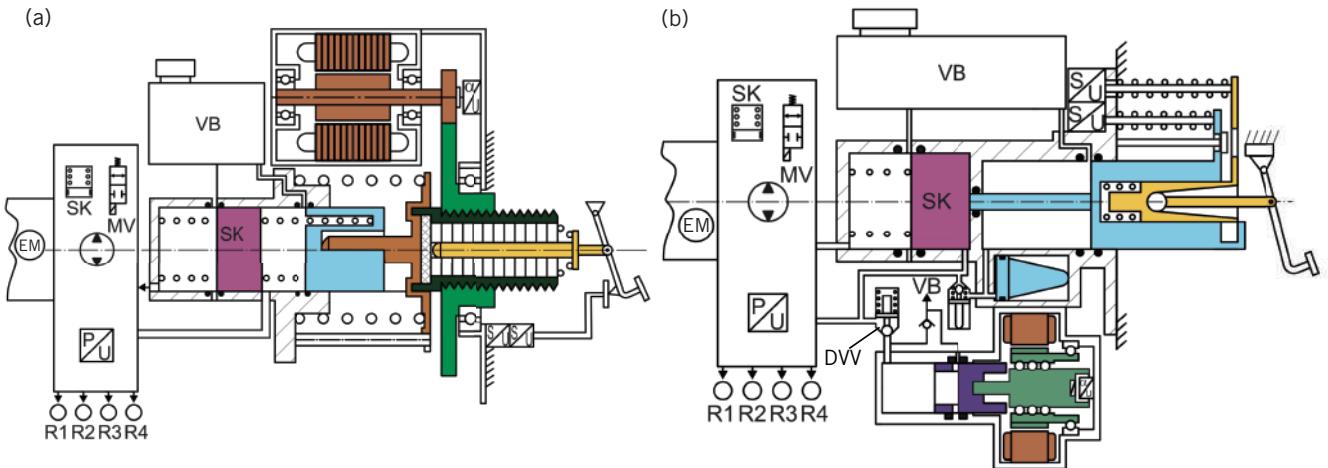
This trend is also accelerating the development of new brake systems. After initial solutions [1, 2, 3] in 2005, the replacement of vacuum brake boosters by electro-mechanical brake boosters (e-boosters) started 2013 with the launch of so-called two-box solutions which included an electric follow-up booster together with an ESC unit [4], followed in a timely manner by the first integrated one-box systems with pedal simulator in

2017 [5]. Solutions for HAD are currently being developed for a planned market launch in 2021.

The newly designed compact X-Boost brake booster, **TITLE FIGURE**, is currently being developed by the company LSP Innovative Automotive Systems GmbH in collaboration with partners to meet HAD requirements. The principal structure of this booster is explained here for the first time and compared with an established e-booster with follow-up control [4]. Some critical failure modes will be addressed. In addition, the relevant topics on reliability, diagnosis possibility and full and partial redundancies will be discussed.

E-BOOSTER SOLUTIONS AS SYSTEM 1 AND SYSTEM 2

A comparison is meant to illustrate the advantages and disadvantages of brake boosters of different types: **FIGURE 1** (a) shows as system 1 the e-booster with fol-



EM = electric motor, SK = secondary piston, MV = solenoid valve, P/U = pressure sensor, VB = reservoir, R1 to R4 = brake wheel cylinders, DVV = isolation valve

FIGURE 1 Comparison of the systems: (a) system 1 as e-booster with follow-up control and ESC unit; (b) system 2 as e-booster with pedal simulator and standard ESC unit (© LSP)

low-up control which is controlled by an electric motor based on the measurement of the difference between pedal tappet travel and piston travel. The system 1 uses elastic elements; its control system is described in [4, 6, 7]. It is currently available on the market as a two-box solution in combination with an ESC unit.

FIGURE 1 (b) shows an e-booster with a pedal simulator, the X-Boost, as system 2. The e-booster is controlled by an electric motor based on the measurement of the pedal tappet travel. The electric motor acts on a piston-cylinder unit, which is situated parallel to the Master Cylinder (MC) of the brake. The MC includes an auxiliary piston with a hydraulic connection to a pedal simulator, as well as a secondary piston which separates the two brake circuits, balances the pressure and enables single circuit Pressure Supply (PS). Due to a smaller auxiliary piston diameter than that of the secondary piston, a higher brake pressure is achieved in the mechanical fallback mode. System 2 is described in detail in [8] and is used as a two-box solution with a standard ESC unit. Another e-booster with pedal simulator, but different MC concept, is illustrated in [9].

INFLUENCE FACTORS ON VOLUME DEMAND AND PEDAL CHARACTERISTICS

The dimensioning of the brake system is, on the one hand, characterized by the

pressure-volume characteristic with air gap of the disc brake and, on the other hand, determined by influence factors such as air bubbles in the brake fluid. The contributions of the influence factors of an intact brake system at a brake pressure of 100 bar are on the order of 40 % of the Tandem-MC (TMC) volume limit, **FIGURE 2**. The contributions of air bubbles and friction spread can be increased by vapor bubbles or fading in case of overheated brakes (dashed lines in **FIGURE 2 (a)**). The MC and the PS must be sized accordingly. The TMC of system 1 is designed in such a way that the wheel locking pressure of 100 bar is reached at about 65 % of the maximum pedal travel (base volume). With the influence factors of the brake, the pedal travel is longer (dashed curve in **FIGURE 2 (b)**). Just below 100 bar the volume limit of the TMC is reached. With system 2, the pedal characteristics are independent of these influence factors and also independent of other influences such as PS failure, brake circuit failure or ESC failure as well as regenerative braking and torque vectoring.

The PS volume of system 2 is designed for wheel locking pressure. At larger volume demand, brake fluid volume is refilled. When refilling, the PS valve (DVV) is closed and the piston of the PS is pulled in the opposite direction to the pressure build-up. Thus, several vehicle types can be covered with a single MC size.

FAILURE MODES

Some critical failure modes of both systems, which must be considered in any concept of a brake system, are illustrated in **FIGURE 3** as F1 to F9. Both systems have in common the feature of a hydraulically closed solution in ABS operation, which is considered beneficial. However, a detailed analysis shows that there are significant differences in the effect of failures. For instance, at failure condition F6 a pedal fall through does not occur for system 2. In addition, failure condition F3 does not affect the pedal characteristics for system 2. When designing the systems, the aspects of reliability, diagnosis as well as redundancies and partial redundancies have to be considered and taken into account.

CONSIDERATIONS ON RELIABILITY AND DIAGNOSIS OF FAILURES

The development processes of nuclear power plants and of aerospace are applied to the development of brake systems for automation levels HAD to AD, since the highest safety levels are needed for AD. The usually relevant fallback solutions "fail silent" and "fail safe" will be replaced by "fail operational" with the start of the HAD phase. This means that in the event of a failure or of a partial failure, the basic functionality must be preserved.

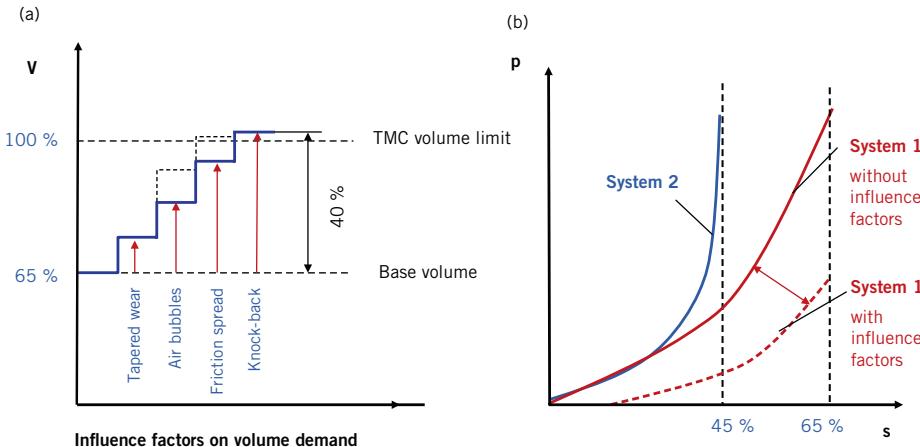


FIGURE 2 Influencing factors on volume demand and pedal characteristics for the systems 1 and 2:
(a) for volume of the brake; (b) for brake pressure (© LSP)

While hardware and software development is subject to clear standards in the analysis method of failures, these do not yet exist in the area of mechanics and hydraulics. The basic methodology and approach is known. The aim is to create a functional and safety concept with a definition of diagnosis and distinguish between active and passive failures. In the case of hardware and software, ISO 26262 is applied. This involves the use of proven tools and sufficient experience with failure rates in order to prepare the analyses.

In mechanics and hydraulics, the emphasis is on the application of FMEA and FTA. Failure analysis considers failures and their effects using failure rates

of components and systems, expressed in ppm per vehicle life time. A problem is a new or modified design, if failure rates are not yet available. In order to meet the high safety standards, diagnosable redundancies for important functions are required.

TABLE 1 shows possible failures, problems with their effects and diagnosis possibilities of some specific critical components of brake systems such as piston seals, solenoid valves and ball screws. With open brake systems, the wheel circuit is hydraulically connected to the reservoir by opening the outlet valve during ABS control. Undetected leaks in valves and seals (dormant failures) require special consideration with open

brake systems. If a solenoid valve with a dormant failure, for example, connects both brake circuits, then a brake circuit failure leads to a PS failure and, as a worst-case scenario, the entire brake system may fail. For this reason, closed brake systems are preferable. In addition to these hydraulic and mechanical failures, failures in the vehicle electrical system are of great importance, as will be discussed in the following.

REDUNDANCIES IN THE VEHICLE ELECTRICAL SYSTEM

The vehicle electrical system gains importance in the HAD to AD levels. The following two main sources of failures have to be considered:

- the electric connection to the energy distributor box with protection against short circuit
- the availability of the power supply, especially while driving.

TABLE 2 shows four possible variants of the vehicle electrical system connection for redundant systems. Variant 3 shows a solution in which the redundancy is limited to specific functions and their components. It is a pragmatic way to reduce cost.

A redundant vehicle electrical system [11], **TABLE 2**, increases reliability. Since the non-redundant connector deemed not reliable enough due to many contacts and electrical connections, various OEMs have already introduced a redundant connector. On the other side, the vehicle electrical system is considered to be very reliable during driving [11].

EVOLUTION OF BRAKE SYSTEMS

As a result of the increasing automation of driving, brake systems are changing with regard to the modules and functions 1 to 7 as shown in **TABLE 3**. Depending on the requirements of the OEM and also of the authorities, the functionality of the modules 1 to 5 must be fully or partially redundant in order to achieve the required safety level.

At level 2 (DAS), no redundant pressure supply is required. At this stage, redundant pedal sensors are already state of the art. A variation of pedal feel will still be accepted at this level.

With level 3 (HAD), a redundant pressure supply with sufficient volume delivery is mandatory for the first time due to

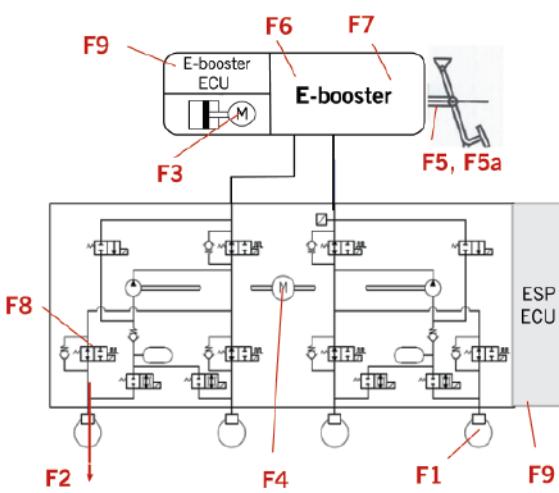


FIGURE 3 Main failure mode possibilities of an e-booster brake system with ESC (© LSP)

Critical failures

- F1: Leak of a brake wheel circuit
- F2: Leak of a brake circuit
- F3: Locking of the e-booster drive at pedal apply or pedal release
- F4: Failure of the ESC PS
- F5: Failure of a pedal travel sensor 5 or 5a
- F6: Leak of an MC seal
- F7: Leak of a pedal simulator seal
- F8: Failure of an inlet or outlet valve
- F9: Partial or complete ESC ECU failure

the influence factors explained before. In addition, as already pointed out, connecting the brake circuits in open brake systems with a reservoir (VB) must be avoided, and pedal simulators have to be exploited because of the benefits in pedal feel and volume demand. Additionally, the e-booster must also inherit an ABS pressure modulation function in the event of an ESC failure in order to ensure a high vehicle deceleration at all times. In a first step, an ABS select-low control will be implemented.

With level 4 (FAD), three-fold redundancies are expected for sufficient system availability, with the rule “2 out of 3” for the pedal sensors. Also, a pedal simulator is mandatory due to the increasing recuperation performance requirements of e-vehicles and the lack of acceptance of the change in pedal characteristics, since FAD can be operated for a longer period of time and because at the transition to piloted driving the driver is not prepared for a change in pedal characteristics. A monitoring of the pressure supply by a redundant pressure sensor shall be provided. Moreover, a redundant ABS function with at least axle-individual control will be required, and partial redundancies will be introduced. Brake systems with closed circuit will show safety benefits during ABS operation.

At level 5 (AD), on the one hand pedal travel sensors and pedal simulators and their characteristics are no longer relevant. On the other hand, the remaining components and partial systems will require triple redundancy, with the rule “2 out of 3” in the case of sensors, ESC unit and partial ECU, or multiple redundancy.

SUMMARY AND OUTLOOK

Brake systems for level 3 (HAD), and more often for level 4 (FAD), must be redundant or partially redundant. In the event of a failure, a high vehicle deceleration together with a reduced ABS function must be guaranteed. Also, construction volume and shorter length of the aggregate at the fire wall is becoming increasingly important.

In the HAD phase, different systems compete such as two-box including an e-booster with a pedal simulator and an ESC unit, or one-box systems including a

Component	Failure/problem	Effect of the failure/problem	Diagnosis possibility
Piston seal	General leak of seal; tight at small pressure, but leak at large pressure	Failure of the piston function; resulting in pedal simulator failure with the travel simulator (resulting in PS failure with the PS)	Diagnosis of the redundant seal (dashed in the figure) is not possible (leak is a dormant failure)
Solenoid valve	No reliable closing of the valve by dirt particles at the valve seat	At the outlet valve of an open brake system, this leads to a brake circuit failure; at the bypass valve of an open brake system, this leads to a failure of the PS	Leak diagnosis is not possible if the valve is open (leak is a dormant failure)
Ball screw	Dirt particles enter the track of the balls	Locking of the screw	Diagnosis is possible, but there is no solution if it occurs sporadically

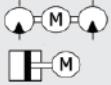
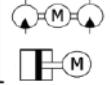
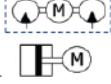
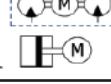
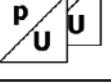
TABLE 1 Examination of failure modes of mechanical and hydraulic parts and of diagnosis possibility (© LSP)

Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4
(A) (B) 	(A) (B) 	(A) (B) 	(A)
System A and B connected to separate vehicle electrical systems	System A and B are connected to both vehicle electrical systems, separation by separation switches	System A with partly redundant ECU which is connected to vehicle electrical system 2	System A and B with redundant ECU connected to both vehicle electrical systems
No redundancy effect on system A and B	Redundancy effect on system A and B, cost and voltage drop must be considered	Redundancy effect on partial system and cost effective solution if partial function of system A is redundant to B	Full redundancy on system level and vehicle electrical systems, highly elaborate solution

TABLE 2 Rating of different variants of redundant or partial redundant systems A and B (© LSP)

pedal simulator and a reduced additional pressure control aggregate. With FAD, a redundant integration into a one-box unit or an optimization of the two-box

modules will follow. Additionally, a changeover to pure brake-by-wire solutions with new actuation concepts will be started.

	Module/function						
SAE level*	Pressure supply 1	Pedal travel sensor 2	Pressure sensor 3	Redundant ABS 4	Pedal simulator 5	Pedal feel 6	Refill 7
Level 2 (DAS)							
Level 3 (HAD)							
Level 4 (FAD)							
Level 5 (AD)		-			-	-	-

*Driver Assistance Systems (DAS), Highly Automated Driving (HAD), Fully Automated Driving (FAD), Autonomous Driving (AD)

TABLE 3 Modules (1-5) and functions (6-7) of brake systems at different levels of automation DAS to AD (© LSP)

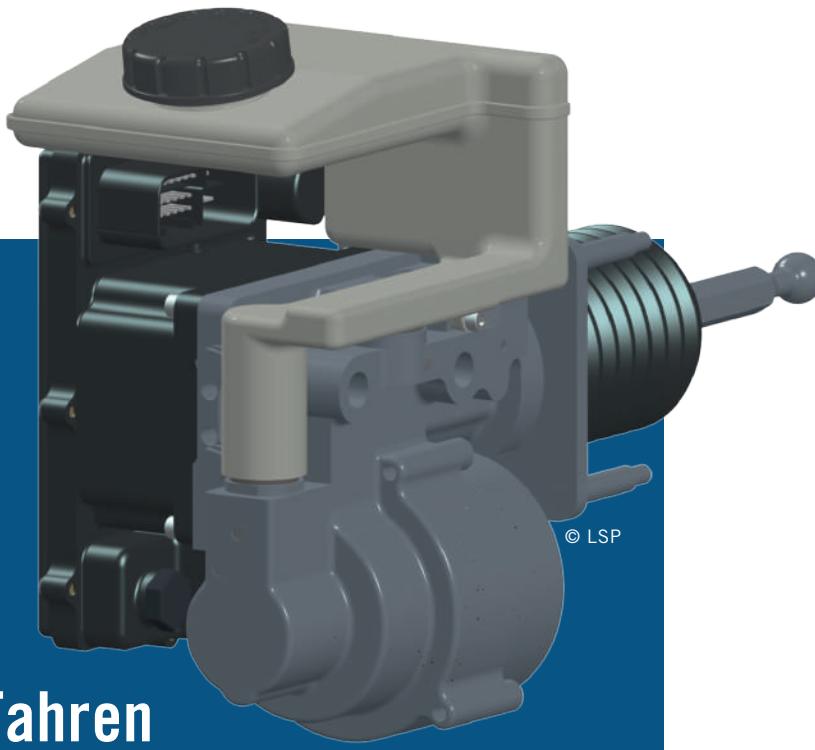
X-Boost and ESC [8] meet HAD requirements and, in addition, a modular extension with small modifications is already defined for FAD. Due to the considerable technical challenges of driverless driving, the development of brake systems for AD will need some more time. However, new innovative solutions with the features of closed brake systems, redundancy of the ABS operation without functional limitations, including the use of the parking brake in the system solution as well as system-related E/E partial and full redundancies are already conceptionally available.

From 2021 onwards, integrated one-box systems [5] as well as two-box solutions [4, 10] will coexist with different equipment rates in the main automotive markets of

Europe, USA and China and achieve large quantities. ESC is assumed to be standard, since ESC systems are mandatory in every new vehicle in India from 2022 onwards.

REFERENCES

- [1] Witte, B.; Bartheneier, T.; Lang, H.; Witte, K.; Ohlig, B.: Vorrichtung und Verfahren zur elektromechanischen Bremsunterstützung. European Patent Settings EP 1 896 309 B1, filing date: May 05, 2006
- [2] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglspurger, C.: IBS – Integrated Brake System. Tagung der modernen Industrie, June 15, 2010
- [3] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglspurger, C.: Modular Brake System with integrated Functionalities. In: ATZworldwide 6/2011, pp. 20-25
- [4] Kunz, A.; Kunz, M.; et al.: Electromechanical Brake Booster for all Drive Concepts and Automated Driving. In: ATZworldwide 4/2018, pp. 58-61
- [5] Breuer, B.; Bill, K.-H. (Ed.): Bremsenhandbuch. Chapter 20.3: Integriertes Bremssystem MK C1. Wiesbaden: Springer Vieweg, 5th edition, 2017
- [6] Weiberle, R.; Zahn, T.; et al: Bremskraftverstärker sowie Verfahren und Vorrichtung zu dessen Betrieb. German Patent Settings DE 10 2010 001 939 B4, filing date: February 15, 2010
- [7] Leiber, H.; Leiber, T.; Unterfrauner, V.: Bremsystem ohne Wegsimulator. German Patent Settings DE 11 2009 004 636 B4, filing date: February 03, 2009
- [8] Leiber, H.; Leiber, T.; et. al.: Bremssystem. International Patent Settings WO2018/233854A1, publication date: December 27, 2018
- [9] Biller, H.; Stauder, P.; Besier, M.; Feigel, H.-J.: Bremsanlage für Kraftfahrzeuge. European Patent Settings EP 2699459 B1, filing date: February 26, 2014
- [10] Leiber, T.; Köglspurger, C.; Hecker, C.: X-Boost und IBS-Gen3: Herausforderungen und Lösungsansätze für zukünftige Bremssysteme. VDI-Wissensforum, Hanover (Germany), October 25, 2017
- [11] Prechler, R.: Redundante Bordnetze für Hochautomatisiertes Fahren. 22nd International Automobil-Elektronik Kongress, Ludwigsburg (Germany), June 19-20, 2018



Bremskraftverstärker für das automatisierte Fahren

AUTOREN



Dr.-Ing. Thomas Leiber
ist Geschäftsführer der
LSP GmbH in Unterföhring.



Heinz Leiber
ist Berater der IPGate AG
in Freienbach (Schweiz).



Dr.-Ing. Anton van Zanten
ist Berater der IPGate AG
in Freienbach (Schweiz).

Durch das automatisierte Fahren werden ESP-Systeme und elektromechanische Bremskraftverstärker noch wichtiger als zuvor. Der Entwicklungsdienstleister LSP stellt sich diesem Trend und vergleicht elektromechanische Bremskraftverstärker unter dem Aspekt eines zunehmenden Grads der SAE-Automatisierungsstufen. Als Neuentwicklung wird erstmals der kompakte Bremskraftverstärker X-Boost näher vorgestellt, der sehr leicht und schmal baut.

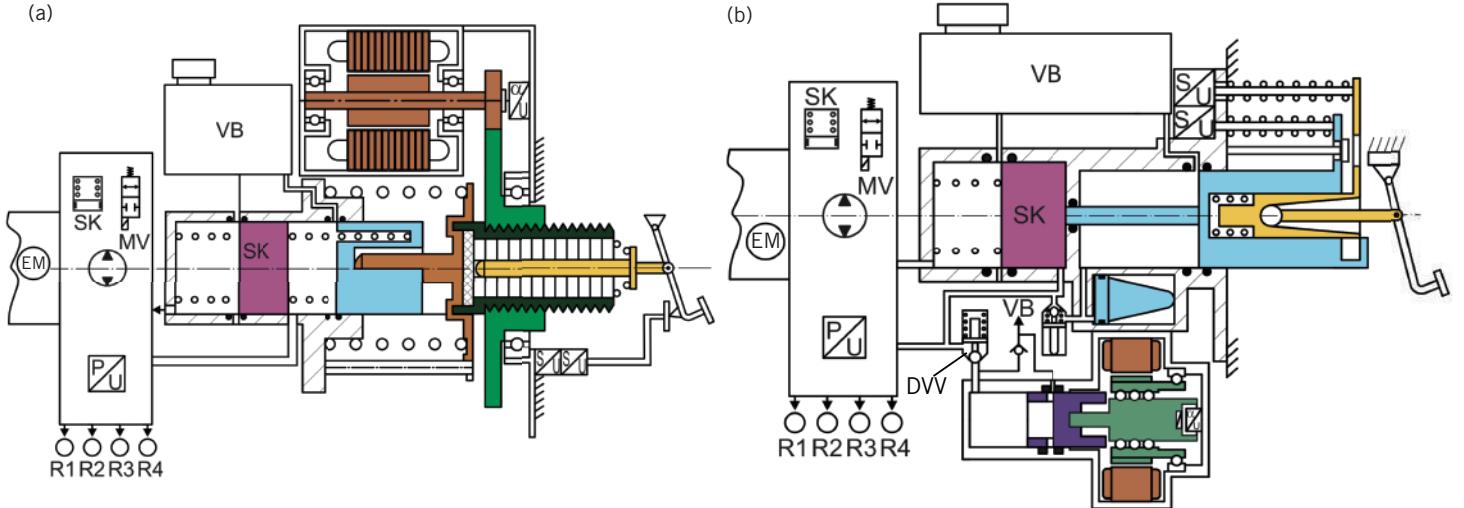
DISRUPTIVE ÄNDERUNGEN

Die Automobilindustrie befindet sich in einem disruptiven Veränderungsprozess. Neben der zunehmenden Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen werden verschiedene SAE-Stufen des automatisierten Fahrens von Stufe 3 (hochautomatisiertes Fahren, HAD) über Stufe 4 (vollautomatisiertes Fahren, FAD) bis Stufe 5 (autonomes Fahren, AD) durchlaufen, wobei bei jeder Stufe die Anforderungen an ein Pkw-Bremssystem steigen.

Dieser Trend forciert auch die Entwicklung neuer Bremssysteme. Die Ablösung von Vakuumbremsskraftverstärkern durch elektromechanische Bremskraftverstärker (E-BKV) begann 2013 – nach ersten Lösungsansätzen im

Jahr 2005 [1, 2, 3] – mit der Markteinführung von sogenannten Two-Box-Lösungen mit elektrischen Folgebremsskraftverstärkern und zusätzlicher ESP-Einheit [4], zeitnah gefolgt durch erste integrierte One-Box-Systeme mit Pedalsimulator im Jahr 2017 [5]. Aktuell werden Lösungen für eine geplante Markteinführung des HAD 2021 entwickelt.

Der neu entwickelte kompakte Bremskraftverstärker X-Boost, **TITELBILD**, wird aktuell für die HAD-Anforderungen vom Unternehmen LSP Innovative Automotive Systems GmbH in Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern entwickelt. Dieser kompakte Verstärker wird im prinzipiellen Aufbau hier erstmalig erläutert und mit einem etablierten Folgebremsskraftverstärker [4] verglichen. Dabei werden einige kritische Ausfall-



EM = Elektromotor, SK = Schwimmkolben, MV = Magnetventile, P/U = Drucksensor, VB = Vorratsbehälter,
R1 bis R4 = Radbremszylinder, DVV = Sperrventil

BILD 1 Vergleich der Systeme: (a) das System 1 als elektronischen Folgebremsskraftverstärker mit ESP-Einheit; (b) das System 2 als E-BKV, den X-Boost, mit Pedalsimulator und Standard-ESP-Einheit (© LSP)

möglichkeiten aufgezeigt. Zudem werden die relevanten Themengebiete Ausfallsicherheit, Diagnosemöglichkeit sowie Voll- und Teilredundanzen diskutiert.

E-BKV-LÖSUNGEN ALS SYSTEM 1 UND SYSTEM 2

Ein Vergleich soll die Vor- und Nachteile der Systeme von Bremskraftverstärkern unterschiedlicher Ausführungen darlegen. **BILD 1** (a) zeigt als System 1 den elektronischen Folgebremsskraftverstärker, der durch einen Elektromotor auf Basis der Differenzwegmessung zwischen Pedalweg und Kolbenweg geregelt wird. Das System 1 nutzt elastische Elemente, und seine Steuerung ist in [4, 6, 7] beschrieben. Es wird aktuell als Two-Box-Lösung in Kombination mit einer ESP-Einheit im Markt eingesetzt.

BILD 1 (b) zeigt als System 2 einen E-BKV mit Pedalsimulator, den X-Boost. Der E-BKV wird durch einen Elektromotor auf Basis der Messung des Pedalwegs gesteuert. Der Elektromotor treibt eine Kolben-Zylinder-Einheit an, die parallel zum Hauptbremszylinder (HZ) angeordnet ist. Der HZ enthält einen Hilfskolben, der mit einem Pedalsimulator hydraulisch verbunden ist, sowie einen Schwimmkolben, der die beiden Bremskreise trennt, den Druckausgleich

schafft und eine einkreisige Druckversorgung (DV) erlaubt. Durch einen kleineren Durchmesser des Hilfskolbens zu dem des Schwimmkolbens ist in der mechanischen Rückfallebene ein höherer Bremsdruck erreichbar. Das System 2 ist in [8] detailliert beschrieben und wird als Two-Box-Lösung mit einer Standard-ESP-Einheit eingesetzt. Eine weitere E-BKV-Lösung mit Pedalsimulator, aber unterschiedlichem HZ-Konzept, ist in [9] beschrieben.

EINFLUSSFAKTOREN AUF VOLUMENBEDARF UND PEDALCHARAKTERISTIK

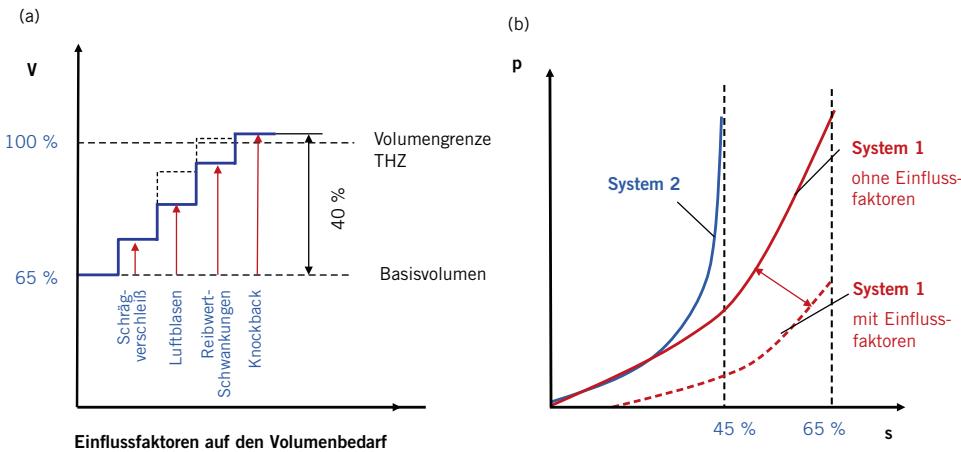
Die Dimensionierung der Bremsanlage wird einerseits durch die Druck-Volumen-Kennlinie mit Lüftspiel der Scheibenbremse und andererseits durch Einflussfaktoren wie Luftblasen in der Bremsflüssigkeit bestimmt. Die Beiträge der Einflussfaktoren einer intakten Bremsanlage sind bei einem Bremsdruck von 100 bar in der Größenordnung von 40 % der Volumengrenze eines Tandem-Hauptbremszylinders (THZ), **BILD 2**. Die Beiträge von Luftblasen und Reibwertschwankungen können durch Dampfblasen oder Fading bei überhitzten Bremsen noch größer werden (gestrichelte Linien in **BILD 2** (a)). Dementsprechend müssen der HZ und

die DV dimensioniert sein. Der THZ von System 1 ist so ausgelegt, dass der Radblockierdruck von 100 bar bei circa 65 % des maximalen Pedalwegs erreicht wird (Basisvolumen). Mit Einflussfaktoren der Bremse wird der Pedalweg länger (gestrichelte Linie in **BILD 2** (b)). Kurz unterhalb von 100 bar wird die Volumengrenze des THZ erreicht. Bei System 2 ist die Pedalcharakteristik unabhängig von diesen Einflussfaktoren und wird weder durch DV-Ausfall, Bremskreisausfall, ESP-Ausfall, regeneratives Bremsen noch durch Torque Vectoring beeinflusst.

Das DV-Volumen des Systems 2 ist auf den Radblockierdruck ausgelegt. Ist ein größerer Volumenbedarf erforderlich, wird Bremsflüssigkeit nachgefördert. Zur Nachförderung wird das DV-Ventil (DVV) geschlossen und der Kolben der DV in die gegengesetzte Richtung wie beim Druckaufbau zurückgezogen. Somit können mit einer HZ-Größe mehrere Fahrzeugtypen abgedeckt werden.

AUSFALLMÖGLICHKEITEN

Einige kritische Ausfallmöglichkeiten der beiden Systeme, die bei jeder Konzeption eines Bremsystems berücksichtigt werden müssen, sind illustrativ in **BILD 3** als F1 bis F9 dargestellt. Beide Systeme vereinen das positive Merkmal



V = Volumen der Bremse, p = Bremsdruck, s = Pedalweg
Basisvolumen: Volumenaufnahme der Bremse mit Lüftspiel bei 100 bar
Volumengrenze THZ: Volumenaufnahme der Bremse, bis beide THZ-Kolben am Anschlag sind

BILD 2 Einflussfaktoren auf Volumenbedarf und Pedalcharakteristik bei den Systemen 1 und 2:
(a) für das Volumen der Bremse;
(b) für den Bremsdruck (© LSP)

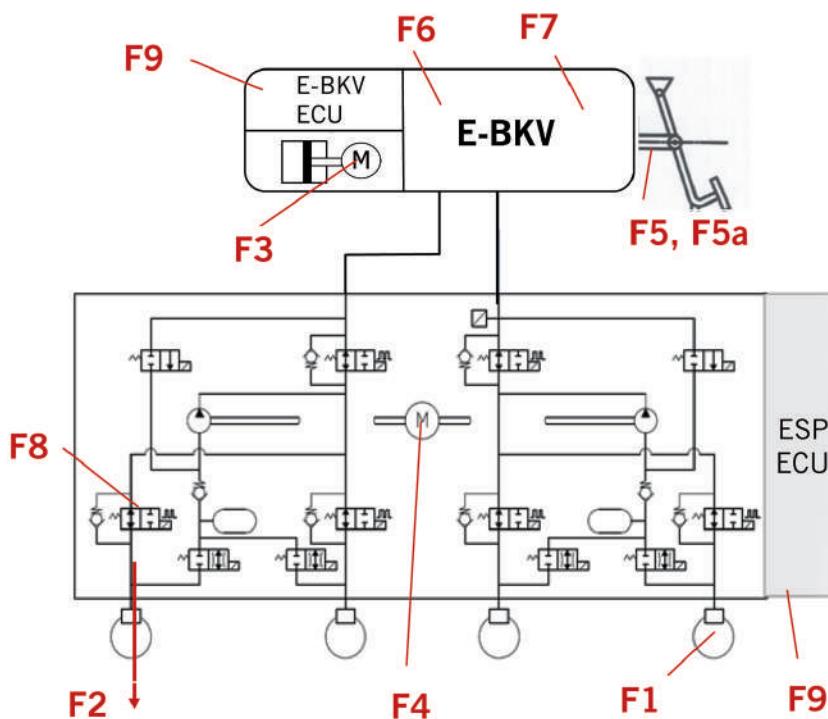
einer hydraulisch geschlossenen Lösung im ABS-Betrieb, zeigen jedoch nach einer genaueren Analyse der Fehlerauswirkungen deutliche Unterschiede. So fällt beispielhaft bei System 2 beim Auftreten des Fehlers F6 das Pedal nicht durch, zudem ändert sich im Fehlerfall F3 die Pedalcharakteristik bei System 2 nicht. Bei der Gestaltung der Systeme müssen zudem die Aspekte der allgemeinen Ausfallsicherheit, Diagnose sowie Redundanzen oder Teilredundanzen betrachtet und berücksichtigt werden.

BETRACHTUNGEN ZU AUSFALLSICHERHEIT UND FEHLERDIAGNOSE

Die Entwicklungsprozesse von Kernkraftwerken und der Luft- und Raumfahrt werden auf Bremssysteme der Automatisierungsstufen HAD bis AD angewandt, nachdem beim AD die höchsten Sicherheitsstufen notwendig sind. Die bisherigen relevanten Sicherheitsstufen „Fail Silent“ und „Fail Safe“ werden mit dem Start von HAD durch „Fail Operational“ ersetzt. Das bedeu-

tet, dass bei einem Ausfall beziehungsweise Teilausfall die Grundfunktionen erhalten müssen.

Während für die Hardware- und Softwareentwicklung klare Standards hinsichtlich der Systematik der Fehleranalyse gelten, sind diese im Mechanik- und Hydraulikbereich noch nicht vorhanden. Die grundsätzliche Methodik und Vorgehensweise ist bekannt. Ziel ist die Erstellung eines Funktions- und Sicherheitskonzepts mit Definition der Diagnose zur Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Fehlern.



- Kritischer Fehler**
- F1: Undichtigkeit eines Radkreises
 - F2: Undichtigkeit eines Bremskreises
 - F3: Blockierung des E-BKV-Antriebs bei Pedalbetätigen oder Pedallösen
 - F4: Ausfall des ESP-DV
 - F5: Ausfall eines Pedalwegsensors 5 oder 5a
 - F6: Undichtigkeit einer HZ-Dichtung
 - F7: Undichtigkeit einer Pedalsimulator-Dichtung
 - F8: Ausfall eines Ein- oder Auslassventils
 - F9: Teil- oder Vollausfall der ESP-ECU

BILD 3 Hauptausfallmöglichkeiten eines E-BKV-Bremssystems mit ESP (© LSP)

ENTWICKLUNG FAHRWERK

Bei Hard- und Software wird die ISO 26262 angewandt. Hierbei werden zur Erstellung von Analysen bewährte Werkzeuge und ausreichend Erfahrung eingesetzt.

In der Mechanik und Hydraulik werden vorrangig FMEA und FTA angewandt. Die Fehleranalyse betrachtet Fehler mit ihren Auswirkungen, wobei Erfahrungswerte für die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fehler von Komponenten und Systemen in ppm pro Fahrzeuglebensdauer verwendet werden. Ein Problem ist dabei eine neue oder eine modifizierte Konstruktion, wenn für diese noch keine Erfahrungswerte für die Auftretenswahrscheinlichkeit vorliegen. Um den hohen Sicherheitsstandards gerecht zu werden, sind diagnostische Redundanzen für wichtige Funktionen erforderlich.

In **TABELLE 1** sind die möglichen Fehler, Auswirkungen der Probleme sowie Diagnosemöglichkeiten einiger ausgewählter kritischer Komponenten von Bremsystemen wie Klobendichtungen, Magnetventile und Kugel-Gewinde-Trieb aufgeführt. Bei offenen Bremsystemen wird bei ABS-Eingriff durch Öffnen eines Auslassventils der Radkreis mit dem Vorratsbehälter hydraulisch verbunden. Dadurch sind unerkannte Undichtigkeiten bei Ventilen und Dichtungen (schlafende Fehler) besonders relevant. Verbindet ein Magnetventil mit schlafendem Fehler beispielsweise die beiden Bremskreise, kann bei Bremskreisausfall die DV und im schlimmsten Fall auch die gesamte Bremse ausfallen. Aus diesem Grund sind geschlossene Bremsysteme zu bevorzugen. Neben diesen hydraulischen und mechanischen Fehlern sind die im Folgenden erläuterten Fehler im Bordnetz von großer Bedeutung.

REDUNDANZEN IM BORDNETZ

Das Bordnetz bekommt in den Stufen HAD bis AD zunehmende Bedeutung. Folgende zwei Hauptfehlerquellen sind zu betrachten:

- der elektrische Anschluss zum Energieverteilerkasten mit Absicherung gegen Kurzschluss
- die Verfügbarkeit des Bordnetzes insbesondere während der Fahrt.

TABELLE 2 zeigt vier mögliche Varianten der Bordnetzverbindung bei redundanten Systemen. Die Variante 3 zeigt mit

Komponente	Fehler/Problem	Auswirkung der Fehler/Probleme	Diagnose-möglichkeit
Klobendichtung	Allgemeine Undichtigkeit; Dichtigkeit bei kleinem Druck, jedoch undicht bei hohem Druck	Ausfall der Kolbenfunktion; beim Wegsimulator führt dies zum Ausfall des Pedalsimulators (bei der DV führt dies zum Ausfall der DV)	Diagnose der redundanten Dichtung (im Bild gestrichelt) nicht möglich (Undichtigkeit ist ein schlafender Fehler)
Magnetventil	Keine sichere Schließfunktion der Ventile durch Schmutzpartikel im Ventilsitz	Beim Auslassventil im offenen Bremsystem führt dies zum Ausfall eines Bremskreises; beim Bypassventil im offenen Bremsystem führt dies zum DV-Ausfall	Wenn das Ventil geöffnet ist, ist die Diagnose der Undichtigkeit nicht möglich (Undichtigkeit ist ein schlafender Fehler)
Kugel-Gewinde-Trieb	Schmutzpartikel gelangen in die Kugellaufbahn	Blockieren der Spindel	Diagnose möglich, aber keine Lösung bei sporadischem Auftreten

TABELLE 1 Betrachtung von Fehlermöglichkeiten von mechanischen und hydraulischen Teilen und Diagnosemöglichkeit (© LSP)

Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
a , b, c: ECU-Schnittstelle; T: Trennschalter; B1: Bordnetz 1; B2: Bordnetz 2; P: Druckversorgung; EM: E-Motor			
System A und B liegen an separatem Bordnetz	System A und B liegen an beiden Bordnetzen, Entkopplung durch Trennschalter	System A mit teilredundanter ECU an Bordnetz 2	System A und B mit redundanter ECU an beiden Bordnetzen
Keine redundante Auswirkung auf System A und B	Redundante Auswirkung auf System A und B, Kosten und Spannungsverlust sind zu beachten	Redundante Auswirkung auf Teilsystem, kostengünstige Lösung, wenn System A in Teilfunktion redundant zu B ist	Volle Redundanz auf Systemebene und Bordnetz, sehr aufwendige Lösung

TABELLE 2 Bewertung unterschiedlicher Varianten der redundanten oder teilredundanten Systeme A und B (© LSP)

einer teilredundanten Lösung mit einer Einschränkung der Redundanz auf sicherheitsrelevante Komponenten und

Funktionen einen pragmatischen und kostensparenden Weg, indem die Redundanz nur auf bestimmte Funktionen

	Modul/Funktion						
SAE-Stufe*	Druckversorgung 1	Pedalwegsensor 2	Druckgeber 3	Redundantes ABS 4	Pedalsimulator 5	Pedalgefühl 6	Nachfordern 7
Stufe 2 (DAS)							
Stufe 3 (HAD)							
Stufe 4 (FAD)							
Stufe 5 (AD)							

*Fahrerassistenzsysteme (DAS), hochautomatisiertes Fahren (HAD), vollautomatisiertes Fahren (FAD), autonomes Fahren (AD)

TABELLE 3 Module (1-5) und Funktionen (6-7) von Bremssystemen in unterschiedlichen Automatisierungsstufen DAS bis AD (© LSP)

mit zugehörigen Komponenten bezogen wird.

Ein redundantes Bordnetz [11], **TABELLE 2**, steigert die Ausfallsicherheit. Da der nicht redundante Anschluss aufgrund von vielen Kontakten und elektrischen Verbindungen als nicht ausfallsicher genug gilt, haben diverse OEMs bereits einen redundanten Anschluss eingeführt. Dahingegen gilt das Bordnetz während der Fahrt als sehr ausfallsicher [11].

VERÄNDERUNG DER BREMSSYSTEME

In Folge der zunehmenden Automatisierung des Fahrens verändern sich Bremssysteme in den in **TABELLE 3** dargestellten Modulen und Funktionen 1 bis 7. Für die notwendige Sicherheit muss abhängig von den Anforderungen des OEM oder auch der Behörden die Funktionsweise der Module 1 bis 5 voll- oder teilredundant gestaltet werden.

In Stufe 2 (DAS) ist keine redundante Druckversorgung erforderlich.

Redundante Pedalsensoren sind in dieser Stufe bereits Stand der Technik. Ein veränderliches Pedalgefühl wird in dieser Stufe noch akzeptiert.

Ab Stufe 3 (HAD) ist eine redundante Druckversorgung erstmals zwingend erforderlich mit ausreichender Volumenbereitstellung aufgrund der genannten Einflussfaktoren. Zudem ist wie bereits ausgeführt eine Verbindung der Bremskreise bei offenen Bremssystemen mit einem Vorratsbehälter (VB) zu vermeiden, und Pedalsimulatoren sind wegen Vorteilen bei Pedalgefühl und Volumenbedarf einzusetzen. Weiter muss auch der E-BKV eine Druckmodulations-Funktion bei ESP-Ausfall übernehmen, um stets eine hohe Fahrzeugverzögerung zu gewährleisten. Hier wird im ersten Schritt eine ABS-Select-low-Regelung eingeführt.

Ab Stufe 4 (FAD) werden für eine ausreichende Systemverfügbarkeit dreifache Redundanzen erwartet, bei den Pedalwegsensoren mit der Regel „2 aus 3“. Zudem ist ein Pedalsimula-

tor wegen zunehmender Rekuperationsleistung von E-Fahrzeugen und fehlender Akzeptanz der Veränderung der Pedalcharakteristik zwingend, weil FAD über eine längere Zeitdauer betrieben werden kann und der Fahrer bei Übergang auf das pilotierte Fahren nicht auf eine Veränderung der Pedalcharakteristik vorbereitet ist. Zur Überwachung der Druckversorgung ist ein redundanter Druckgeber vorzusehen. Weiterhin wird eine redundante ABS-Funktion mit zumindest achsindividueller Regelung gefordert werden, und es werden Teilredundanzen eingeführt. Bremssysteme mit geschlossenen Bremskreisen werden bei der ABS-Funktion Sicherheitsvorteile haben.

In Stufe 5 (AD) sind Pedalwegsensoren und Pedalsimulatoren sowie deren Charakteristik einerseits nicht mehr relevant. Andererseits werden die restlichen Komponenten und Teilsysteme eine dreifache Redundanz, mit der Regel „2 aus 3“ bei Sensoren, ESP-Einheit und Teil-ECU, oder mehrfache Redundanz, aufweisen müssen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bremssysteme für Stufe 3 (HAD) und vermehrt in Stufe 4 (FAD) müssen redundant oder teilredundant ausgeführt werden. Im Fehlerfall muss eine hohe Fahrzeugabremsung mit reduzierter ABS-Funktion gewährleistet werden. Ebenso werden Bauvolumen und kürzere Baulänge der Aggregate an der Spritzwand immer wichtiger.

Bei HAD konkurrieren verschiedene Systeme wie Two Box mit E-BKV mit Pedalsimulator inklusive ESP-Einheit oder One-Box-Systeme mit Pedalsimulator und reduzierten Zusatzaggregaten für die Druckregelung. Bei FAD wird eine redundante Integration in eine One-Box-Einheit beziehungsweise eine Optimierung der Two-Box-Module erfolgen sowie der Umbruch in reine Brake-by-Wire-Lösungen mit neuen Betätigungskonzepten eingeleitet.

X-Boost und ESP [8] erfüllen HAD-Anforderungen, zudem ist eine Ausbau-stufe mit geringen nicht ausgeführten Änderungen für FAD für die Anforde-

rungen bereits definiert. AD wird aufgrund nicht unerheblicher technischer Herausforderungen des fahrerlosen Fah-rens noch Zeit in Anspruch nehmen. Neue innovative Lösungen mit den Merkmalen geschlossener Bremssysteme, Redundanz des ABS-Betriebs ohne funktionale Einschränkungen, Einbeziehen der Parkbremse in die Gesamtlösung sowie systembezogene E/E-Teil- und -Vollredundanzen sind jedoch bereits konzeptionell vorhanden.

Ab 2021 werden integrierte One-Box-Systeme [5] sowie Two-Box-Lösungen [4, 10] mit unterschiedlichen Ausstattungs-raten in den Hauptautomobilmärkten Europa, USA und China koexistieren und große Stückzahlen erreichen. Nachdem in Indien ab dem Jahr 2022 ESP-Sys-teme in jedem neuen Kraftfahrzeug ein-gebaut wird, ist von ESP als Standard auszugehen.

LITERATURHINWEISE

[1] Witte, B.; Barthenheimer, T.; Lang, H.; Witte, K.; Ohlig, B.: Vorrichtung und Verfahren zur elektromechanischen Bremsunterstützung. Europäische Patentschrift EP 1 896 309 B1, Anmeldetag: 05.05.2006

[2] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglspurger, C.: IBS – Integrated Brake System. Tagung der modernen Industrie, 15.06.2010

[3] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglspurger, C.: Modulares Bremssystem mit integrierten Funktio-nen. In: ATZ 113 (2011), Nr. 6, S. 466-472

[4] Kunz, A.; Kunz, M.; et al.: Elektromechanischer Bremskraftverstärker für alle Antriebskonzepte und automatisiertes Fahren. In: ATZ 120 (2018), Nr. 4, S. 60-65

[5] Breuer, B.; Bill, K.-H. (Hrsg.): Bremsenhand-buch. Kapitel 20.3: Integriertes Bremssystem MK C1, 5. Auflage, 2017

[6] Weiberle, R.; Zahn, T.; et al.: Bremskraftverstär-ker sowie Verfahren und Vorrichtung zu dessen Betrieb. Deutsche Patentschrift DE 10 2010 001 939 B4, Anmeldetag: 15.02.2010

[7] Leiber, H.; Leiber, T.; Unterfrauner, V.: Brems-system ohne Wegsimulator. Deutsche Patentschrift DE 11 2009 004 636 B4, Anmeldetag 03.02.2009

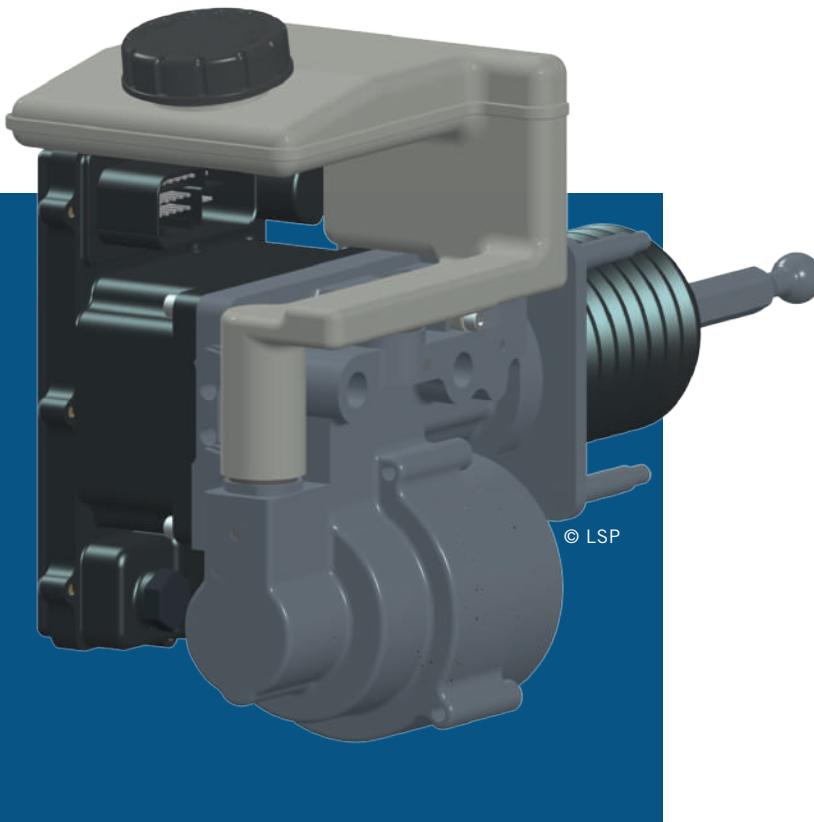
[8] Leiber, H.; Leiber, T.: Bremssystem. Internatio-nale Patentanmeldung WO2018/233854A1, Veröf-fentlichungsdatum: 27.12.2018

[9] Biller, H.; Stauder, P.; Besier, M.; Feigel, H.-J.: Bremsanlage für Kraftfahrzeuge. Europäische Patentschrift EP 2699459 B1, Anmeldetag: 26.02.2014

[10] Leiber, T.; Köglspurger, C.; Hecker, C.: X-Boost und IBS-Gen3: Herausforderungen und Lösungs-ansätze für zukünftige Bremssysteme. VDI-Wissen-sforum, Hannover, 25.10.2017

[11] Prechler, R.: Redundante Bordnetze für Hochautomatisiertes Fahren. 22. Internationaler Kongress Automobil-Elektronik, Ludwigsburg, 19.-20.06.2018

自动驾驶的 制动助力器



作者



Thomas Leiber 工科博士
温特弗灵市LSP 有限责任
公司的企业负责人。



Heinz Leiber
弗赖恩巴赫(瑞士)市
IPGate 股份公司的顾问。



Anton van Zanten 工科博士
弗赖恩巴赫(瑞士)市
IPGate 股份公司的顾问。

ESP 系统和电控机械式制动助力器因自动驾驶而变得比以往更加重要。研发服务商LSP 响应该趋势，根据SAE 自动驾驶等级的增长程度对电控机械式制动助力器进行比较。作为新的研发项目，首次推出的紧凑型制动助力器X-Boost 制造得极为轻薄。

颠覆性变革

汽车行业正在经历颠覆性的变革过程。除了电动汽车正逐渐蚕食市场占有率这一因素之外，自动驾驶的SAE 等级也由等级3 (高度自动驾驶，HAD) 升至等级4 (完全自动驾驶，FAD) 进而发展到等级5 (自主驾驶，AD)，同时每个等级对乘用车制动系统的要求也逐级增高。

这一趋势也推动了新式制动系统的发展。电控机械式制动助力器(E-BKV) 取代真空自动助力器的替代方案始于2013年，初期解决方案早在2005 [1, 2, 3] 年便已经提出，在Two-Box 解决方案（即装载了电子助力器和ESP 模块[4]）推出市场不久之后，2017 [5] 年又推出了集成式One-Box 系统，该系统装配了踏板模拟器。目前正在开发的解决方案是为了计划于2021 年将HAD 等级引入市场。

封面上展示的是新研发的紧凑型制动助力器X-Boost，是LSP 创新汽车系统有限责任公司目前正在与合作伙伴共同开发的项目，以满足HAD (高度自动驾驶) 的要求。这里是首次对这种紧凑型助力器的基

本结构加以介绍，并同一种已成型的从动制动助力器[4]进行比较。其中会指出一些严重的故障情况。此外，还将讨论与故障这一主题关系密切的安全性、诊断方法以及全冗余设计和半冗余设计。

系统 1 和系统 2 均为的E-BKV 解决方案

比较是为了说明不同版本制动助力器系统的优缺点。图 1 (a) 所示系统1 是电子从动制动助力器，其由电动机基于踏板行程和活塞行程之间的差动行程测量值控制。系统1 使用弹性元件，其控制方式已在 [4,6,7] 中作以介绍。它是目前市场上采用集成ESP 模块的Two-Box 解决方案。

图 1 (b) 所示系统2 是一种装有踏板模拟器的电控机械式制动助力器X-Boost。电控机械式制动助力器由电动机基于踏板行程的测量值控制。电动机驱动一个与制动主缸平行安装的活塞缸体组件。制动主缸包含一个与踏板模拟器液压连接的辅助活塞以及一个浮动活塞，其用于分开两个制动回路、起到平衡压力的作用并允许为

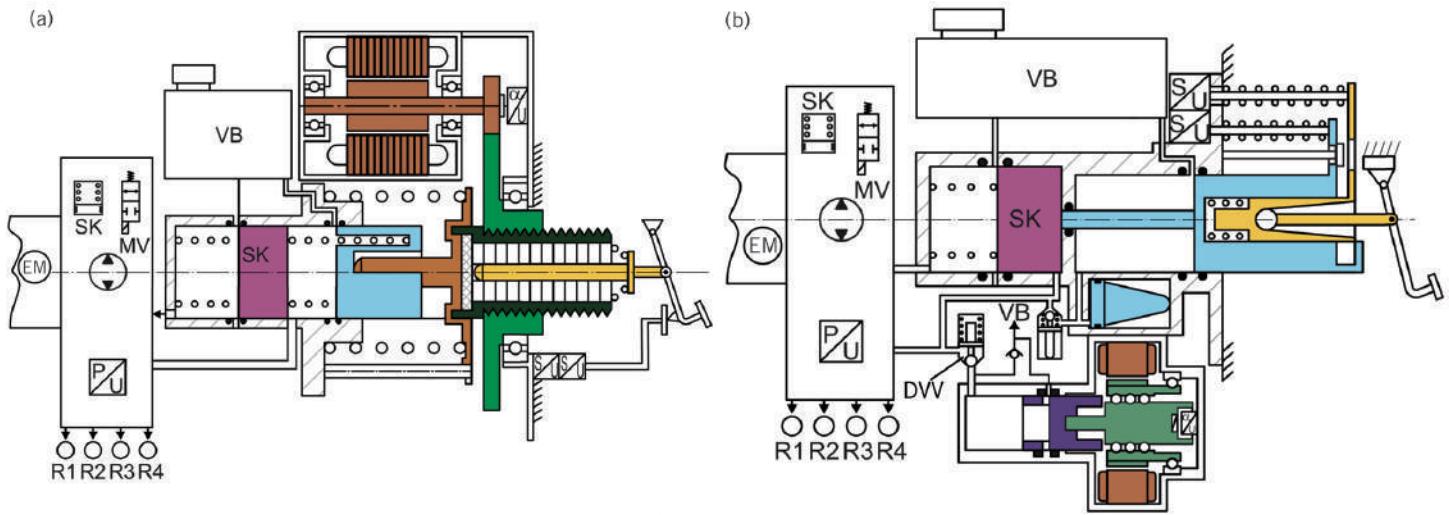


图 1 系统比较: (a) 系统1是装有ESP模块的电子从动制动助力器; (b) 系统2是装有踏板模拟器和标准ESP模块的电控机械式制动助力器X-Boost (© LSP)

单回路提供压力源(DV)。由于辅助活塞的直径小于浮动活塞的直径,因此在机械运动的回缩面上能产生更高的制动压力。系统2在[8]中已作详细介绍,将作为采用标准ESP模块的Two-Box解决方案。在[9]中介绍的另一种电控机械式制动助力器方案,装有踏板模拟器但采用了不同的制动主缸设计。

容积要求和踏板特性的影响因素

制动系统的尺寸设计一方面由盘式制动器间隙的压力体积特征曲线决定,另一方面由诸如制动液中的气泡等影响因素来决

定。在制动压力为100巴时,完好制动系统影响因素的作用大约是串联制动主缸的容积极限的40%,图2。气泡和摩擦系数波动的影响可能由于制动器过热产生蒸汽泡或衰减而增加(图2(a))。因此,必须确定制动主缸和压力源与此相应的尺寸。将系统1的串联制动主缸设计为在最大踏板行程(基本容积)的约65%处达到100巴的车轮锁紧压力。由于制动器的影响因素,踏板行程变长(图2(b)中的虚线)。即将达到100巴时,达到了串联制动主缸的容积限制。在系统2中,踏板特性与这些因素无关,并且不受压力源故障、制动回路故障、ESP故障、再生制动或扭矩矢量控制的影响。

系统2的压力源容量是基于车轮锁定压力而设计的。如果存在更大的容积需求,则要补加制动液。补加制动液时需要关闭压力供应阀(DVV)、将提供压力的活塞向建立压力的相反方向拉回。这样可以通过一种制动主缸尺寸来覆盖更多的车型。

故障情况

图3中F1到F9的图示说明在制动系统的设计中必须考虑到两个系统存在的一些严重的故障情况。两种系统均结合了ABS运行中液压封闭方案的有利特征,但在对故

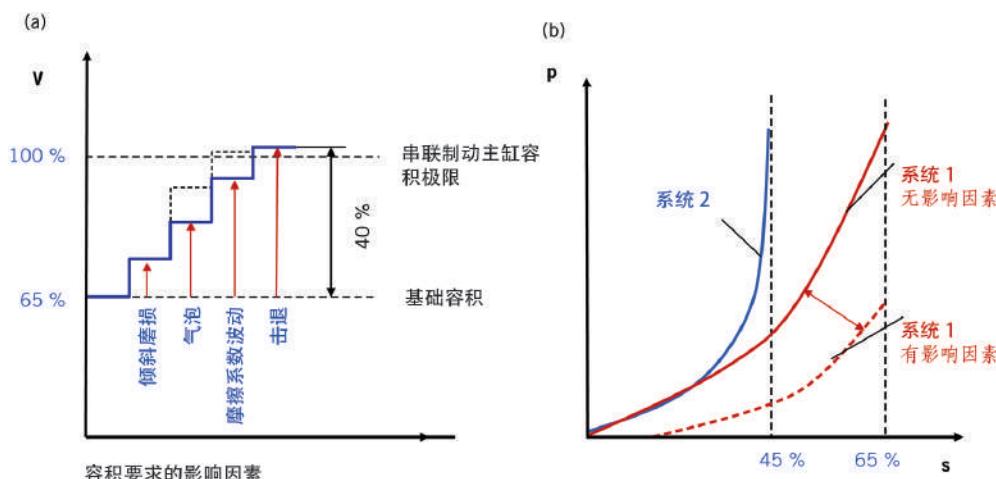


图2 系统1和系统2的容积要求和踏板特性的影响因素: (a) 表示制动器容积(b) 表示制动压力(© LSP)

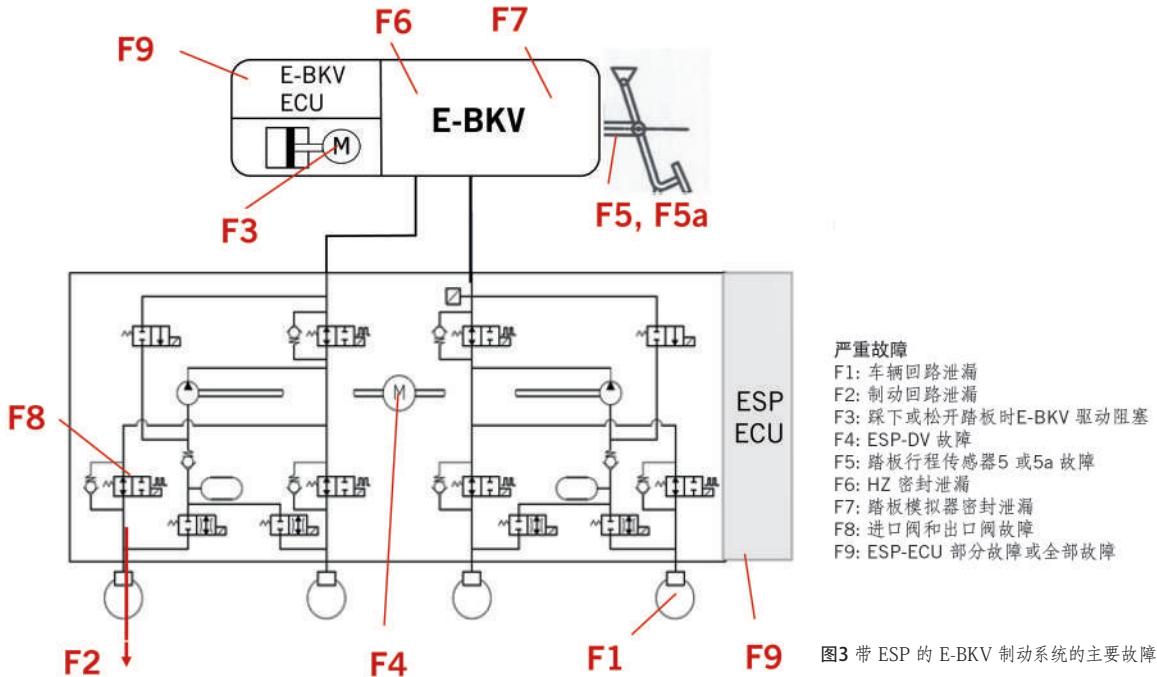


图3 带 ESP 的 E-BKV 制动系统的主要故障情况 (©LSP)

障影响进行更详细的分析后则表现出了明显的差异。例如，当系统2出现故障F6时踏板无法落下，另外在出现故障F3时，系统2的踏板特性不会改变。

在设计系统时，除了考虑一般故障安全、诊断还要考虑冗余或半冗余等方面。

对故障安全和故障诊断的注意要点

随着核电和航空航天工业的发展进程，当AD自动驾驶等级实现了所必须的最高安全级别之后，制动系统中应用的自动驾驶等级从HAD进而升至AD等级。截至目前为止与安全级别相关的“故障沉默”机制和“故障安全”机制将在HAD自动驾驶等级启动后由“故障后保持工作”机制所取代。这表示基本功能在发生故障或部分出现故障后必须得以维持。

虽然在故障分析系统方面对硬件和软件开发有明确的标准，但在机械和液压方面还没有标准。其基本方法和操作步骤已经众所周知。目的是通过定义诊断来创建一个功能性和安全性概念，用于区分主动和被动故障。硬件和软件均采用了ISO 26262标准。这方面将采用经验证的工具并通过丰富的经验来进行分析。

在力学和液压领域，优先采用FMEA和FTA。误差分析考虑误差及其影响，组件和系统误差的发生概率的经验数据表示，其单位为车辆使用寿命中的ppm。但问题是对于新式或改装后的结构，尚未具备任何经验数据来判断发生概率。

为了满足高安全标准，重要功能需要具备诊断功能的冗余设计。

表1中列出了可能发生的故障、问题的影响以及制动系统一些特定关键部件的诊断方式，例如活塞密封、电磁阀和滚珠丝杠传动装置。对于常开式制动系统，在ABS介入时，通过打开车轮回路出口阀与储备容器液压连接。因此，阀门和密封件上未被发现的泄漏

(潜在故障)尤为重要。例如，当潜在故障的电磁阀连接两个制动回路时，制动回路出现故障可导致压力源失效并且在最坏情况下将使整个制动器失效。基于此原因应优先选择常闭制动系统。除了这些液压和机械故障之外，下面介绍的汽车电路系统中出现的故障非常重要。

汽车电路系统中的冗余

HAD级到AD级的汽车电路系统变得越来越重要。应注意以下两个主要故障源：

- 具有防短路熔断器的配电盒的电气连接
- 汽车电路系统的可用性，特别是在行驶过程中。

表2示出了车辆电气连接在冗余系统下的四种可能的型式。型式3展示了一种实用且节省成本的方式，采用半冗余的解决方案并且限制安全相关的组件和功能的冗余功能，因为冗余仅与相关组件的特定功能有关。

表2中的冗余汽车电路系统[11]提高了故障安全性。非冗余连接由于具有许多触

点和电气连接则被认为故障安全性不足，因此各OEM厂商已采用了冗余连接。相反地，汽车电路系统在行驶过程中被认为是极具故障安全性的[11]。

制动系统的改变

由于驾驶自动化程度不断增加，表3中所示的模块和功能1到7表示了制动系统的变化。根据OEM或相关部门的要求，模块1至5的运行模式必须采用全冗余或半冗余设计，以确保必要的安全性。

在等级2(DAS)中，不需要冗余方式的压力源。在该等级中，冗余踏板传感器已经符合了现有的技术水平。在该等级中仍然可以接受的是变化的踏板感觉。

从等级3(HAD)开始，由于上述影响因素，首次强制要求冗余方式的压力源并提供足够的容积。另外，如上所述，应避免常开式制动系统中的制动回路与储备容器(VB)的连接，并且由于踏板感觉和容积要求的优点，应使用踏板模拟器。此外，EBKV还必须在ESP发生故障时承担压力调节功能，以便能确保车辆始终具备高度的制动性能。在此首先引入ABS低速控制。

从等级4(FAD)开始，为了确保系统具有足够的可用性，预计将采用三重冗余设计，其中踏板行程传感器采用“三选二”规则。此外由于电动汽车增长的再生功率和无法接受踏板特性的改变，而强制要求使用踏板模拟器，因为FAD运行时间更长，并且驾驶员在切换到主动驾驶时未对踏板特性改变有所准备。为了监控压

力供应情况还须装配一个冗余压力传感器。此外还需要至少能单独控制轴的冗余ABS功能，并采用半冗余设计。对于ABS功能而言，采用常闭式制动回路的制动系统则具有安全优势。

在等级5(AD)中，一方面踏板行程传感器和踏板模拟器以及它们的特性不再重要。另一方面，其余的组件和子系统必须依照传感器、ESP模块和子ECU的“三选二”原则，具备三重冗余或采用多重冗余。

总结和展望

等级3(HAD)和等级4(FAD)的制动系统必须采用冗余或半冗余设计。在发生故障的情况下，必须确保ABS减速功能具备高度的制动性能。同样，前围板上装置的结构体积和越来越短的结构长度变得愈加重要。

在HAD这一等级上，不同系统相互竞争，如采用装备了踏板模拟器和ESP模块的电控机械式制动助力器Two Box解决方案或集成踏板模拟器和减速辅助装备来调节压力的One-Box系统。FAD这一级将冗余集成到One-Box单元或优化了Two-Box模块，并通过新的操作概念将变革引入了纯线控刹车解决方案。

X-Boost和ESP[8]符合HAD等级的要求，此外还设定了扩展等级，通过对这些要求进行几乎全盘修改来满足FAD的要求。AD级由于存在重大的技术挑战，尚需一段时间才能实现。然而，采用常闭式制动系统、无功能限制的ABS运行冗余设计、包含在整体解决方案中加入驻车制动以及与系统相关的电气零件部分和完全冗余的新型创新解决方案已经出现概念方案。

从2021年开始，欧洲、美国和中国的主要汽车市场中具有不同装备水平的集成式One-Box系统[5]和Two-Box解决方案[4,10]将会共存并实现大批量生产。从2022年开始，印度将在每辆新车上安装ESP系统，此后，ESP将成为真正的标准配置。

参考文献

- [1] Witte, B.; Barthenheier, T.; Lang, H.; Witte, K.; Ohlig, B.: 辅助电控机械式制动的装置和方法。欧洲专利说明EP 1 896 309 B1, 申请日: 2006年5月5日
- [2] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglspurger, C.: IBS - 集成式制动系统。现代工业会议, 2010年6月15日
- [3] Leiber, T.; Unterfrauner, V.; Köglspurger, C.: 具有集成功能的模块化制动系统。In: ATZ 113 (2011), Nr. 6, S. 466-472
- [4] Kunz, A.; Kunz, M.; et al.: 适用于所有驱动概念和自动驾驶的电控机械式制动助力器。In: ATZ 120 (2018), Nr. 4, S. 60-65
- [5] Breuer, B.; Bill, K.-H. (Hrsg.): 制动手册。第20.3章：集成制动系统MK C1, 第5版, 2017

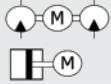
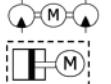
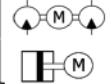
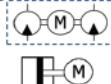
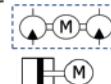
组件	故障/问题	影响 (故障/问题)	诊断可能性
活塞密封	一般泄漏；低压下的密封，但在高压下泄漏	活塞功能失效；在行程模拟器中，导致踏板模拟器故障（在DV中导致DV的故障）	无法诊断冗余密封（图中虚线）（泄漏是潜在故障）
电磁阀 电磁阀	由于阀座中的污垢颗粒，阀门没有可靠关闭功能	在开式制动系统的出口阀中，这会导致制动回路失效；在开式制动系统的旁通阀中，这会导致DV失效	如果阀门打开，则无法诊断泄漏（泄漏是潜在故障）
滚珠丝杠副	污垢颗粒进入滚珠轨道	阻塞丝杠	可以诊断，但在偶尔发生的情况下没有解决方案

表1 考虑机械和液压部件可能存在的故障情况和诊断方式(© LSP)

型式 1	型式 2	型式 3	型式 4
a, b, c: ECU 接口; T: 断路开关; B1: 汽车电路系统1; B2: 汽车电路系统2; P: 压力源; EM: 电动发动机	系统A和B在独立的汽车电路系统上	系统A和B在两个汽车电路系统上，通过断路器解耦	系统A通过半冗余ECU连接到汽车电路系统2上
对系统A和系统B不产生冗余效应	对系统A和系统B产生冗余效应，应注意成本和电压损耗	对子系统产生冗余效应，低成本解决方案，前提是系统A在部分功能上是系统B的冗余	在系统级和汽车电路系统上采用全冗余设计，非常昂贵的解决方案

表2 是系统A和B采用冗余或半冗余的不同型式 (© LSP)

- [6] Weiberle, R.; Zahn, T.; et al.: 制动助力器及其操作方法和装置。德国专利DE 10 2010 001 939 B4, 申请日: 2010年2月15日
- [7] Leiber, H.; Leiber, T.; Unterfrauner, V.: 无行程模拟器的制动系统。德国专利说明DE 11 2009 004 636 B4, 申请日: 2009年2月3日
- [8] Leiber, H.; Leiber, T.: 制动系统。国际专利申请WO2018/233854A1, 发布日期: 2018年12月27日
- [9] Biller, H.; Stauder, P.; Besier, M.; Feigel, H.-J.: 机动车辆制动设备。欧洲专利说明EP 2699459 B1, 申请日: 2014年2月26日

SAE 等级*	模块/功能						
	1 压力源	2 踏板行程传感器	3 压力传感器	4 冗余 ABS	5 踏板模拟器	6 踏板感觉	7 补充
等级 1 (DAS)							
等级 2 (DAS)				-	-		-
等级 3 (HAD)	2x 			低选 			
等级 4 (FAD)	2x 			轴单独 			
等级 5 (AD)	2x 	-		轮单独 	-	-	-

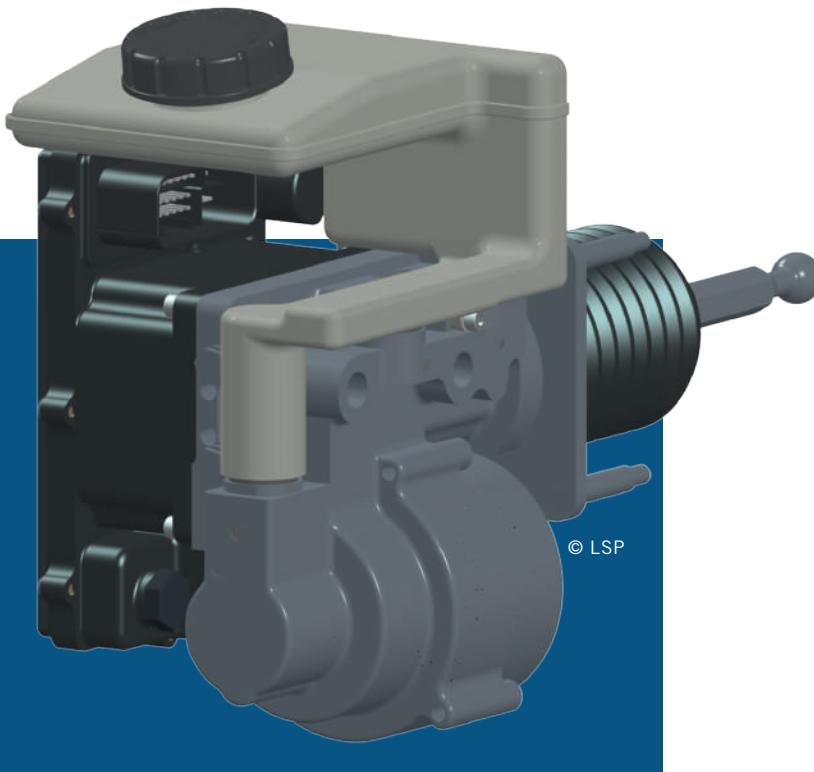
*驾驶辅助系统 (DAS), 高度自动驾驶 (HAD), 完全自动驾驶 (FAD), 自主驾驶 (AD)

表 3 列出了制动系统从 DAS 到 AD 自动驾驶等级的模块(1-5) 和功能(6-7) (© LSP)

[10] Leiber, T.; Köglspurger, C.; Hecker, C.: X-Boost 和IBS-Gen3 : 未来制动系统的挑战和解决方案。VDI 论坛, 汉诺威, 2017 年 10 月 25 日

[11] Prechler, R.: 高度自动驾驶的冗余汽车电路系统。第 22 届国际汽车电子大会, 路德维希堡, 2018 年 6 月 19 日到 20 日

自動運転用 ブレーキブースター



著者



工学博士トマス・ライバー
はウンターフェーリング
(Unterföhring)に所在する
LSP GmbH社の経営者
である。



ハインツ・ライバー
(Heinz Leiber)はフライ
エンバハ(Freienbach)
(スイス)に所在する
IPGate AG社の相談役で
ある。



工学博士アントン・フ
アン・ツァンテン
(Anton van Zanten)はフ
ライエンバハ
(Freienbach)(スイス)
に所在するIPGate AG社
の相談役である。

ESCシステムと電気機械式ブレーキブースターは、自動運転のせいで、以前よりさらに重要になる。開発会社LSPは、この動向に対応し、米国自動車技術者協会(SAE)の自動化レベルにおける増加する等級の観点のもとで電気機械式ブレーキブースターを比較する。新規開発装置として、非常に軽く、また薄型に作られているコンパクトなブレーキブースター、X-Boostが初めて詳しく紹介される。

破壊的変化

自動車産業は破壊的变化過程の中にいる。電気自動車が益々市場に浸透する一方で、SAEによる自動運転の様々なレベルは、レベル3(高度に自動化された運転、HAD)からレベル4(完全自動運転、FAD)を経てレベル5(自律運転、AD)にまで達するであろう。その際、各レベルにおいて乗用車のブレーキシステムに対する要求は高まる。

この動向のせいで、同時に新たなブレーキシステムの開発が一層進むことになる。真空式ブレーキブースターから電気機械式ブレーキブースター(E-BKV)への交替は——2005年に最初の解決が試みられた後[1, 2, 3]——電気式後続ブレーキブースターと追加ESCユニットを備えた、いわゆるTwo-Box式解決法によって2013年に始まり[4]、また、それから程なく、2017年にはペダルシミュレーターを備えた最初の統合One-Box式システムが続いた[5]。現在ではHAD 2021の市場導入計画のための解決法が開発されている。

新開発のコンパクトなブレーキブースター、X-Boost(記事冒頭の写真)は、現在、LSP Innovative Automotive Systems GmbH社によって、HADに関する要求のために、協力者との共同作業により開発中である。このコンパクトなブースターの原理的構造が、ここで初めて解説され、技術的に確立している後続ブレーキブースター[4]と比較される。その際、二三の重大な故障の可能性が示される。さらに関連する主題領域である信頼性、診断可能性、完全冗長性及び部分冗長性が論じられる。

E-BKVに関する解決法としてのシステム1及びシステム2

異なる仕様のブレーキブースターシステムの利点と欠点を比較によって説明することにする。図1(a)は、システム1として、ペダルストロークとピストン行程の差動測定に基づき、電気モーターによって調節される電気式後続ブレーキブースターを示している。システム1は伸縮性のある要素を利用してお

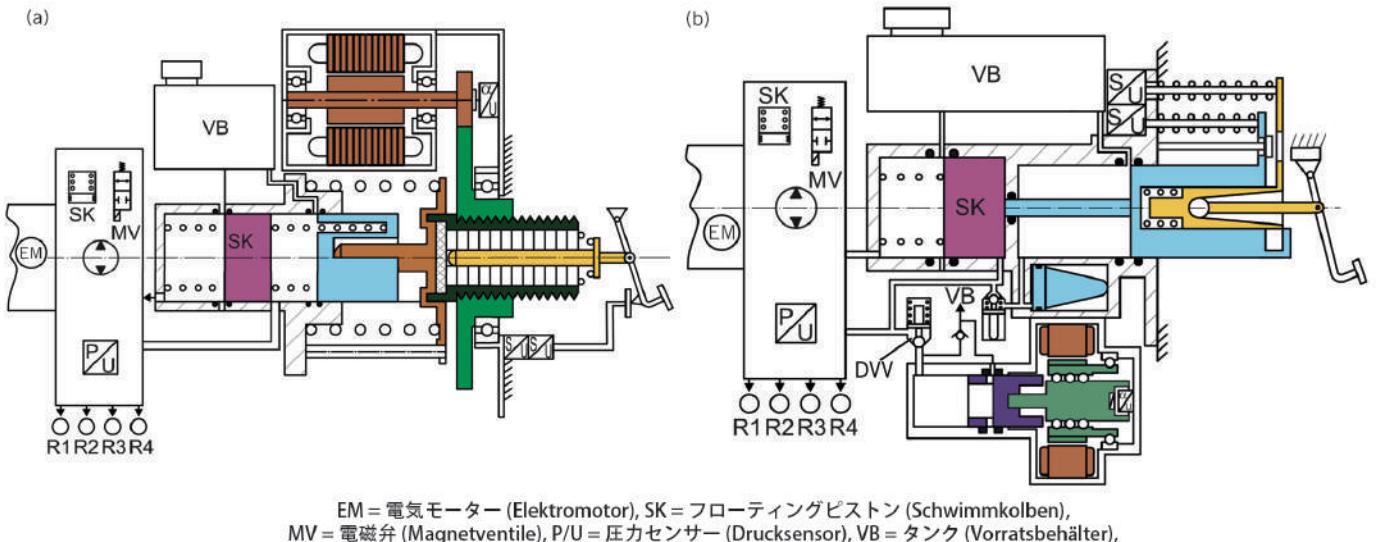


図1 システムの比較: (a)システム1 = ESCユニットを備えた電気式後続ブレーキブースター、(b)システム2 = ペダルシミュレーター及び標準ESCユニットを備えたE-BKV X-Boost (© LSP)

り、その制御は [4, 6, 7] に記述されている。このシステムは現在、ESCユニットと組み合わせたTwo-Box式解決法として市場に投入されている。

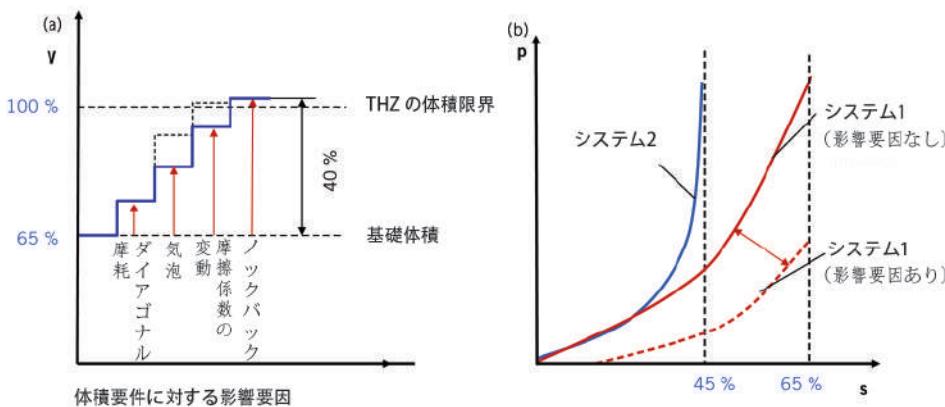
図1 (b) は、システム2として、ペダルシミュレーターを備えたE-BKVである X-Boost を示している。このE-BKVは、ペダルストロークの測定に基づき、電気モーターによって制御される。電気モーターは、メインブレーキシリンダー (HZ = Hauptbremszylinder) に対して平行に取り付けられているピストンシリンダユニットを駆動する。HZには、ペダルシミュレーターと油圧によって結合されている補助ピストンと、

両方のブレーキ回路を分離し、均圧を作り出し、單一回路による圧力供給 (DV = Druckversorgung) を許容するフローティングピストンが含まれている。補助ピストンの直径はフローティングピストンの直径より小さいので、機械的フォールバックレベルにおいて、ブレーキ圧を高めることができる。システム2は [8] に詳しく記述されており、標準ESCユニットを持つTwo-Box式解決法として「市場に」投入されている。ペダルシミュレーターを備えているものの、異なるHZコンセプトを持つその他のE-BKVは [9] に記述されている。

体積要件とペダル特性に影響する要因

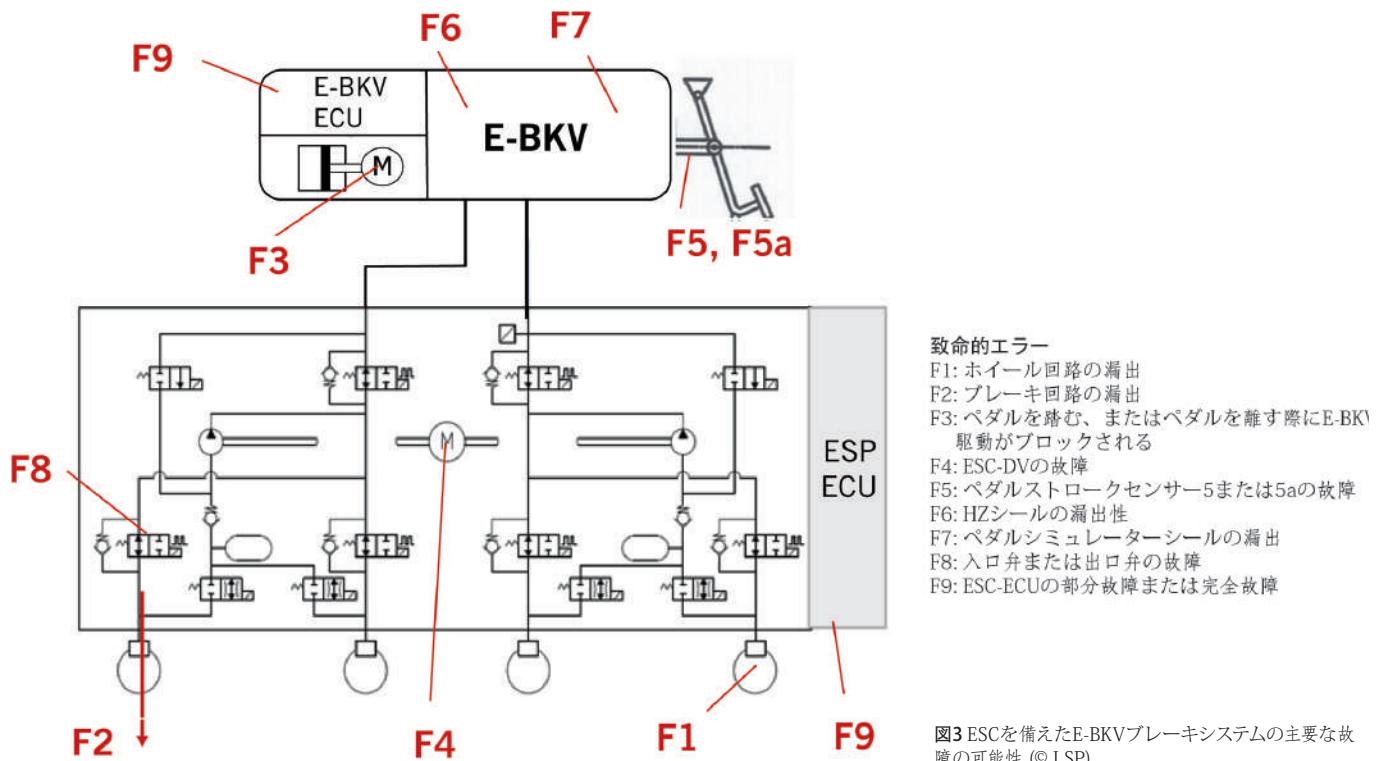
ブレーキ装置の寸法設計は、一方ではディスクブレーキのランニングクリアランスに関する圧力・体積の特性によって、他方ではブレーキ液中の気泡のような影響要因によって規定される。正常なブレーキ装置における影響要因の寄与は、100 barのブレーキ圧においては、タンデム・メインブレーキシリンダー (THZ = Tandem-Hauptbremszylinder) における体積限界の40%のスケール内にある。図2参照。気泡と摩擦係数の変動の寄与は、過熱したブレーキにおける蒸気泡またはフェーディングによってさらに大きくなることがある (図2 (a) における破線)。HZとDVの寸法はそれに対応して設計されていなければならない。システム1のTHZは、100 barのホイールロック圧が最大ペダルストロークの約65%で達成されるように設計されている (基礎体積)。ブレーキの影響要因によって、ペダルストロークはさらに長くなる (図2 (b) の破線)。100 barより少し下でTHZの体積限界に達する。システム2では、ペダル特性はこれらの影響要因とは無関係であり、DVの故障、ブレーキ回路の故障、ESCの故障、回生制動によっても、トルクベクタリングによっても影響されない。

システム2のDV体積はホイールロック圧に合わせて設計されている。もっと大きな体積要件が必要な場合は、ブレーキ液が追加される。追加のためには、DV弁 (DVV) が閉じられ、DVのピストンは圧力上昇時とは逆方向へ引っ込められ



V = ブレーキの体積、p = ブレーキ圧、s = ペダルストローク
基礎体積: 100 barでのランニングクリアランスのあるブレーキの体積取得
THZの体積限界: 2つのTHZピストンがトップに達するまでのブレーキの体積取得

図2 システム1と2における体積要件とペダル特性に対する影響要因: (a)ブレーキの体積に対して、(b)ブレーキ圧に対して (© LSP)



致命的エラー

- F1: ホイール回路の漏出
- F2: ブレーキ回路の漏出
- F3: ペダルを踏む、またはペダルを離す際にE-BKV駆動がブロックされる
- F4: ESC-DVの故障
- F5: ペダルストロークセンサー5または5aの故障
- F6: HZシールの漏出性
- F7: ペダルシミュレーターシールの漏出
- F8: 入口弁または出口弁の故障
- F9: ESC-ECUの部分故障または完全故障

図3 ESCを備えたE-BKVブレーキシステムの主要な故障の可能性 (© LSP)

る。そうすることで、一つのHZサイズにより、複数の車両タイプがカバーされる。

故障の可能性

ブレーキシステムの各コンセプトにおいて考慮されねばならない両システムのいくつかの重大な故障可能性は、図3においてF1～F9として図示されている。両システムは、ABS駆動における、油圧的に閉じられている解決法の肯定的な特徴を持つ点では一致しているものの、エラーの影響をさらに詳しく分析すれば、明白な違いを示している。例えば、システム2では、エラーF6が出現した際に、ペダルが利かなくなることはなく、さらにエラー事例F3の場合、ペダル特性はシステム2では変化しない。システムの形成に際しては、さらに、一般的な信頼性、診断、冗長性、あるいは部分的冗長性の観点が考察され、考慮されねばならない。

信頼性とエラー診断に関する考察

ADにおいては最高の安全性レベルが必要になるので、原子力発電所と航空及び宇宙飛行の開発プロセスが、HADからADまでの自動化レベルのブレーキシステムに応用される。従来の重要な安全性レベルである「フェールサイレント (Fail Silent)」と「フェールセーフ (Fail

Safe)」は、HADの開始とともに「フェールオペレーション (Fail Operational)」によって置き換えられる。このことは、故障または部分的故障に際して基本的機能があくまで保持されねばならないということを意味している。

ハードウェアとソフトウェアの開発に対してはエラー分析の体系に関する明確な規格が適用されるのに対して、このような規格は機械装置と油圧の分野ではまだ存在していない。基本的方法と手順は知られている。その目的は、能動的エラーと受動的エラーを区別するための診断の定義を伴う機能コンセプトと安全性コンセプトの作成である。ハードウェアとソフトウェアではISO 26262が適用される。その際、分析を作成するために、定評のある器具が使用され、経験が十分に生かされる。

機械装置と油圧装置では、故障モード影響解析 (FMEA) とフォルト・ツリー解析 (FTA) が優先的に適用される。エラー分析は、エラーをその影響とともに考察し、その際、車両寿命あたりのppmで表されたコンポーネントとシステムのエラー出現確率に対する経験値が使用される。その際、問題になるのは、新たな、または修正された構造に対して、出現確率に対する経験値がまだ存在しない場合である。高い安全規格を満たすために、重要な各機能に対する診断可能な冗長性が必要である。

表1には、ピストンシール、電磁弁、

ボルねじのような、ブレーキシステムのいくつかの選び出された危機的なコンポーネントにおいて生じうる、エラー、問題の影響、診断可能性が挙げられている。開放ブレーキシステムでは、ABSの介入の際に出口弁を開くことにより、ホイール回路が油圧によってタンクと結合される。そのことにより弁とシールにおける認識されていない漏出（潜在欠陥）が特に重要になる。例えば潜在欠陥を持つ電磁弁が二つのブレーキ回路を結びつける場合、ブレーキ回路においてDVが、また最悪の場合にはブレーキ全体が故障することがある。この理由から閉鎖ブレーキシステムのほうを優先すべきである。このような油圧装置と機械装置のエラーの他に、電気システムにおける、以下で説明されているエラーが、大きな重要性を持っている。

電気システムにおける冗長性

電気システムは、HADからADまでの各レベルにおいて、ますます重要性を増している。以下の二つの主要なエラー発生源を考察しなければならない。

- ショート防止機能を備えたエネルギー分配ボックスへの電気接続
- 電気システムを特に走行中に利用できること

表2は冗長性を持つシステムにおける電気システム接続の4つの可能な変種を示している。変種3は、冗長性を付属する

コンポーネントの特定機能にのみ関連づけることにより、冗長性を安全性に関連するコンポーネントと機能に限定することによる、部分的に冗長性を持つ解決法によって、実践的で費用軽減的な方法を示している。

表2の冗長性を持つ電気システム [11]は信頼性を高める。多くの接点と電気接続があるせいで、冗長性を持たない接続は十分な信頼性を持たないとされているので、様々なOEMは既に冗長性を持つ接続を導入している。それに対して、電気システムは走行中には非常に信頼性があるとされている [11]。

ブレーキシステムの変化

走行の自動化が進んだ結果として、**表3**に示されているモジュールと機能1~7においてブレーキシステムは変化している。必要な安全性のためには、OEMまたは官庁の要求とは無関係に、モジュール1~5の作動原理は、完全な冗長性を持って、または部分的な冗長性を持って設計されねばならない。

レベル2 (DAS)においては冗長性を持つ圧力供給は不要である。冗長性を持つペダルセンサーは、このレベルでは既に最新式である。可変ペダルフィールは、このレベルではまだ受け入れられない。

レベル3 (HAD)からは、上述の影響要因により、十分な体積を用意した、冗長性を持つ圧力供給が初めて絶対に必要とされる。さらに、既に詳述したように、開放ブレーキシステムにおけるブレーキ回路のタンク(VB)との接続は避けねばならず、また、ペダルフィールと体積要件における利点のせいで、ペダルシミュレーターを使用しなければならない。さらにE-BKVも、ESCが故障した際には、常に大きな車両減速を保証するために、圧力変調機能を引き受けねばならない。ここでは、第一歩として、ABS-Select-Lowによる調整が導入される。

レベル4 (FAD)以降は、十分にシステムを利用しうるために、三重の冗長性が期待され、ペダルストロークセンサーでは「2/3」ルールが適用される。さらに、電気自動車の回復性能向上のせいで、また、ペダル特性の変化が受け入れられていないせいで、ペダルシミュレーターは必須である。その理由は、FADが比較的長時間にわたって行われることがあるからであり、また、ドライバーがパイロット走行への移行の際に、ペダル特性の変化に対する準備ができていないからである。圧力供給を監視するためには、冗長性を持つ圧力伝送器を備えるべきである。さらに少なくとも軸固有の調節を行いうる、冗長性を持つABS機能が

コンポーネント	エラー/問題	エラー/問題の影響	診断可能性
ピストンシール	一般的漏出。低圧では液密性が保たれているものの、高圧では漏出。	ピストン機能の故障。パシミュレーターにおいてこれはペダルシミュレーターの故障につながる(DVではこれはDVの故障につながる)。	冗長性を持つシールの診断(図中の破線)は不可能(漏出は潜在欠陥である)。
電磁弁	弁座中の汚染粒子により弁の確実な閉鎖機能が失われている。	開放ブレーキシステムにおける出口弁では、これはブレーキ回路の故障につながる。開放ブレーキシステムにおけるバイパス弁では、これはDVの故障につながる。	弁が開いている場合、漏出の診断は不可能である(漏出は潜在欠陥である)。
ボールねじ	汚染粒子がベアリングトラックの中に達する。	ねじ軸が回らなくなる。	診断は可能であるものの、散発的にしか出現しないので解決法はない。

表1 機械装置と油圧装置の部分におけるエラー発生可能性と診断可能性に関する考察

変種 1	変種 2	変種 3	変種 4
 a: ECU interface, T: Brake master cylinder, B1: Electric system 1, B2: Electric system 2, P: Pressure supply, EM: Electric motor	 a: ECU interface, T: Brake master cylinder, B1: Electric system 1, B2: Electric system 2, P: Pressure supply, EM: Electric motor	 a: ECU interface, T: Brake master cylinder, B1: Electric system 1, B2: Electric system 2, P: Pressure supply, EM: Electric motor	 a: ECU interface, T: Brake master cylinder, B1: Electric system 1, B2: Electric system 2, P: Pressure supply, EM: Electric motor
<p>a, b, c: ECU インターフェース, T: ブレーカー, B1: 電気システム1, B2: 電気システム2, P: 圧力供給, EM: 電気モーター</p> <p>システムAとBは別の電気システムに接続されている。</p> <p>システムAとBに対して冗長性の影響はない。</p>	<p>システムAとBは両方の電気システムに接続されており、ブレーカーによって切り離される。</p> <p>システムAとBに対して冗長性の影響がある。費用と電圧損失を考慮しなければならない。</p>	<p>電気システム2に接続された、部分的な冗長性を持つECUを備えたシステムA</p> <p>部分システムに対して冗長性の影響がある。システムAが部分的機能においてBに対して冗長性を持つ場合、これは費用軽減的な解決法である。</p>	<p>両方の電気システムに接続された、冗長性を持つECUを備えたシステムAとB</p> <p>システムレベルと電気システムに対して完全に冗長であり、非常に費用のかかる解決法である。</p>

表2 冗長性を持つ、あるいは部分的に冗長性を持つシステムAとBの様々な変種の評価 (© LSP)

必要とされるであろう。また、部分的冗長性が導入される。閉鎖ブレーキ回路を持つブレーキシステムは、ABS機能において、安全性の利点を持つであろう。

レベル5 (AD)においては、ペダルストロークセンサーとペダルシミュレーター及びそれらの特性はもはや重要ではない。しかし、それ以外のコンポーネントと部分システムは、センサー、ESCユニット、部分ECUにおける「2/3」ルールを持つ三重の冗長性、または多重の冗長性を示さねばならないであろう。

要約と展望

レベル3 (HAD)のための、またそれにも増してレベル4 (FAD)におけるブレーキシステムは、冗長性を持って、または部分的な冗長性を持って設計されねばならない。エラーが発生する場合、ABS機能の縮小を伴う高度な車両減速が保証されねばならない。同様に隔壁におけるユニットの体積が、また全長の縮小が益々重要になる。

HADでは、ESCユニットを含むペダル

		モジュール／機能						
SAE レベル*	圧力供給 1	ペダルストローク 2	圧力伝送器 3	冗長性を持つ ABS 4	ペダルシミュレータ 5	ペダルフィール 6	追加 7	
SAE レベル*								
レベル2 (DAS)				-	-		-	
レベル3 (HAD)	2x							
レベル4 (FAD)	2x							
レベル5 (AD)	2x	-			-	-	-	

*ドライバー支援システム (DAS)、高度に自動化された運転 (HAD)、完全自動運転 (FAD)、自律運転 (AD)

表3 DASからADまでの様々な自動化レベルにおけるブレーキシステムのモジュール (1-5) 及び機能 (6-7) (© LSP)

シミュレーターを備えたE-BKVを持つ Two Boxシステムのような、またはペダルシミュレーターを備え、かつ圧力調整のための縮小追加ユニットを備えたOne-Boxシステムのような、様々なシステムが競合している。FADでは、冗長性を持つOne-Boxユニットへの統合、または Two-Boxモジュールの最適化が行われるであろう。また、新たな操作コンセプトを伴う、純粹なブレーキ・バイ・ワイヤ (Brake-by-Wire) による解決法への変革が開始される。

X-BoostとESC [8] はHADの要求を満たしており、さらに、FADのための僅かな、実施されていない変更を伴う拡張レベルが既に定義されている。ADは、無人運転の取るに足りないわけではない技術的要件のせいで、まだ時間を要するであろう。しかし、閉鎖ブレーキシステムの特徴を備えた技術革新による新たな解決法、機能制限を伴わないABS駆動の冗長性、解決法全体への駐車ブレーキの組み込み、並びにシステムに関連するE/Eの部分的冗長性及び完全冗長性は、既にコンセプトとしては存在している。

2021年以降、様々な装備率を持つ、統合One-Boxシステム [5] とTwo-Box式解決法 [4, 10] が、欧州、米国、及び中国における主要な自動車市場で共存し、

それらは大量の個数に達するであろう。2022年以降、インドでESCシステムがすべての新たな自動車に組み込まれた後では、ESCが標準であるという前提から出発せねばならないのである。

参考文献

- [1] ヴィッテ (Witte), B.; バルテンハイマー (Barthenheimer), T.; ラング (Lang), H.; ヴィッテ (Witte), K.; オーリヒ (Ohlig), B.: 電気機械式ブレーキ支援のための装置と方式 (Vorrichtung und Verfahren zur elektromechanischen Bremsunterstützung)。欧州特許文書 (Europäische Patentschrift) EP 1 896 309 B1, 出願日: 2006年5月5日
- [2] ライバー (Leiber), T.; ウンターフラウナー (Unterfrauner), V.; ケーグルシュペルバー (Köglspurger), C.: IBS—統合ブレーキシステム (Integrated Brake System)。現代産業会議 (Tagung der modernen Industrie)、2010年6月15日
- [3] ライバー (Leiber), T.; ウンターフラウナー (Unterfrauner), V.; ケーグルシュペルバー (Köglspurger), C.: 組合機能を備えたモジュラー式ブレーキシステム (Modulares Bremssystem mit integrierten Funktionen)。ATZ 113 (2011)、第6号所収、466~472ページ。
- [4] クンツ (Kunz), A.; クンツ (Kunz), M.; 他 (et al.): 全駆動コンセプトと自動運転のための電気機械式ブレーキブースター (Elektromechanischer Bremskraftverstärker für alle Antriebskonzepte und automatisiertes Fahren)。ATZ 120 (2018)、第4号所収、60~65ページ。
- [5] ブロイラー (Breuer), B.; ビル (Bill), K.-H. (編) : ブレーキハンドブック (Bremsenhandbuch)。第20.3章: 統合ブレーキシステム (Integriertes Bremssystem) MK C1, 第5版, 2017年
- [6] ヴァイバーレ (Weiberle), R.; ツァーン (Zahn), T.; 他 (et al.): ブレーキブースターとその駆動のための方式と装置 (Bremskraftverstärker sowie Verfahren und Vorrichtung zu dessen Betrieb)。ドイツ特許文書 (Deutsche Patentschrift) DE 10 2010 001 939 B4, 出願日: 2010年2月15日
- [7] ライバー (Leiber), H.; ライバー (Leiber), T.; ウンターフラウナー (Unterfrauner), V.: パスシミュレーターを伴わないブレーキシステム (Bremssystem ohne Wegsimulator)。ドイツ特許文書 (Deutsche Patentschrift) DE 11 2009 004 636 B4, 出願日: 2009年2月3日
- [8] ライバー (Leiber), H.; ライバー (Leiber), T.: ブレーキシステム (Bremssystem)。国際特許出願 (Internationale Patentanmeldung) WO2018/233854A1, 公表年月日: 2018年12月27日
- [9] ビラー (Biller), H.; シュタウダー (Stauder), P.; ベージー (Besier), M.; ファイゲル (Feigel), H.-J.: 自動車のためのブレーキ装置 (Bremsanlage für Kraftfahrzeuge)。欧州特許文書 (Europäische Patentschrift) EP 2699459 B1, 出願日: 2014年2月26日
- [10] ライバー (Leiber), T.; ケーグルシュペルバー (Köglspurger), C.; ヘッカー (Hecker), C.: X-Boost と IBS-Gen3: 未来のブレーキシステムのための要求と解決の試み (Herausforderungen und Lösungsansätze für zukünftige Bremssysteme)。ドイツ技術者協会知識フォーラム (VDI-Wissensforum)、ハンノーファー (Hannover), 2017年10月25日
- [11] プレヒラー (Prechler), R.: 高度に自動化された運転のための冗長性を持つ電気システム (Redundante Bordnetze für Hochautomatisiertes Fahren)。第22回自動車電子工学国際会議 (Internationaler Kongress Automobil-Elektronik)、ルートヴィヒスブルク (Ludwigsburg)、2018年6月19日~20日

Imprint:
Special Edition 2019 in cooperation with LSP Innovative Automotive Systems GmbH, Feringastrasse 11, 85774 Unterföhring;
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH,
Postfach 1546, 65173 Wiesbaden
Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

MANAGING DIRECTORS:
Stefanie Burgmaier | Joachim Krieger | Juliane Ritt
HEAD OF CORPORATE SOLUTIONS:
Markus Bereszewski
PROJECT MANAGEMENT: Anja Trabusch

PRINT:
PRINT PRODUKTION-SERVICE, W. Hiese GmbH,
Tilsiter Weg 9, 61273 Wehrheim
COVER PHOTO: © LSP Innovative Automotive Systems GmbH



LSP

Innovative Automotive Systems

www.lsp-ias.com