IBS Technologie

Autor: Dr. Thomas Leiber (Gründer, LSP Innovative Automotive Systems GmbH)
Co-Autor: Dr. Anton van Zanten (Berater, IPGATE AG)

1 Einführung

Seit der Markteinführung von ABS, ASR und ESP in den Jahren 1978, 1986 und 1995 haben sich Druckmodulationssysteme für die Bremse auf Basis des Rückförderprinzips durchgesetzt. In einer Baueinheit sind Ventilblock, Elektromotor, Pumpe, 8 oder 12 Magnetventile, Speicherkammer und später bei der ESP, mit Druckgeber und dem elektronischen Steuergerät (ECU) zusammengefasst und räumlich getrennt zum Bremskraftverstärker (BKV) im Motorraum verbaut [1, 2]. Konzepte, bei denen die Bremskraftverstärkung und Druckmodulation integriert sind, waren bereits in den 1980er Jahren auf dem Markt (z.B. MK II, ABS 3), konnten sich aber aus Kostengründen nicht durchsetzen.

Die Optimierung der Ottomotoren sowie die Entwicklungen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen zu Beginn des 21. Jahrhunderts erforderten erstmalig eine elektrische Vakuumpumpe. Die damit verbundenen Mehrkosten von klassischen Bremssystemen lieferten die Motivation für das neue Konzept eines integrierten Bremssystems mit einem nicht-hydraulischen Getriebe sowie einer elektrischen Power-on-demand-Bremskraftverstärkung (e-BKV) und Druckmodulation (ABS/ESP-Funktion). In den Jahren 2005 bis 2009 wurden von den Firmen IPGATE AG und LSP Innovative Automotive Systems GmbH zwei Varianten der IBS-Technologie in der Form von **I**ntegrierten **B**rems**s**ystemen mit unterschiedlichen Wegsimulatoren (als „IBS Basic“ und „IBS Premium“ bezeichnet) entwickelt und an mehrere Bremssystemhersteller mit maßgeblichen Marktanteilen lizenziert. **Abb.** 1 zeigt in einem ersten Überblick die erheblichen Fortschritte in Bauvolumen und den Einbauaufwand im Vergleich zum Vakuumbremskraftverstärker mit elektrischer Vakuumpumpe und ESP [3].

Dabei deckte das IBS bereits 2009 alle Anforderungen eines zukünftigen Bremssystems für das teilautomatisierte Fahren (auch als „SAE Stufe 2“ bezeichnet) ab. Mit der Einführung eines zugleich leistungsstarken und hochdynamischen Elektromotors wurde zudem die Basis für neue Wirkprinzipien und Hauptfunktionen geschaffen, wie z.B. die automatische Notbremsfunktion

(AEB), welche durch einen sehr schnellen Bremsmomentanstieg in ca. 150 ms bis zum Radblockierdruck (in Fachkreisen als „Time-to-lock“ oder „TTL“ bezeichnet) gekennzeichnet ist.

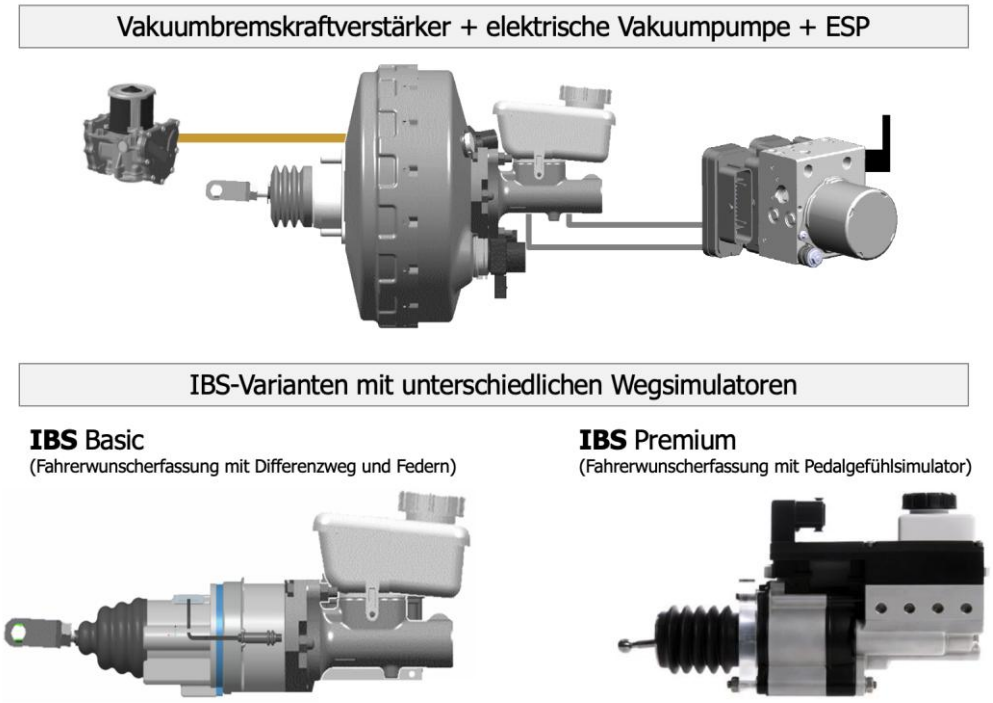


Abb. 1 Vergleich IBS-Varianten mit Vakuumbremssystemen

2 Grundlagen

2.1 PPC-Verfahren

Kern des PPC-Verfahrens **(PPC: P**iston **P**ressure **C**ontrol**)** ist ein permanenterregter bürstenloser elektronisch kommutierter Innenläufermotor mit Seltenen Erden Permanentmagneten (als PMSM-Innenläufermotor oder hochdynamischer EC-Motor bezeichnet), welcher über ein mechanisches Getriebe (Zahnstange oder Spindeltrieb) den Druckstangenkolben eines Tandem-Hauptbremszylinders (THz) zur Druckerzeugung in den zwei Bremskreisen BK1 und BK2 antreibt. Der hochdynamische EC-Motor hat drei Phasen, ist sinuskommutiert, weist Stromsensor i/U sowie Rotorwinkelgeber α/U auf und wird mit einem Dreiphasengleichrichter (sog. B6-Brückenschaltung mit 6 Leistungshalbleitern sowie einer Sternpunktverschaltung) über einen

© IPGATE AG

Microcontroller geregelt. Die Ansteuerung über einen Microcontroller ermöglicht eine Vektorstromregelung mit d- und q-Vektoren (als I_d/I_q-Stromregelung bezeichnet), wobei der q-Vektor das Drehmoment und der d-Vektor die magnetische Flussdichte abbildet. Durch Anwendung der Vektorregelung kann der EC-Motor im Impulsleistungsbetrieb durch Feldschwächung (I_d-Stromregelung) im Vergleich zu Gleichstrommotoren mit Blockkommutierung signifikante Leistungssteigerungen erzielen. Aufgrund der bekannt hohen Auflösung des Rotorwinkelgebers sowie der großen Getriebeübersetzung zwischen EC-Motor und Druckstangenkolben ist eine Positionsbestimmung des Druckstangenkolbens des THz im µm-Bereich sowie durch hohe Abtastzeiten des leistungsstarken Microcontrollers im µs-Bereich eine sehr genaue Geschwindigkeitsberechnung des Kolbens möglich. Für die Bremskraftverstärkerfunktion ist auch bei bekanntem Wirkungsgrad des Getriebes eine I_q-Stromregelung möglich. Um dies umzusetzen, wird der Zusammenhang zwischen Druck und dem Drehmoment bildenden Strom I_q durch einen Druckgeber (p/U) ermittelt und regelmäßig im Betrieb abgeglichen, so dass ein Kennfeld $p=f(I_q)$ angelegt werden kann. Der Druckgeber (p/U) wird ferner zur Ermittlung einer Druckvolumenkennlinie bzw. Druckkolbenwegkennlinie verwendet.

Durch Nutzung der o.g. Sensorik sowie einer modellbasierten Softwarestruktur können die physikalischen Zusammenhänge für eine Drucksteuerung oder eine Druckregelung verwendet werden. Der Regler ist kaskadiert aufgebaut mit einem Druckregler und/oder Kolbenpositionsregler im äußeren Regelkreis und einer I_d/I_q-Stromregelung des EC-Motors in den innersten Regelkreis. Zwischen äußerem und innerem Regelkreis wird sinnvollerweise noch ein Aktorgeschwindigkeitsregler integriert. Adaptive Kennfelder (z.B. Druck-Weg-Kennlinie des Druckstangenkolbens) werden entweder zur Vorsteuerung bei dynamischen Druckänderungen oder zur Druckregelung mittels Kolbenposition verwendet. Die Motorsensoren werden sowohl zur Bremskraftverstärkung als auch zur Druckmodulation verwendet.

Diese Art der Regelung wird als PPC-Verfahren **(PPC: P**iston **P**ressure **C**ontrol**)** bezeichnet. Ausführungsformen des PPC-Verfahrens sind in zahlreichen Patentschriften dokumentiert und rechtlich geschützt [5,6,7,8,9]. Die wichtigsten Zusammenhänge sind in **Abb. 2** illustriert.

© IPGATE AG

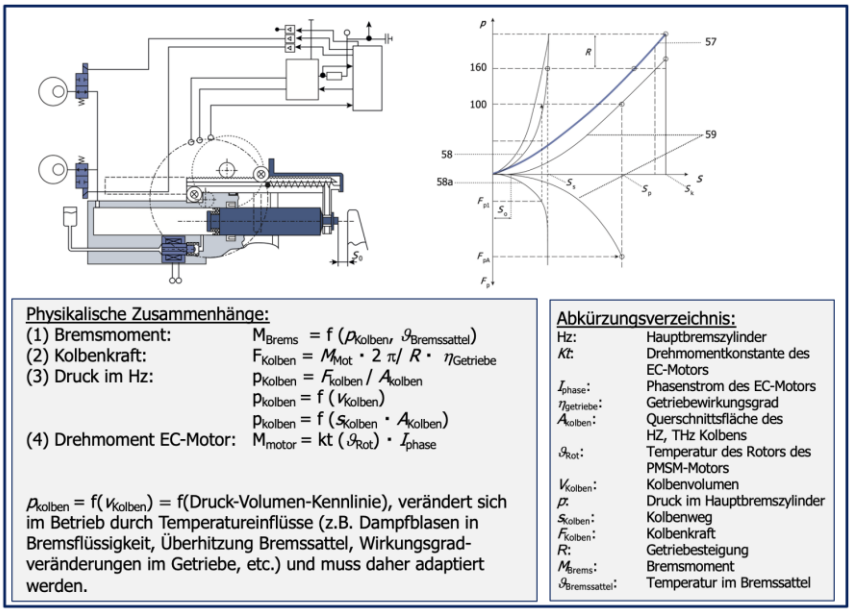


Abb. 2 Essentialen des PPC-Verfahrens

2.1 Hochdynamischer EC-Motor

Bremssysteme mit Vakuumbremskraftverstärker stellen keine besonderen Anforderungen an den Elektromotor der ABS-Rückförderpumpe, vielmehr geht es um dessen kostengünstige Herstellung. Daher wurde ein Gleichstrommotor eingesetzt. Der Gleichstrommotor erfüllte alle Anforderungen, da für den Vakuumbremskraftverstärker nur die Erzeugung und die statische Aufrechterhaltung eines Unterdrucks erforderlich ist. Der Bremsdruck und Vordruck für den ABS-Regelbetrieb wird im Hauptbremszylinder erzeugt. Der Gleichstrommotor muss primär das über Auslassventile in die Speicherkammer der ABS/ESP-Einheit abgelassene Volumen in den Hauptbremszylinder zurückfördern. Der Gleichstrommotor der ESP/ABS-Einheit übernimmt zudem bestimmte Bremskraftunterstützungsfunktionen, in der Fachsprache z.B. als „HBA (Hydraulic Brake Assist)“, „HBB (Hydraulic Brake Boost)“, „HBC (Hydraulic Boost Failure Compensation“, „HFC (Hydraulic Fading Compensation)“ bezeichnet sowie Fahrerassistenzfunktionen (als „ADAS“ bezeichnet) wie z.B. die automatische Notbremse AEB. Diese Funktionen wurden gemäß der Leistungsfähigkeit des Gleichstrommotors der ESP/ABS-Einheit spezifiziert und ermöglichten nur eine Notbremse mit begrenzter Dynamik.

Als Enabler der IBS-Technologie wurde erstmalig im Jahr 2004 ein hochdynamischer EC-Motor [4], nämlich ein bürstenloser Innenläufermotor mit Seltenen Erden [5,6,7,8,9] mit einer

© IPGATE AG

Spitzenleistung von ca. 700 Watt eingeführt, wobei die Motorleistung ca. um Faktor 4 im Vergleich zu einem Gleichstrommotor einer Standard ESP-Einheit gesteigert wurde, zudem konnte die Leistung nach Erreichen der Maximalleistung durch feldorientierte Vektorregelung auch bei höheren Motordrehzahlen konstant gehalten werden. Die Leistungsfähigkeit eines 12V-Bordnetzes wurde dabei maximal ausgenutzt. Zudem hatte der Elektromotor in beiden IBS-Varianten ein um ca. Faktor 5 dynamischeres Ansprechverhalten. Zur Charakterisierung der Dynamik des EC-Motors wurde der Beschleunigungskennwert M_{max}/Θ (Verhältnis des maximalen Drehmoments M_{max} des EC-Motors zur Trägheitsmasse Θ der bewegten Teile) vereinfachend als Zeitkonstante der IBS-Technologie bezeichnet. Diese vereinfachte Definition der Zeitkonstante basiert darauf, dass die Zeitdauer des Drehmomentaufbaus für den dynamischen Druckaufbau von untergeordneter Bedeutung ist.

In **Abb. 3** sind Leistungsdaten und Zeitkonstante von Elektromotoren eines Standard ESP-Systems (ESP Standard), der IBS-Technologie mit Multiplexregelung (IBS MUX), eines typischen 1-Box-Bremssystems (1-Box-Bremssysteme sind gekennzeichnet durch Funktionsintegration der Bremskraftverstärkung und Druckmodulation sowie Betätigungseinrichtung in einer Baueinheit) mit Druckmodulation mittels Einlass- und Auslassventilen (EV/AV) sowie eines elektrischen Folgebremskraftverstärkers mit Differenzwegregelung zwischen Pedalweg und Verstärkerweg im Vergleich dargestellt.

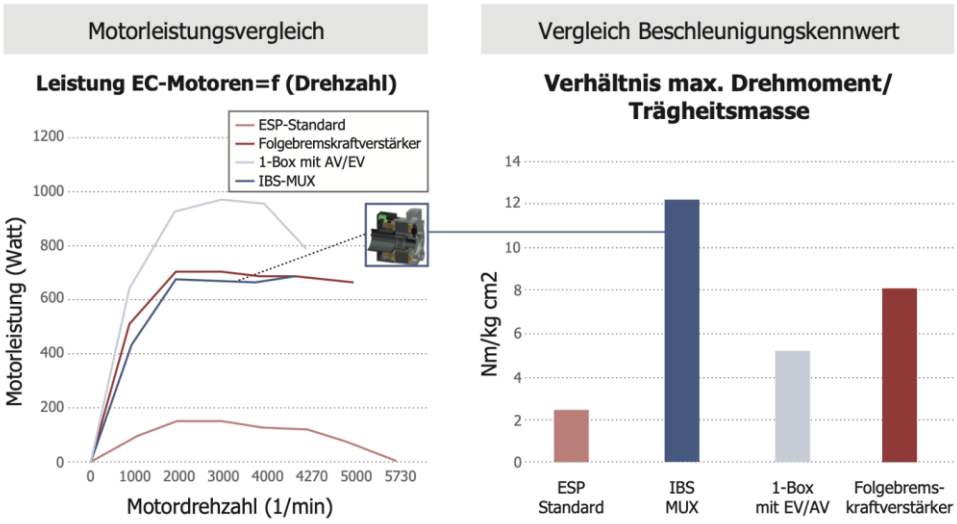


Abb 3 Vergleich von Elektromotoren in Bremssystemen

© IPGATE AG

Im Gegensatz zu ESP-Standard-Bremssystemen haben alle modernen Bremssysteme (1-Box-Bremssyteme mit EV/AV, elektrische Folgebremskraftverstärker, IBS MUX) hochdynamische elektrisch kommutierte PMSM-Innenläufermotoren als Antrieb der Druckversorgung vorgesehen, wobei die EC-Motoren über einen Microcontroller mit feldorientierter Vektorregelung geregelt werden.

Im Leistungsvergleich liegt IBS-MUX vergleichbar mit dem Folgebremskraftverstärker und wird durch den EC-Motor eines 1-Box-Bremssystemes in der Leistung übertroffen. Die maximale Leistung des 1-Box-Motors mit EV/AV ist größer als die maximale Leistung des Folgebremskraftverstärkers, weil beim Folgebremskraftverstärker der Fahrer mit seiner Fußkraft die Bremswirkung unterstützt. Zudem wird im Vergleich zum IBS-MUX aufgrund größerer hydraulischer Strömungswiderstände zwischen Druckversorgungseinheit und Radbremsen für einen gleichen hochdynamischen Druckaufbau (TTL) ebenfalls mehr Leistung benötigt.

Im Beschleunigungskennwertvergleich ist IBS am dynamischsten, was durch Multiplexanforderungen für das dynamische Reversieren des Motors primär begründet ist. Elektrische Folgebremskraftverstärker setzen ebenfalls hochdynamische Motoren ein, mehr als Faktor 3 dynamischer als Motoren von Standard ESP-Systemen. Dies liegt darin begründet, dass das Wirkprinzip der hochdynamischen Differenzwegregelung annähernd vergleichbare Dynamikanforderungen wie das Multiplexen hat.

2.2 Fahrerwunscherfassung

Beim klassischen Vakuumbremskraftverstärker ist eine Fahrerwunscherfassung nicht zwingend erforderlich. Prinzipbedingt wird die Ventilfunktion des Vakuumbremskraftverstärkers durch passive Bauelemente realisiert, so dass immer eine zur Pedalkraft proportionale Verstärkung erfolgt [10]. Bei fehlendem Unterdruck muss der Bremsdruck durch den Fahrer ausschließlich mit Fußkraft erzeugt werden, wobei die Dimensionierung des Hauptbremszylinders das Pedalgefühl bestimmt.

Neuere elektrische Bremssysteme werden entsprechend der beiden IBS-Technologievarianten IBS Basic und IBS Premium klassifiziert in elektrisch angetriebene Folgebremskraftverstärker und Bremskraftverstärker mit Pedalgefühlsimulator (auch „Brake-by-Wire mit hydraulischer Rückfallebene“ genannt). Nachdem elektrische Bremskraftverstärker basierend auf einer Kraftmessung mit einem Kraftmessgeber, z.B. einem Piezosensor [11,12] sich primär aufgrund der Komplexität, z.B. der Signalübertragung beweglicher Teile, als nicht zielführend erwiesen,

© IPGATE AG

etablierten sich im Wesentlichen zwei Wirkprinzipien der Fahrerwunscherfassung, deren Ausführungsformen in **Abb. 4** dargestellt sind:

A: Fahrerwunscherfassung auf Basis des Differenzweges von Pedalstößel und Verstärkerkolben

B: Fahrerwunscherfassung mittels Sensoren (Pedalweg, Druckgeber und/oder Kraft-Weg-Sensor KWS) sowie Nutzung eines Pedalgefühlsimulators

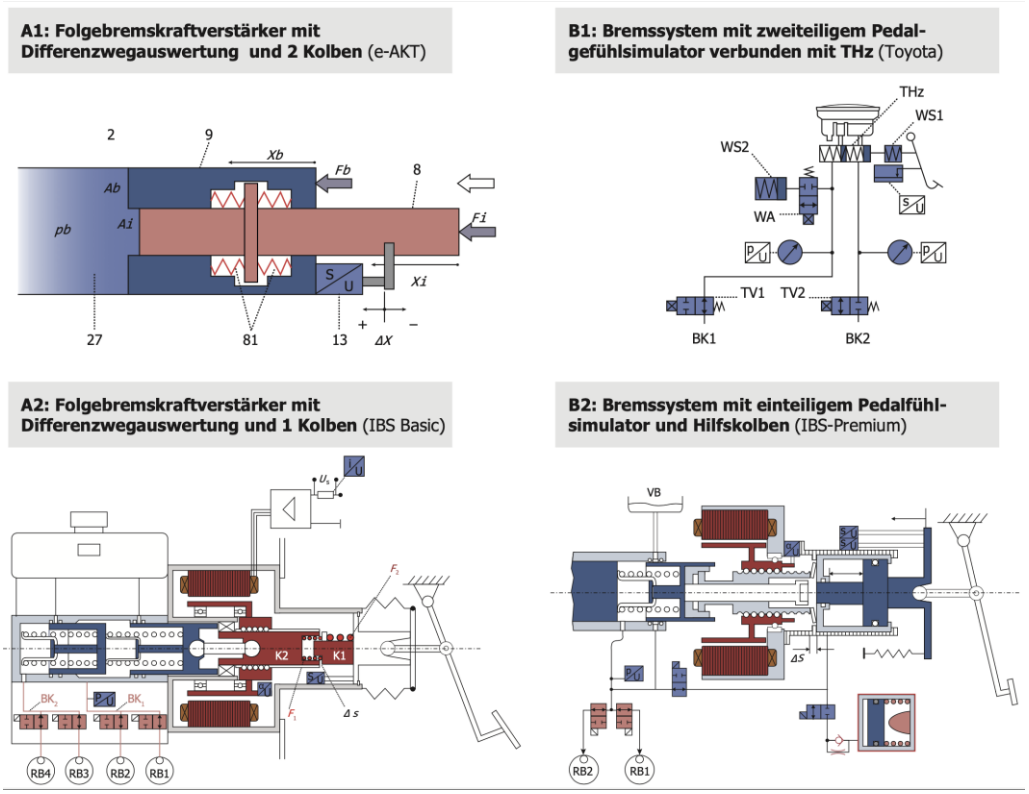


Abb. 4 Prinzipien der Fahrerwunscherfassung

Das Messprinzip **A1** basiert auf der Wegdifferenzmessung zweier Kolben, die Druck erzeugen und auf dem primären Druckraum des Hauptbremszylinders wirken [13]. Das Messprinzip fand Eingang in die erste elektrisch angetriebene Serienbremskraftverstärkerlösung (als Produkt **e-ACT von der Firma Hitachi Automotive Systems** bezeichnet), wird aber wegen der hohen

© IPGATE AG

Komplexität des Aufbaus zweier paralleler beweglicher Kolben und höherer Präzisionsanforderungen an die Dichtheit nur noch in kleiner Stückzahl hergestellt.

Messprinzip **A2** basiert auf der Differenzwegregelung zweier Kolben, die auf den Hauptbremszylinder wirken, wobei der erste Kolben K1 durch das Bremspedal betätigt und der zweite Kolben K2 von einem hochdynamischen EC-Motor angetrieben wird, wobei sich Pedalkraft und Motorkraft in der Kraftwirkung auf den Druckstangenkolben aufsummieren. Ein hochdynamischer EC-Motor ist eine Grundvoraussetzung des Messprinzips, um auch bei schneller Pedalbetätigung durch den Fahrer ein gutes Pedalgefühl zu gewährleisten. Charakteristisch für das Messprinzip ist zudem ein Leerweg Δs zwischen Kolben K1 und Übertragungseinrichtung (Kolben K2) vorgesehen, wobei der EC-Motor über ein Getriebe auf die Übertragungseinrichtung wirkt. Durch den Leerweg wird eine sog. Jump-in-Phase, welche dem Springer des pneumatischen Bremskraftverstärkers entspricht, zu Beginn der Bremspedalbetätigung definiert. Ferner wirken zur Abbildung einer progressiven Federkennlinie zwischen Bremspedal und Druckstangenkolben mehrere in Reihe geschaltete Federelemente F1 und F2 [14,15].

Messprinzip **B1** basiert auf einer Fahrerwunscherfassung mit Pedalwegsensor und Druckgeber, zudem wird ein Pedalgefühlsimulator eingeführt, der aus einer ersten und zweiten Baugruppe besteht [16]. Die erste Simulatorbaugruppe ist rein mechanisch, während der zweite Simulator, an den Hauptbremszylinder angeschlossen ist und das vom Hauptbremszylinder geförderte hydraulische Fluid aufnimmt. Druckgeber messen den Druck in den Druckkammern des Hauptbremszylinder und dienen zur Fahrerkrafterfassung und Überwachung der zweiten Simulatorbaugruppe. Des Weiteren ist der Hauptbremszylinder von den Bremskreisen durch schaltbare Magnetventile hydraulisch trennbar, so dass ein reiner Brake-by-Wire-Betrieb mit hydraulischer Rückfallebene möglich ist.

Messprinzip **B2** basiert auf einer Fahrerwunscherfassung mit redundanten Pedalwegsensoren sowie einem Pedalgefühlsimulator, der an einer hydraulischen Kolben-Zylinder-Einheit angeschlossen ist. Es ist ein einteiliger Pedalgefühlsimulator mit mehreren elastischen Elementen (Feder & Elastomer) zur Abbildung einer nichtlinearen Kraft-Weg-Charakteristik vorgesehen [17].

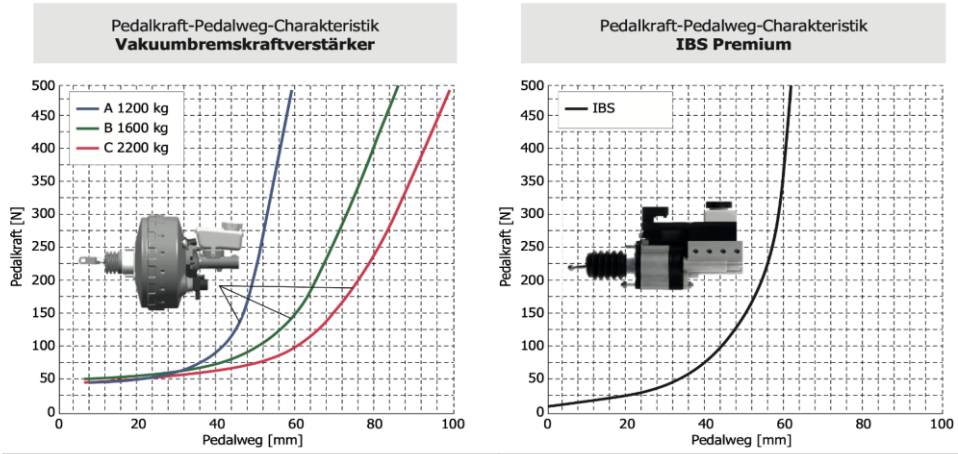
Elektrische Folgebremskraftverstärker sind weitverbreitet in Elektrofahrzeugen im Markt (Tesla, Volkswagen) und basieren auf dem Messprinzip **A2**, während elektrische Bremssysteme mit Pedalgefühlsimulator im Markt Messprinzip **B1** und einen einteiligen Pedalgefühlsimulator nach

© IPGATE AG

Messprinzip **B2** vorsehen, der im Gegensatz zu Ausführung **B2** jedoch an eine Druckkammer des THz angeschlossen ist. In dem neueren elektrischen Bremskraftverstärker für automatisiertes Fahren X-Boost + ESP [18] ist ebenfalls ein Kraft-Weg-Sensor [19] vorgesehen für die Notfunktion „Knopfbremse“, damit auch bei blockierenden Kolben noch ein Fahrerwunsch erfasst und eine Bremsung durchgeführt werden kann.

2.3 Pedalcharakteristik

Abb. 5 zeigt auf der **linken Seite** unterschiedliche Pedalcharakteristiken heutiger Fahrzeuge mit Vakuumbremskraftverstärker, die im Allgemeinen vom Fahrzeuggewicht abhängig sind. Dies ist damit begründet, dass das Volumen zum Betätigen der Radzylinder in der Regel mit dem Fahrzeuggewicht ansteigt, da mit dem Fahrzeuggewicht auch die Anpresskraft der Radzylinderkolben wächst. Mit vorgegebenem Pedalweg, Pedalübersetzung und Volumen ergibt sich die Dimensionierung des Hauptbremszylinders.



THz Hub ist fest an Pedalhub gekoppelt	THz Hub ist im Normalbetrieb vom Pedalhub abgekoppelt
Der gesamte THz Hub muss vom Pedal erreichbar sein	THz Hub kann größer als Pedalhub sein → Pedal erreicht nur 75% vom Gesamtvolumen → THZ wird vom Spindeltrieb betätigt
Pedalhub ist begrenzt → Volumen muss durch großen THz-Durchmesser $Ø_{THz}$ abgedeckt werden → hohe Pedalkräfte bei BKV Ausfall	Spindel Hub ist nicht begrenzt → Volumen kann durch THz Hub abgedeckt werden → $Ø_{THZ}$ kann reduziert werden → niedrigere Kräfte bei BKV Ausfall
Übersetzung (i_{Ped}, $Ø_{THz}$) muss für Maximalvolumen ausgelegt werden	**Übersetzung (i_{Ped}, $Ø_{THz}$) kann optimal auf BKV Ausfall abgestimmt werden**

Abb.5 Hauptmerkmale Pedalcharakteristik IBS mit Pedalgefühlsimulator im Vergleich zum Vakuumbremskraftverstärker

© IPGATE AG

Abb. 5 zeigt auf der **rechten Seite** eine typische Pedalcharakteristik eines Bremssystems mit Pedalgefühlsimulator (IBS Premium), die aufgrund der Tatsache, dass der Bremskraftverstärker im Normalbetrieb vom Bremspedalhub abgekoppelt ist, frei variabel gestaltbar ist und durch eine Kombination von Federn und Elastomeren abgebildet wird. Mit einem Pedalgefühlsimulator kann somit unabhängig vom Fahrzeuggewicht eine ideale Pedalcharakteristik gestaltet werden.

Neben der Pedalcharakteristik im Normalbetrieb ist auch die Pedalcharakteristik bei BKV-Ausfall zu berücksichtigen. (**Abb 6**). IBS hat für die Dimensionierung des THz den großen Vorteil der Entkopplung von Pedalweg und Hauptbremszylinderkolbenweg. Die Entkopplung wurde beim IBS Premium derart genutzt, dass ein deutlich kleinerer THz-Kolbendurchmesser (19,05 mm) als bei Standardvakuumbremskraftverstärkern (23,8 mm bis 26,9 mm) eingesetzt wurde, was bei Ausfall des Bremskraftverstärkers ein entscheidender Vorteil ist. Denn somit lassen sich für die Rückfallebene bei einer Pedalübersetzung i_{Ped} von 4 mit der vorgeschriebenen 500 N Fußkraft 50 bis 60 bar Bremsdruck und somit über 5 m/s^2 Verzögerung erzielen (UN/ECE-Forderung: ≥2,44 m/s²), was vom Fahrer positiv bewertet wird und für Systemauslegungen von neuen Bremssystemen unter Berücksichtigung von kritischen Einzelfehlern, z.B. dem Bremskreisausfall von 1-Box-Systemen der ersten Generation mit druckbegrenzender Auslegung der Trennventile genutzt werden kann. Dahingegen kann bei einem SUV mit einem 27 mm Durchmesser bei einer Pedalübersetzung i_{Ped} von 4 sowie 500N Fußkraft nur ca. der halbe Bremsdruck i.V. zu IBS erzeugt werden, womit die UN/ECE-Forderung nur grenzwertig erfüllt wird.

Zudem ist die Pedalcharakteristik wie in **Abb 6** dargestellt, beim IBS im Anfangsbereich bei intakter und ausgefallener Verstärkung nahezu identisch, während beim Vakuumbremskraftverstärker die Anfangskraft bei Ausfall signifikant ansteigt (20 N → 130 N) und durch einen sehr steilen Anstieg gekennzeichnet ist, d.h. der Fahrer fühlt ein hartes Pedal. Diese Veränderung der Charakteristik ist sicherheitsrelevant, weil der Fahrer bei Ausfall des Bremskraftverstärkers auf die veränderte Situation nicht vorbereitet ist.

© IPGATE AG

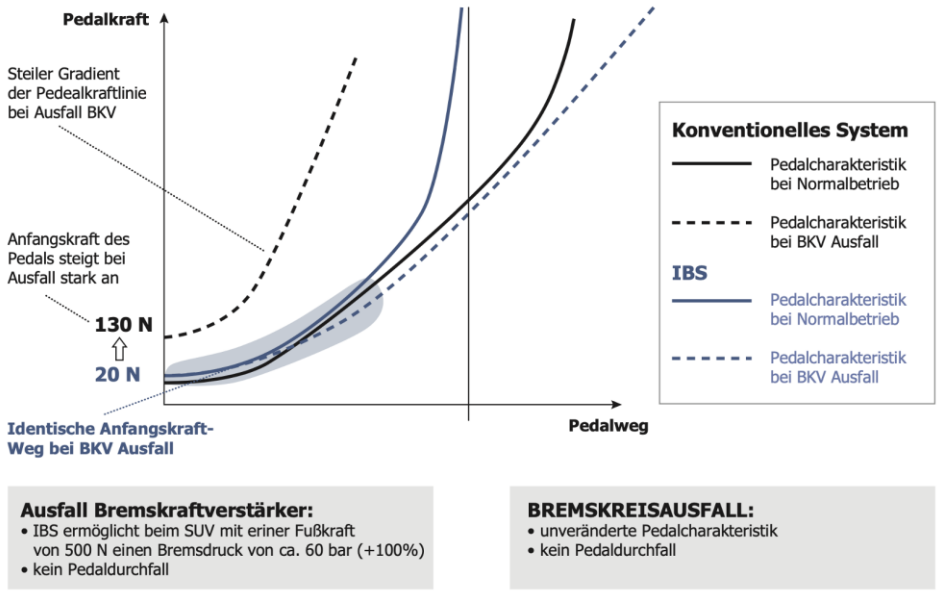


Abb 6 Pedalcharakteristik IBS im Vergleich zu konventionellem Vakuumbremskraftverstärker

In den ersten Ausführungen von Bremssystemen mit Pedalgefühlsimulator (**Abb. 4,** Ausführungsform B1) wird Bremsflüssigkeit aus der Sekundärkammer des Hauptbremszylinders in den Pedalgefühlsimulator verschoben. Fällt der Wegsimulator während der Bremsung aus, so fehlt die Bremsflüssigkeitsmenge, die in den Wegsimulator verschoben wurde, bei der Bremsung in der Rückfallebene. Die Folge ist ein Teilausfall des entsprechenden Bremskreises und eine verminderte Abbremsung in der Rückfallebene. Dieses Problem wurde beim IBS Premium (**Abb. 4,** Ausführungsform B2) dadurch gelöst, dass speziell für den Pedalgefühlsimulator eine separate erste Kolben-Zylinder-Einheit (sog. Hilfskolben HK) vorgesehen ist. Bei Ausfall wirkt das Bremspedal direkt auf den Hauptbremszylinder durch einen mechanischen Durchgriff, somit geht kein Bremsflüssigkeitsvolumen in der Rückfallebene verloren. Alternativ oder ergänzend ist ein stromlos geschlossenes Absperrventil zum Wegsimulator vorgesehen (**Abb. 4,** Ausführungsform B1).

© IPGATE AG

3 Primärfunktionen

3.1 Bremskraftverstärkung

Beim Vakuumbremskraftverstärker (**Abb. 7**, oben) wird der Bremsdruck proportional zur Pedalkraft F_{Ped} durch eine Unterstützungskraft F_{boost} verstärkt. Das Verstärkungsverhältnis wird durch das Verhältnis der Verstärkerkörperfläche zur Pedalstößelfläche bestimmt. Dazu ist eine elastische Reaktionsscheibe zwischen Druckstangenkolben und Verstärkerkörper/Pedalstößel vorgesehen. Der Verstärkungsmechanismus funktioniert automatisch durch Differenzweg zwischen Pedalstößel und Verstärkerkörper.

Mit einem Bremssystem mit Pedalgefühlsimulator (**Abb. 1, Abb. 4, B2**) kann die Druckversorgungseinheit durch Entkopplung der Wirkungen unabhängig von der Pedalbetätigung operieren, so dass über Software eine beliebige Bremskraftverstärkungscharakteristik (Sport-Modus, Komfort-Modus) eingestellt werden kann. Als Druckversorgung wird eine elektromotorisch angetriebene Kolben-Zylinder-Einheit oder kurz „Plunger-Druckversorgungseinheit“ eingesetzt. Die Regelung basiert auf den Grundlagen des **PPC-Verfahrens** (Piston Pressure Control), die wichtigsten Merkmale für die Bremskraftverstärkung sind in **Abb. 7** der Übersicht halber nochmals dargestellt.

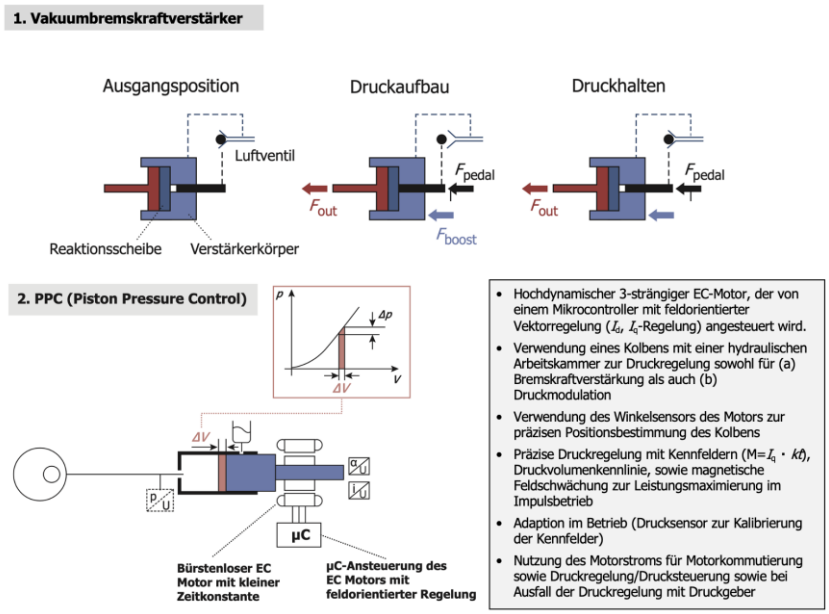


Abb. 7 Prinzipien der Bremskraftverstärkung

© IPGATE AG

3.2 Druckmodulation

Bei einem Standard ABS/ESP-System mit Vakuumbremskraftverstärker wird ein Vordruck durch den Hauptbremszylinder eingestellt und die Druckmodulation über Regelmagnetventile (Einlass- und Auslassventile) realisiert. Konventionell werden je Radbremse ein Einlassventil (EV, als lineares Magnetventil, LMV) und ein Auslassventil (AV, als schaltendes Magnetventil, MV) zur Druckmodulation verwendet. Das beim Druckabbau abgeführte Volumen wird von einer Speicherkammer aufgenommen und über eine Rückförderpumpe in den Hauptbremszylinder zurückgefördert, was zusammen mit dem stufenweisen Druckaufbau zum bekannten pulsierenden Bremspedal führt.

Bei einem Bremssystem mit Pedalgefühlsimulator und Plunger-Druckversorgungseinheit wird der Vordruck für die ABS-Regelung über die Plunger-Druckversorgungseinheit erzeugt. Dies ermöglicht einen weiteren Freiheitsgrad beim Druckaufbau über die Einlassventile, indem der Vordruck entsprechend des Reibbeiwertes der Fahrbahn angepasst werden kann. Sinnvollerweise wird ein Vordruck eingestellt, der ca. 20% höher ist als der höchste Radbremsdruck [20]. Das Druckaufbauverfahren mit variablem Vordruck wirkt sich positiv auf Druckschwingungen, NVH und die Genauigkeit der Druckeinstellung beim Druckaufbau aus (siehe **Abb. 8)**.

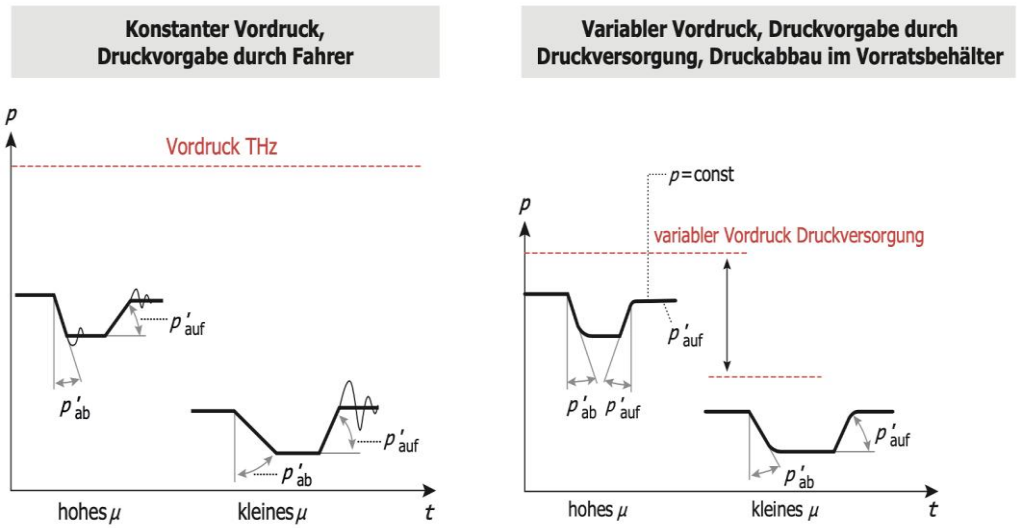


Abb. 8 Konventionelle Vordrucksteuerung vs. variable Vordrucksteuerung mittels PPC-Verfahren

© IPGATE AG

Der Druckabbau erfolgt entweder über Zeitsteuerung von Auslassventilen in die Speicherkammer einer ESP-Einheit (geschlossenes Bremssystem) oder wird wie von Bosch EHB und Toyota-Wirkprinzip eingeführt [16, 21] in den Vorratsbehälter (offene Bremssysteme) abgelassen. Beim Toyota-Wirkprinzip wird der Druck über zwei Pumpen aufgebaut, wobei die Pumpen bei unterschiedlichen Druckniveaus wirken.

In einer Weiterentwicklung des offenen Systems wurde die Plunger-Druckversorgungseinheit eingeführt [22]. Das verwendete Druckregelverfahren benutzt in einem Kaskadenregler neben der Regelgröße Druck p auch die Regelgrößen Aktuatorgeschwindigkeit ω_{Aktor} und Aktuatordrehmoment M_{Aktor} [23], zudem wird die Position des Kolbens der Druckversorgung bestimmt und ausgewertet oder zur Regelung verwendet. So wird der Kolben im Regelbetrieb zurückgefahren, wenn ein bestimmtes Hydraulikvolumen verbraucht ist, wobei beim Rückfahren Hydraulikfluid aus dem Vorratsbehälter in die Druckversorgung gesaugt wird. Der Kaskadenregler ermöglicht eine dynamische Druckregelung und ist deshalb vorteilhaft, da der Vordruck im Regelbetrieb trotz Volumenverlust bei Druckabbau über Auslassventile in den Vorratsbehälter konstant gehalten werden kann. Auch bei geschlossenen 2-Box Bremssystemen mit zwei Baueinheiten (elektromotorischer Bremskraftverstärker mit oder ohne Pedalgefühlsimulator [15,18], erster Box, in Kombination mit einer ABS/ESP-Einheit, zweiter Box)ist eine dynamische Regelkaskade mit Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsanteil im Rückförderbetrieb zum Bauteilschutz, in der VDA 360-Richtlinie als **PRL-Funktion** bezeichnet [24], von Bedeutung, da das geschlossene Bremssystem im Gegensatz zum Vakuumbremskraftverstärker sehr geringe hydraulische Elastizitäten hat. Die Elastizitäten nehmen im Vakuumbremskraftverstärker Druckschwingungen auf, wohingegen bei einem Bremssystem mit elektromotorischem Spindeltrieb die Druckschwingungen regelungstechnisch durch Verfahren des Kolbens reduziert werden müssen.

Beim IBS Premium wird das Druckregelverfahren mit Druckaufbau und Druckabbau über bidirektional wirksame Schaltventile (SV) eingeführt, wobei der Druckabbau in der einfachsten Form der Druckmodulation ohne Schalten der Magnetventile derart geregelt wird, dass der Kolben der Druckversorgung um einen bestimmten Weg Δs zurückgefahren wird, wobei der Motor mit einem reduzierten Strom betrieben wird. Durch aktive Rückbewegung des Kolbens oder alternativ Reduzierung des Motorstroms stellt sich eine aktive oder durch Rückstellfedern und Hydraulikdruck im Bremssystem verursachte passive Rückbewegung ein, wodurch der Bremsdruck und somit die Bremskraft reduziert wird. Die Wegänderung führt zu einer

© IPGATE AG

Volumenänderung ΔV und einer physikalisch bestimmten Zieldruckänderung. Wird die Druckvolumenkennlinie im Betrieb adaptiert, kann die Zieldruckeinstellung auch bei einer veränderten Druckvolumenkennlinie, z.B. infolge von Luftblasen in der Bremsflüssigkeit oder Veränderungen an der Radbremse zuverlässig eingesetzt werden.

Damit können verschiedene ABS-Druckregelverfahren umgesetzt werden. Die einfachste Form der ABS-Druckregelung ist die sog. „Stotterbremse“, bei der keine Raddrehzahlsensoren ausgewertet und keine Regelventile angesteuert werden und der Bremsdruck durch Hin- und Herfahren des Elektromotors oder alternativ durch Betrieb zwischen zwei unterschiedlichen Stromniveaus zwischen zwei Druckniveaus moduliert wird, um ein dauerhaftes Blockieren der Räder zu verhindern. Hier wird der proportionale Zusammenhang zwischen Phasenstrom und Drehmoment des Motors oder alternativ der Zusammenhang zwischen Position und Druck durch Auswertung der Druckvolumenkennlinie genutzt. Diese rudimentäre ABS-Regelung wird als Fahrstabilitätsfunktion bei elektrischen Folgebremskraftverstärkern [25] bei Ausfall der ESP-Einheit eingeführt, welche jedoch aufgrund der fehlenden EBV-Funktion auf eine Verzögerung von 5,8 m/s^2 begrenzt ist.

Für den Mehrkanal-ABS-Betrieb werden Raddrehzahlsensoren eingelesen und die Magnetventile aktiv geöffnet oder geschlossen. Beim IBS wurde dafür eine Prioritätensteuerung, das sog. Multiplex-Verfahren (kurz MUX-Verfahren) mit **PPC-Verfahren** und zusätzlich Magnetventilsteuerung eingeführt. Das MUX-Verfahren legt dabei fest, ob der Druckabbau sequenziell [26] oder (teil)simultan [27] in einer oder mehreren Radbremsen gleichzeitig erfolgt. In der ersten Generation der MUX-Regelung (MUX 1.0) wird der Druck ausschließlich über Schaltventile (SV), in der zweiten Generation sowohl über Schaltventile SV als auch in Grenzfällen über Auslassventile mit Öffnen des Bremskreises in den Vorratsbehälter abgebaut. Das Mischkonzept mit Druckabbau über Kolben und Auslassventile wurde als MUX 2.0-Verfahren bezeichnet [28].

Abb. 9 zeigt im Vergleich einen Überblick der verschiedenen Druckmodulationsprinzipien mit Pumpen/Fluidspeicherkammer und Plunger-Druckversorgungseinheit.

© IPGATE AG

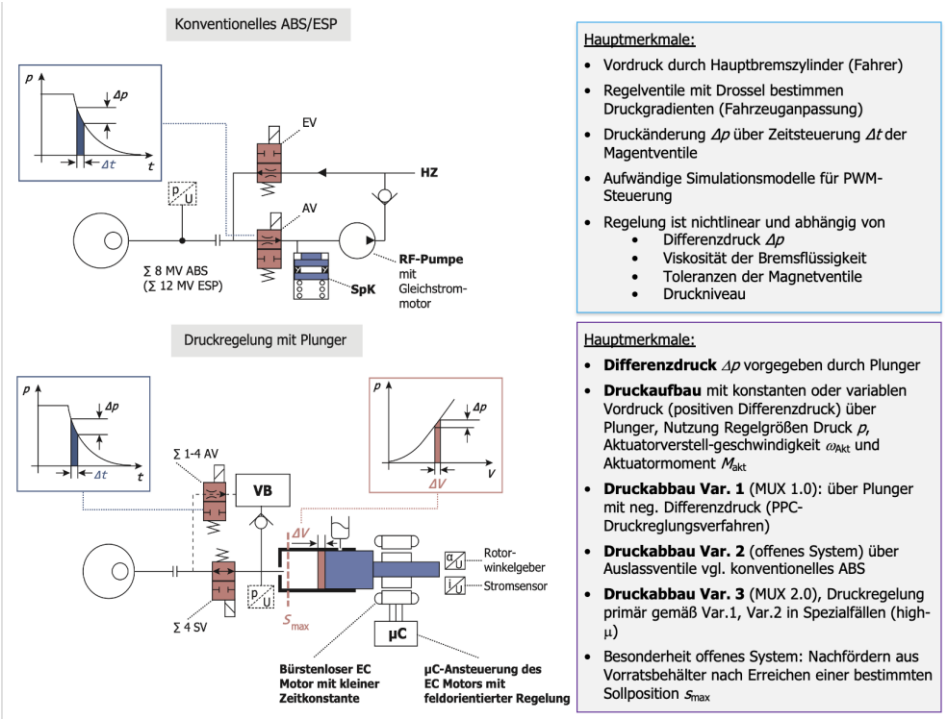


Abb. 9 Prinzipien der Druckmodulation

Vor/Nachteile ABS/ESP-System + Vakuumbremskraftverstärker:

Die Kombination von ABS/ESP-Systemen mit Fluidspeicherkammer und Vakuumbremskraftverstärker hat den großen Vorteil, dass ein geschlossenes Hydrauliksystem vorliegt, welches sich seit mehr als 40 Jahren als zuverlässiges System bewährt hat. Daher wurde in einer Weiterentwicklung das Prinzip in 2-Box-Lösungen mit elektrischem Folgebremskraftverstärker + ESP-Einheit beibehalten.

Hauptnachteil ist eine aufwändige Applikation, weil ein Druckmodulationsbetrieb die Druckermittlung in den Radbremsen de facto nur mit Volumenstromschätzungsmodellen erfolgt. Zudem kann der Druckabbau durch Zeitsteuerung nicht so genau eingestellt werden wie bei Druckabbau mit PPC-Verfahren. Damit ist die Druckeinstellung, vor allem bei Aktiveingriffen, nämlich ASR und ESP, ungenau, wenn es keine Rückführung gemessener Radzylinderdrücke gibt.

© IPGATE AG

Vor/Nachteile Modulation mit PPC/MUX

Druckmodulation mit dem **PPC-Verfahren** hat den Vorteil, dass ein Vordruck im Druckaufbau sehr genau eingestellt und je nach Reibbeiwert der Fahrbahnoberfläche auch variiert werden kann. Wird der Druck über Auslassventile in den Vorratsbehälter abgebaut, können im Vergleich zu konventionellen ESP-Systemen vor allem bei niedrigen Drücken höhere Druckabbaugradienten erzielt werden. Nachteilig ist, dass das Hydrauliksystem geöffnet wird durch Volumenverlust beim Druckabbau und Nachsaugen und im Regelbetrieb über die Druckversorgung Schmutzpartikel in die Ventile gelangen können [29]. Die Wahrscheinlichkeit eines Bremskreisausfalles ist daher tendenziell höher als bei geschlossenen Systemen. Da durch die Einführung der neuen Gattung der Plunger-Druckversorgungseinheit neue Möglichkeiten in der Diagnose auch im Fahrbetrieb möglich sind, ohne dass der Fahrer es merkt, konnte auch ein offenes System eine akzeptable Ausfallsicherheit erreichen, weil Leckagen frühzeitig vor einer Bremsung erkannt werden können.

Wird der Druck entsprechend einer sog. MUX-Prioritätensteuerung über Schaltventile und Druckversorgungseinrichtung abgebaut, erfolgt der Druckabbau bei sequenziellem Druckabbau sehr genau, bei simultanem Druckabbau gibt es hingegen Ungenauigkeiten. Es wurde gezeigt, dass auch mit einem 4-Kanal-Multiplexbetrieb eine vergleichbar gute Druck-Regelperformance erzielt werden kann. Probleme waren jedoch unter anderem Geräusch im hochdynamischen Betrieb (z.B. ABS-Bremsung auf Asphalt) und hohe Anforderungen an die Ventilauslegung, um zu verhindern, dass ein Ventil durch dynamische Strömungseffekte weder beim Druckaufbau noch beim Druckabbau zuzieht. Ferner mussten zur Geräuschoptimierung große Druckdifferenzen bei dynamischem Druckabbau durch geeignete Kolbenpositionsregelung vermieden werden. Sowohl ungelöste Geräuschprobleme bei ABS-Regelung auf Asphalt, eine komplexe Softwareprioritätensteuerung, extrem hohe Druckmodulationsdynamikanforderungen an den EC-Motor als auch kostenintensive Magnetventile waren in der frühen Entwicklung die größten Hindernisse bei einer Serieneinführung. Ein Ansatz zur Verbesserung wurde durch das MUX 2.0-Verfahren gefunden, womit zum einen die Druckmodulationsdynamikanforderungen an den EC-Motor signifikant reduziert werden konnten und der Bremskreis nur in Spezialfällen kurzzeitig geöffnet wurde. Damit hatte das MUX 2.0-Verfahren de facto die Sicherheitsvorteile eines geschlossen Bremssystems, da in einem Regelvorgang nicht nachgefördert werden muss. Mit dem MUX 2.0-Verfahren wurde eine erste Basis für die Weiterentwicklung geschaffen, eine robuste und einfach

© IPGATE AG

applizierbare Regelung mit einem kostengünstigen und zugleich zuziehfesten Magnetventil würde dem MUX-Verfahren eine neue Bedeutung geben.

3.3 ABS-Regelungsergebnisse mit MUX 1.0-Verfahren

Die geringe Drosselwirkung der Schaltventile bei IBS erlaubt einen großen Druckabbaugradient bei low-μ- und bei Tieftemperaturbremsungen. Ein Vergleich zeigt den Druckabbau der repräsentativ für eine Geradeausbremsung auf Eis ist (**Abb. 10a**). Dabei ist die Druckabbauzeit bei IBS von 10 bar auf 5 bar bei 20°C von heute 60 ms mit einem Rückfördersystem um den Faktor 4 verkürzt. Zudem war das IBS im Regelbetrieb deutlich leiser als Standard-ESP-Systeme.

Abb. 10b zeigt exemplarisch eine IBS-Regelung an einem Vorderrad mit rein sequenzieller Ansteuerung des Multiplex-Verfahrens beim schnellen Anbremsen geradeaus auf Eis mit einem mittleren Blockierdruck von ca. 6 bar. Bei IBS Premium entsteht durch die höheren Druckabbaugradienten anfänglich eine Differenzgeschwindigkeit zwischen Rad und Fahrzeug Δv von nur 3 km/h. Der nachfolgende Ablauf zeigt noch kleinere Regelabweichungen Δv von nur 1,3 km/h, was mit kleinen Druckänderungen von 3 bar korrespondiert. Gestrichelt ist der typische Ablauf beim konventionellen ABS qualitativ eingezeichnet. Verglichen mit dem konventionellen ABS wurden auf Schnee- Eis- und μ-Split-Fahrbahnen Bremswegverkürzungen von bis zu 20 % mit zusätzlich verbesserter Fahrstabilität gemessen. Dabei sind Geräusch und Pedalrückwirkung kaum wahrnehmbar. Die hochdynamische Druckregelung ist sehr schnell und genau, was sich auch in den kleinen Radbeschleunigungen ausdrückt. Von der EMB oder der Keilbremse (voll elektrische Bremse), die ohne Bremsflüssigkeit und deshalb ohne die Viskositätsprobleme bei Tieftemperaturen auskommen, sind keine besseren Ergebnisse bekannt.

© IPGATE AG

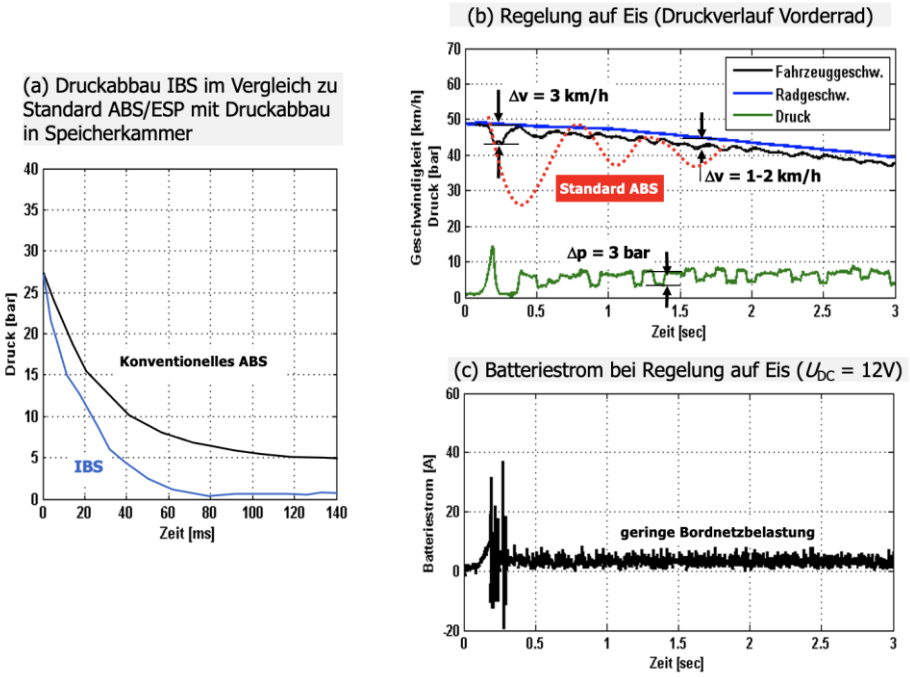


Abb. 10 Messschrieb ABS-Regelbetrieb IBS Premium auf Eis (Mittelklassefahrzeug)

Abb. 10c zeigt die Bordnetzbelastung die unabhängig von der Pedalkraft ist. Im Vergleich dazu zieht das konventionelle ABS mit steigenden Pedalkräften immer höhere Ströme bis auf mehr als das 5-Fache.

4 Weitere Hauptfunktionen

4.1 Blending-Verfahren für regeneratives Bremsen

Vakuumbremskraftverstärker sind aufgrund der fehlenden Variabilität der Bremskraftunterstützung für regeneratives Bremsen nur sehr begrenzt geeignet und benötigen zusätzliche Bauteile (Trennzylinder) zur Abbildung der Gegenkraftsimulation [30].

Beim regenerativen Bremsen wird das sog. Blending-Verfahren durchgeführt, d.h. das hydraulische Bremsmoment wird um das Generatorbremsmoment reduziert, so dass die Verzögerung durch das hydraulische Bremssystem sowie die Verzögerung durch Generator oder generatorisch betriebenen elektrischen Antriebsmotor eines Hybrid- oder Elektrofahrzeuges in Summe der Fahrerwunschverzögerung entspricht.

© IPGATE AG

Für das regenerative Bremsen wurden in der IBS-Technologie zwei unterschiedliche Verfahren verwendet. Beim Folgebremskraftverstärkerprinzip mit Differenzwegregelung (IBS Basic) wurde eine über ein Schaltventil zuschaltbare multifunktionale Fluidkolbenspeicherkammer mit Rückstellfeder in der Verbindungsleitung BL zwischen Hauptbremszylinder und Radzylinder Rz oder an den Radbremsen eingeführt. Die Befüllung der Fluidkolbenspeicherkammer erfolgt über ein Magnetventil, die Entleerung der Speicherkammer über ein Magnetventil oder passives Element (Drossel + Rückschlagventil) und kann auch zur Lüftspielregelung der Bremsbeläge genutzt werden. Bei ausschließlichem Wirken eine Generatorbremsmoments wird bei Pedalbetätigung die Speicherkammer befüllt und beim Pedallösen wieder entleert (**Abb. 11**) [32]. Der hydraulische Volumenfluss ist beispielhaft für den Druckaufbau in der Abbildung 11 farblich gekennzeichnet.

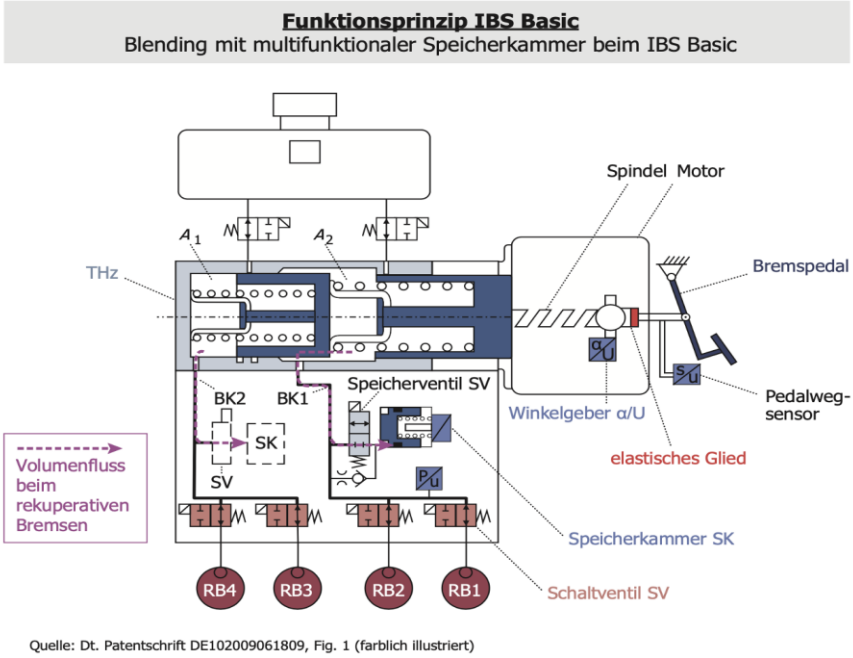


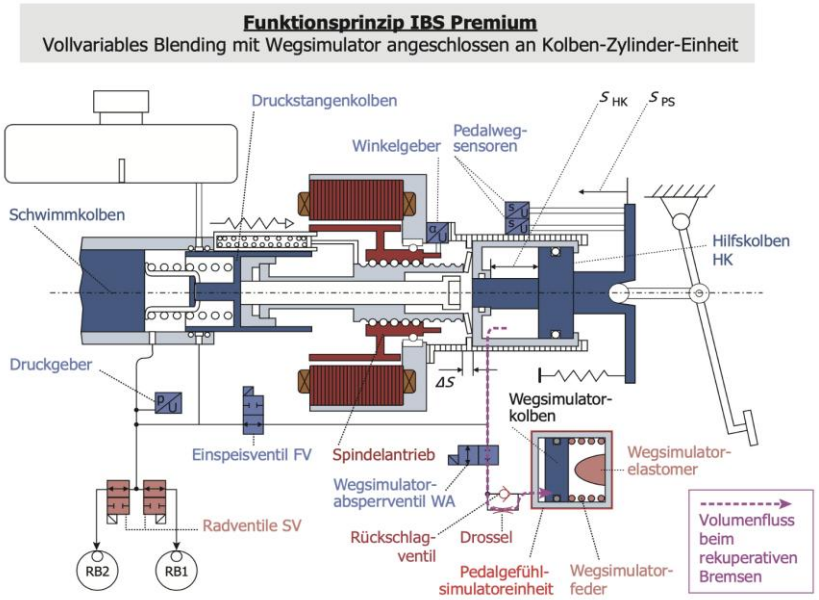
Abb. 11 Volumenfluss beim regenerativen Bremsen bei IBS Basic

Ähnliche Blending-Lösungen sind in heutigen 2-Box-Bremssystemen, bestehend aus einem elektrischen Folgebremskraftverstärker und einer ESP-Einheit, zu finden, wobei für die 2-Box-Lösung eine Kommunikationsschnittstelle zwischen den beiden physisch getrennten Einheiten eingeführt werden musste [33]. Die Speicherkammer der ESP-Einheit hat erstmalig eine Multifunktion und wird sowohl für ABS-Druckmodulation als auch regeneratives Bremsen eingesetzt.

© IPGATE AG

Die Applikation ist jedoch komplex, da beim Blending gleichzeitig Magnetventile in Verbindung zur Speicherkammer und der elektrische Bremskraftverstärker in zwei separaten Einheiten geregelt werden müssen, um zu vermeiden, dass der Fahrer den regenerativen Bremseingriff in Form eines veränderten Pedalgefühls wahrnimmt. Um auch bei schneller Fahrerbetätigung oder dynamischer zeitlicher Veränderung des Generatorbremsmomentes starker Antriebsmotoren von E-Fahrzeugen ein akzeptables Pedalgefühl zu gewährleisten, ist ein hochdynamischer EC-Motor sowie ein hochpräzise Druckregelung nach dem PPC-Verfahren erforderlich.

Beim IBS Premium, dessen hydraulischer Schaltplan in **Abb. 12** dargestellt ist, wirkt das Bremspedal auf einen Hilfskolben HK, welcher wiederum über ein Schaltventil WA mit einem mechanisch hydraulischen Pedalgefühlsimulator (PGS) mit Kolben, Feder (8b) und Gummielement (8) wirkverbunden ist. Der hydraulische Volumenfluss ist beispielhaft für den Druckaufbau in der Abbildung 12 farblich gekennzeichnet. Im Normalbetrieb sind Druckversorgung und Betätigungseinheit entkoppelt und entsprechend des Fahrerwunsches wird das hydraulische Bremsmoment um das wirksame Generatorbremsmoment reduziert. Blending ist daher sehr einfach mit dem **PPC-Verfahren** applizierbar.



Quelle: Dt. Patentschrift DE112011102270, Fig. 1 (vereinfachte Darstellung mit wesentlichen Elementen, farblich illustriert)

Abb. 12: Volumenfluss beim regenerativen Bremsen beim IBS-Premium

© IPGATE AG

4.2 Automatische Notbremse (Automatic Emergency Brake AEB)

Die IBS-Technologie ermöglichte mit der Einführung eines hochdynamischen EC-Motors mit Erstvorstellung im Juni 2006 an die Firma Continental ebenfalls Pionierarbeit bei der Entwicklung der automatisierten Notbremse mit sehr schnellem Bremsdruckaufbau. Wie **Abb. 12** zeigt, konnte mit der IBS-Technologie und dem PPC-Verfahren mit dem Motor innerhalb von 30 ms eine Drehzahl von über 5000 U/min erreicht werden und der Druckaufbau begann aufgrund der geringen Drosselverluste der Ventile bereits nach 10 ms und erreichte 100 bar in **134 ms** (TTL=134 ms).

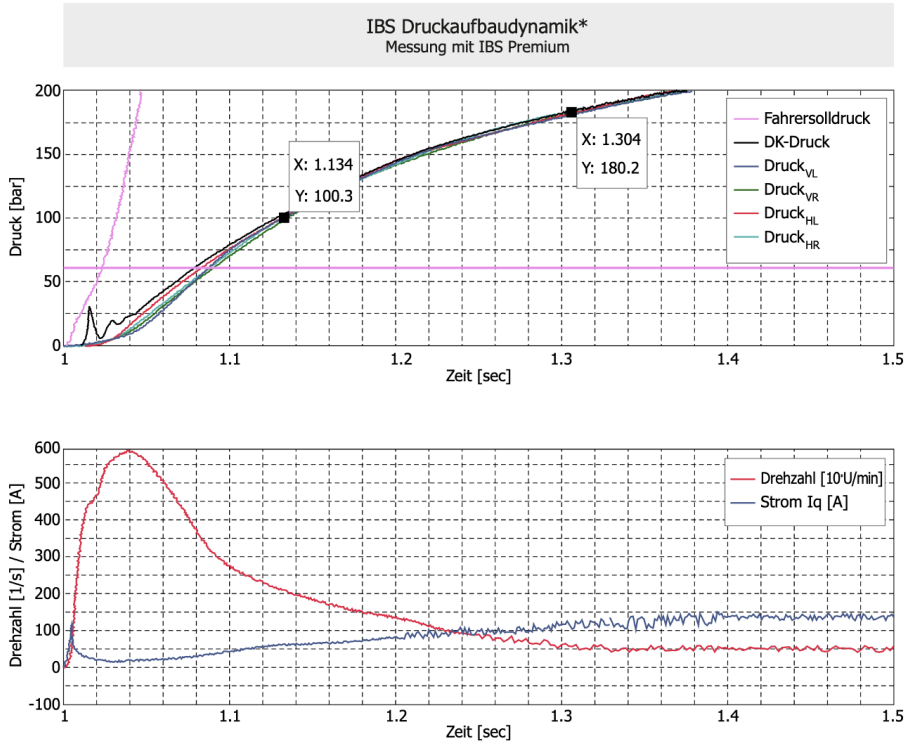


Abb. 13 Druckaufbaudynamik IBS bis 200 bar

Dies war ein Quantensprung in der Dynamik im Vergleich zu konventionellen ESP-Systemen, bei welchen der Druckaufbau von 1 bar auf 100 bar erst in ca. 300 ms (ESP Premium) bis ca. 500 ms (ESP Standard) laut eigenen Messungen erreicht werden konnte. Auf einer Tagung Intelligent Brake 2011 präsentierte Continental Simulationsergebnisse des ersten integrierten 1-Box-Bremssystems MK C1 [34], bei denen die enorme Tragweite der Auswirkung des schnellen

© IPGATE AG

Druckaufbaus mit einem hochdynamischen EC-Motor auf den Bremsweg dargestellt wurde. Bereits bei einer geringen Geschwindigkeit von nur 65 km/h zu Beginn der Notbremsung konnte eine Bremswegverkürzung von 5 Metern erzielt werden.

4.3 Verfahren zur Reduzierung der Reibverlustleistung der Bremse

Bekanntlich lösen sich die Bremsbeläge im Normalfall, z. B. ohne forcierte Kurvenfahrt, nicht voll von der Bremsscheibe und erzeugen ein nicht vernachlässigbares Restreibmoment, was einen höheren CO2-Wert zur Folge hat. Beim IBS kann durch entsprechende Kolben- und Ventilsteuerung ein kleines Lüftspiel (BLS: **B**remsbelag**l**üft**s**piel) erzeugt werden, was das Restmoment nennenswert reduziert. Ein vergrößertes Lüftspiel kann auch durch Ausführung der Bremsbacken mit verstärktem Rollback im Radzylinder erzeugt werden. Nachteilig sind die vergrößerten Pedalwege in der Rückfallebene, welche bei IBS Premium nicht auftreten.

Als zweite wesentliche Funktion wurden in der IBS-Technologie Anstrengungen unternommen, die Verlustleistung der Reibbremse, die in Messungen im Jahr 2007 noch ca. 300 Watt betrug, signifikant zu reduzieren. Dabei wurden als BLS-Verfahren zwei Varianten [29,35] definiert und in Abb 14 illustrativ dargestellt:

a) Aktives Zurückziehen der Bremsbeläge durch Unterdruck mit PPC-Verfahren

b) Aktive Belaglüftspieleinstellung mit PPC-Verfahren und Einsatz von Bremssatteln mit starken Rollback-Dichtungen

Die Unterdrucksteuerung (a) erwies sich als sehr wirkungsvoll, war jedoch mit ca. 0,5 bar in der Höhe des Unterdrucks sowie in der Zeitdauer des Betriebs mit Unterdruck begrenzt, weil Kavitationseffekte eintreten konnten. Da bei einem elektrischen Folgebremskraftverstärker der Fahrer das Lüftspiel bei der Pedalbetätigung spürt, bietet ein Bremssystem mit Pedalgefühlsimulator die Möglichkeit, die Restreibung der Bremse effektiv und einfach zu reduzieren. So wird bei einem Bremssystem mit Pedalgefühlsimulator das Verfahren (b) favorisiert, wobei die Bremsbeläge rechtzeitig vor Beginn einer Bremsung angelegt werden, so dass keine Verzögerung der Bremswirkung festzustellen ist.

© IPGATE AG

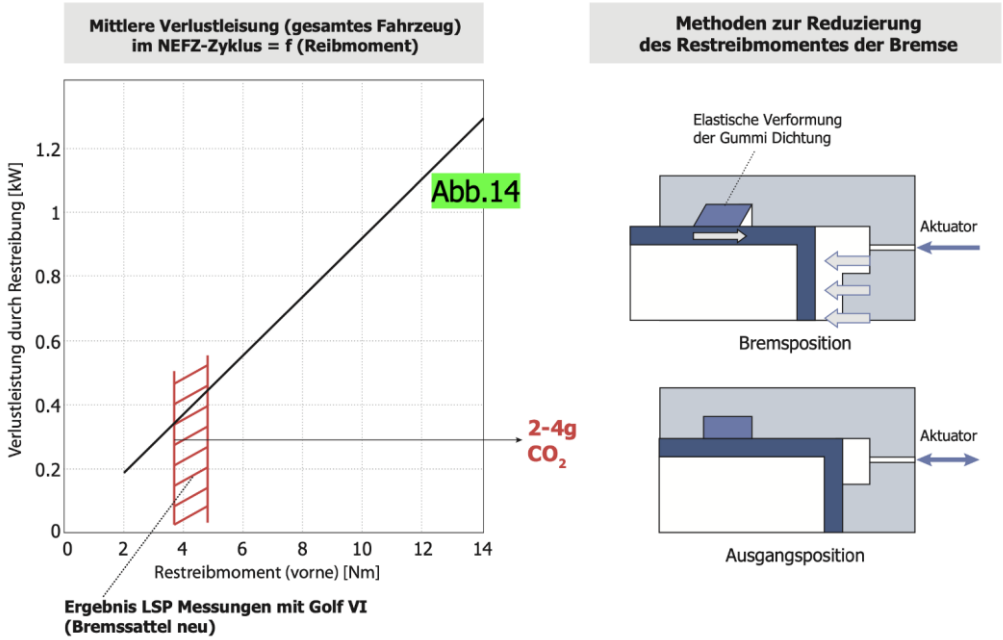


Abb. 14 Verfahren zur Reduzierung der Verlustleistung in der Reibbremse

5 Fehlersicherheit

Bei der Konzeption von IBS stand eine fehlersichere Auslegung im Vordergrund. Bei allen bisher bekannten Bremssystemen erfolgt bei der Druckmodulation zum Druckabbau eine Öffnung des Bremskreises mit Verbindung zur Speicherkammer (bei dem bereits erwähnten Rückförderprinzip von ABS und ESP) oder fehlerkritisch in den Vorratsbehälter (offenes Bremssystem). Bei IBS erfolgt die Druckmodulation über die HZ-Kolben in einem geschlossenen Bremssystem. Dadurch ist auch die Bremskreisausfallerkennung unmittelbar auswertbar. Hierzu wird der Kolbenweg mit der Druck-Volumen-Kennlinie des Bremssystems unter Verwendung des Druckgebersignals korreliert. Ähnliches gilt für die Erkennung des Ausfalls einer Radbremse: da der Radbremsdruck gemessen wird (auch bei ABS, wie oben erklärt), kann auch hier der Kolbenweg mit der Druck-Volumen-Kennlinie jeder einzelnen Radbremse korreliert werden. Bei einem Ausfall durch Undichtigkeit außerhalb der HCU kann bei der IBS-Technologie das Schaltventil zum ausgefallenen Radzylinder geschlossen werden und mit drei Radzylindern statt mit vier Radzylindern weiter gebremst werden. Dies ist ein deutlicher Sicherheitsgewinn, weil mit drei verbleibenden Radbremsen im Vergleich zu zwei Radbremsen ein kürzerer Bremsweg erzielt

© IPGATE AG

werden und zudem noch, wenn auch eingeschränkt, eine Regelung der Giergeschwindigkeit erfolgen kann.

Unter Verwendung der vorhandenen Sensorik (Druckgeber, Motorstrom, Kolbenposition) sowie dem Strom-Druck-Zusammenhang ist auch bei Ausfall einzelner Sensoren eine lückenlose Überwachung aller Komponenten möglich. Bei Ausfall des Wegsimulators wird auf einen elektrischen Folgebremskraftverstärker umgeschaltet, auch bei Ausfall des Motors ist in der Rückfallebene bei einer Auslegung mit einem Hauptbremszylinderdurchmesser von 19,05 mm noch eine hohe Fahrzeugverzögerung möglich.

Ein offenes Bremssystem hat viele kritische Fehlerquellen und muss in vielen Fällen auf die Rückfallebene angewiesen sein. 1-Box-Bremssysteme im Markt profitieren davon, dass mit dem THz mit kleinem Durchmesser (19,05 mm^2) eine sehr gute Rückfallebene geschaffen wurde, sie sind jedoch aufgrund der Fehlerproblematik auf kontinuierliche Fehlerdiagnosen angewiesen und folglich noch auf automatisiertes Fahren der SAE Stufe 2 beschränkt. Die Fehlerquellen wurden 2017 auf einer VDI-Veranstaltung adressiert und es wurden neue smarte Diagnoseansätze vorgeschlagen, z.B. unterschiedliche Tests im Fahrbetrieb: Park Stop Tests (PST) Bremsende Diagnose (BED), Park Stop Diagnose (PSD), Car Stop Diagnose (CSD) [29,30].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Jahr 2010 wurde die IBS-Technologie sowie deren Bremsenmanagement nach ca. 5 Jahren Entwicklung auf einer Tagung (**Abb. 14**) erstmalig der Öffentlichkeit vorgestellt [3,36]. Neben dem Standardfunktionsumfang der ESP-Systeme wurden drei neue Hauptfunktionalitäten aufgenommen:

(1) Pre-Crash: hochdynamische automatische Notbremse AEB,

(2) Brake Blending mit leistungsstarken Generatoren oder E-Antrieben eines Fahrzeuges

(3) Verfahren zur Realisierung einer reibungsarmen oder reibungsfreien Bremse

© IPGATE AG

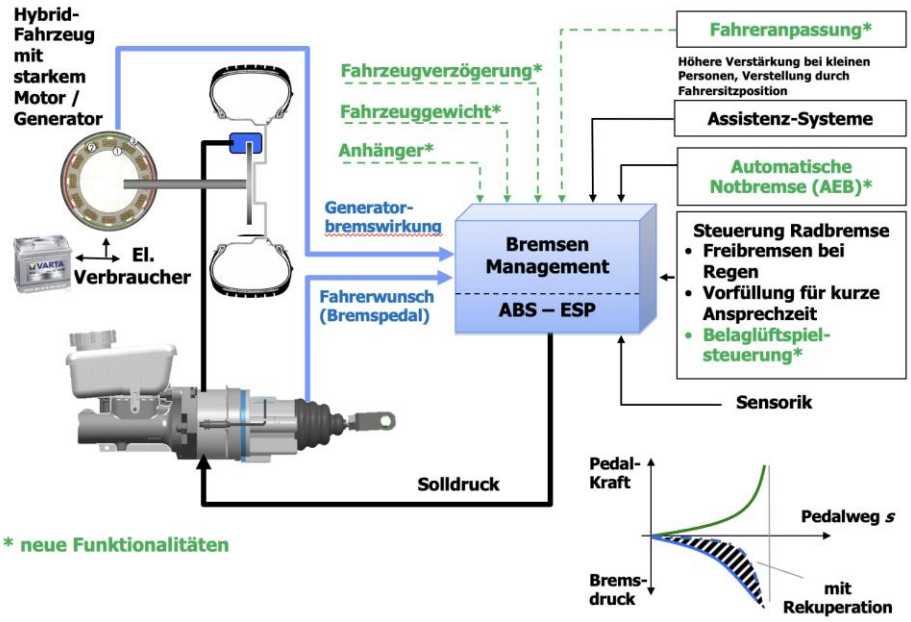


Abb. 15 Bremsenmanagement mit IBS

Die 2010 definierten neuen Funktionalitäten werden heute als Standard angesehen, da die Marktdurchdringung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen sowie das teilautomatisierte Fahren nach SAE Stufe 2 alle Kernfunktionen sowie neue Hauptfunktionen fordert.

Die folgende Gegenüberstellung zeigt zusammengefasst die Haupteigenschaften beider Varianter der IBS-Technologie im Vergleich zu Vakuumbremskraftverstärkern:

<u>Haupteigenschaften IBS Basic</u> (elektromotorischer Folgebremskraftverstärker mit Differenzwegregelung):

- gewohnt gutes Pedalgefühl in Bremskraftverstärkungsfunktion
- Regeneratives Bremsen möglich ohne Auswirkung auf das Pedalgefühl bis zu einer bestimmten Verzögerung (abhängig von der Dimensionierung der Speicherkammer)
- Fahrer erkennt den Zustand der Bremse (z.B. Fading) am Verhältnis Pedalweg/Pedalkraft zur Fahrzeugverzögerung
- sehr schneller Bremsdruckaufbau für ADAS-Funktionen, insbesondere sehr performante automatische Notbremse

© IPGATE AG

<u>Haupteigenschaften IBS Premium</u> (elektromotorischer Bremskraftverstärker mit Pedalgefühlsimulator):

- kürzere Pedalwege, deutlich schnellerer Bremsdruckaufbau für ADAS-Funktionen, insbesondere sehr performante automatische Notbremse
- variabler, adaptiver Drucksprung bei Bremsbeginn (Optimierung für die einzelnen Baureihen)
- bessere Rückfallebene bei Ausfall BKV (annähernd gewohnte Pedalcharakteristik und höhere Drücke bei gleichen Pedalkräften)
- unveränderte Pedalcharakteristik bei <u>Fading-Kompensation durch Druckerhöhung</u>
- Regeneratives Bremsen bei <u>Hybrid-</u> und Elektrofahrzeugen theoretisch nicht begrenzt durch Bremssystem
- kein Pedaldurchfall bei Bremskreisausfall
- automatische Diagnose des Entlüftungszustandes
- keine Irritation des Fahrers durch Pedalpulsationen bei Druckmodulation (ABS, ADAS)
- geringeres Geräusch im Druckmodulationsbetrieb, insbesondere bei geringen Außengeräuschen (ABS-Bremsung auf Schnee und Eis)

In den Jahren 2017 und 2019 wurden die Herausforderungen für zukünftige Bremssysteme, die in Zusammenhang mit den Fail-Operational Anforderungen des automatisierten Fahrens entstehen, erstmalig in der Fachwelt in der technischen Tiefe thematisiert [29,37]. Als erstes Familienmitglied eines zukünftigen 2-Box-Bremssystembaukastens für SAE Stufe 3-5 wird die X-Boost Technologie© (www.x-boost-technology.com) entwickelt, welche im Februar 2022 als Pilotanwendung in einem technisch hochanspruchsvollen Hyper-Car mit ca. 2000 PS elektrischer Antriebsleistung, dem RIMAC Nevera, homologiert wurde.

In Zusammenhang mit weiteren Veränderungen in der Automobilindustrie (Elektrofahrzeuge, automatisiertes Fahren der SAE Stufen 3-5, Vehicle Motion Control) wird sich die Systemarchitektur von Fahrzeugen und Anforderung an Bremssysteme weiterhin dynamisch verändern. Aufgrund des nach wie vor großen zum Teil ungenutzten Innovationspotentials und der signifikanten Kostenvorteile der elektrohydraulischen Bremssysteme im Vergleich zur EMB wird die Bremse noch lange Zeit überwiegend hydraulisch oder teilhydraulisch bleiben. Dennoch besteht bei der Verbesserung der Ausfallsicherheit noch Handlungsbedarf, damit elektromotorische Bremssysteme die sehr hohe Zuverlässigkeit von konventionellen in großer Stückzahl gefertigten Vakuumbremskraftverstärkern und ESP-Einheiten erreichen.

© IPGATE AG

Literatur

[1] *Leiber, H.*: ABS - Vergleich separate und integrierte Systeme. VDI-ATG-Tagung, Wolfsburg, Dez. 1984

[2] *van Zanten, A., Erhardt, R., Pfaff, G.*: FDR – Die Fahrdynamikregelung von Bosch. In: ATZ (1994) 11, S. 674 – 689

[3] *Leiber, T., Köglsperger, C., Unterfrauner, V.*: Modulares Bremssystem mit integrierten Funktionen. In: ATZ 2011-06, S. 466 – 472

[4] Leiber, H., Leiber, T.: "Permanenterregte Drehfeldmaschine", Patentanmeldung E81 der Firma IPGATE AG, DE102004030063A1, Anmeldetag: 23.06.2004

[5] *Leiber, H., Leiber, T.*: " Bremsssystem mit elektromotorisch angetriebenem Kolben-Zylinder-System", erteiltes Patent E87DE-SA der Firma IPGATE AG: DE102005018649B4, Anmeldetag: 21.04.2005

[6] *Leiber, H., Leiber, T.:* " Bremsssystem mit elektromotorisch angetriebenem Kolben-Zylinder-System", erteiltes Patent E87DE-TA1 der Firma IPGATE AG: DE102005063659B3, Anmeldetag: 21.04.2005

[7] *Leiber, H., Leiber, T.:* "Bremsssystem mit elektromotorisch angetriebenem Kolben-Zylinder-System", erteiltes Patent E87DE-TA4 der Firma IPGATE AG: DE102006063691B3, Anmeldetag: 21.04.2005

[8] *Leiber, H., Leiber, T.:* "Bremsssystem mit elektromotorisch angetriebenem Kolben-Zylinder-System", erteiltes Patent E87DE-TA5 der Firma IPGATE AG: DE102005063697B4, Anmeldetag: 21.04.2005

[9] *Leiber, H., Leiber, T.:* "Bremsssystem mit elektromotorisch angetriebenem Kolben-Zylinder-System", erteiltes Patent E87DE-TA6 der Firma IPGATE AG: DE102005063699B4, Anmeldetag: 21.04.2005

[10] Wikipedia Beitragende. (n.d.). Bremskraftverstärker. Wikipedia. Abgerufen am 21.03.2025: https://de.wikipedia.org/wiki/Bremskraftverstärker

[11] *Kobayashi, K., Inoue, H.:* „Electrically driven Brake Booster". Amerikanische Patentschrift der Firma Robert Bosch GmbH: US6634724B2, Anmeldetag der japanischen Prioritätsanmeldung 26.04.2001

[12] *Witte, B., Barthenheimer, T. et al.*: Deutsche Patentanmeldung der Firma Volkswagen AG: DE102005025577A1, Anmeldetag: 25.05.2005

[13] *Yamaguchi, T., Obata, T., Oikawa, H.*: „Brake apparatus", Europäische Patentanmeldung EP1964739A2 der Firma Hitachi Automotive Systems, Anmeldetag der japanischen Prioritätsanmeldung: 27.02.2008

© IPGATE AG

[14] *Leiber, H., Leiber, T., Unterfrauner, V.*: "Bremssystem ohne Wegsimulator" erteilte Patente der Patentfamilie E112 der Firma IPGATE AG: DE102009004636B4, DE112009005536B3, DE112009005541B3, Anmeldetag. 03.02.2009

[15] *Weiberle, R., Jahnz, T., Meyer,J.*: „Bremskraftverstärker und Verfahren und Vorrichtung zu dessen Betrieb“, Patentschrift der Firma Robert Bosch GmbH: DE102010001939B4, Anmeldetag 15.02.2010

[16] *Toyota, J., Toyota, A.*: „Bremsanlage zum Minimieren des Hochlastbetriebs einer Pumpenvorrichtung zum Betätigen von Bremszylindern“, Deutsche Patentanmeldung der Firma Toyota AG: DE10015810A1, Anmeldetag der japanischen Prioritätsanmeldung 01.04.1999

[17] *Leiber, H., Unterfrauner, V.*: "Betätigungseinrichtung für eine Kraftfahrzeugbremsanlage", erteilte Patente der Patentfamilie E122 der Firma IPGATE AG: DE112011102270B4, US9878697B2, CN103108785B, DE112011106127B3, US10493967B2, Anmeldetag: 17.09.2010

[18] *Leiber, T., Leiber, H., van Zanten, A.*: „Elektromechanischer Bremskraftverstärker für das automatisierte Fahren“. ATZ 03/2019, S. 50-54, Bild 1

[19] *Leiber, H.*: "Betätigungsvorrichtung, insbesondere für eine Fahrzeug-Bremsanlage" erteilte Patente der Patentfamilie E123 der Firma IPGATE AG: US9541102B2, CN103282251B, KR101804337B1, Anmeldetag der deutschen Prioritätsanmeldung: 03.11.2010

[20] *Leiber, H., Leiber, T. et al.*: "Druckmodulatorsteuerung ", erteiltes Patent E90DE-TA1 der Firma IPGATE AG: DE102005063658B3, Anmeldetag: 21.11.2005

[21] *Schmidt, G., Binder, J., Winner, H., Gottwick, U.*: „Verfahren und Vorrichtung zur Überprüfung einer Bremsanlage“, Patentschrift der Firma Robert Bosch GmbH: DE198073678., Anmeldetag: 21.02.1998

[22] *Roll, G., Böhm, J., Jäger, J.*: „Verfahren zur Regelung eines elektrohydraulischen Bremssystems sowie elektrohydraulisches Bremssystem “, Patentschrift der Firma Continental AG: EP2595847B1, Anmeldetag: 13.07.2011

[23] *Roll, G., Böhm, J.*: „Verfahren und Vorrichtung zur Regelung eines elektrohydraulischen Bremssystems für Kraftfahrzeuge “, Patentschrift der Firma Continental AG: EP 25800951, Anmeldetag: 30.06.2010

[24] *Stringer, S., Spöri, T., Lu, W., Schwab, M., Hägerle, N.*: „New brake system products – with VDA interface ready for the future“ S. 803, Funktion PRL (Pressure Reduction Logic)

[25] *Bosch Mobility Solutions.* (n.d.). iBooster: Elektromechanische Bremssysteme für Fahrzeuge. Bosch Mobility Solutions: https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/fahrsicherheit/ibooster/

[26] *Leiber, H., Leiber, T.*: "Druckmodulatorsteuerung" erteilte Patente der Firma IPGATE AG: E87WOEP - EP1907253B1 and E87WOUS - US8,371,661B2; E90WOEP - EP

© IPGATE AG

1874602 and E90WOUS - US8,540,324B2, Anmeldetag der Prioritätsanmeldung: 21.04.2005

[27] *Leiber, H., Leiber, T.:* "Bremssystem mit simultanem bzw. teilsimultanen Druckaufbau und Druckabbau in den Radbremsen aus unterschiedlichen Radzylinderdruckniveaus", erteilte Patente der Patentfamilie E102 der Firma IPGATE AG: DE102009008944B4, EP2396202B1, US9211874B2, CN102325676B, IN340432B; Anmeldetag: 13.02.2009

[28] *Knechtges, C., Knechtges, J., Passmann, A.*: „Elektrohydraulische Fahrzeug-Bremsanlage mit elektromechanischem Aktuator und Verfahren zum Betreiben der Bremsanlage“, Deutsche Patentanmeldung der Firma ZF Active Safety GmbH: DE102013014188A1, Anmeldetag: 28.08.2013

[29] *Leiber, T., Köglsperger, C., Hecker, C.*: “Herausforderungen und Lösungsansätze für zukünftige Bremssysteme“, Vortrag VDI Wissensforum, Manuskript zum Vortrag am 25.10.2017

[30] *Leiber, H., van Zanten, A.:* "Diagnostic method for a braking system", erteilte Patente der Patentfamilie E142 der Firma IPGATE AG: US10059321B2, CN107472232B, Anmeldetag: 21.04.2015

[31] *Plewnia, H.:* „Bremsaggregat für ein Landfahrzeug“, Patentschrift Lucas Automotive GmbH: DE102006033890B4, Anmeldetag: 21.07.2006

[32] *Leiber, H., Leiber, T., Köglsperger, C., Unterfrauner, V.*: "Bremssystem mit Speichereinrichtung und Mehrfachfunktion", erteiltes Patent E117DE-TA1 der Firma IPGATE AG: DE102009061809B3, Anmeldetag: 30.09.2009

[33] *Vollert, H., Strengert, S., Kunz, M., Kolarsky, J.*.: „Verfahren zum Betreiben eines rekuperativen Bremssystems eines Fahrzeuges, Steuervorrichtung für ein rekuperatives Bremssystem eines Fahrzeuges und rekuperatives Bremssystem“, Deutsche Patentanmeldung DE102012211278A1 der Firma Robert Bosch *GmbH*, Anmeldetag: 29.06.2012

[34] Feigel, *H.-J., Ross, S., Linkenbach, S.*: “ Brake System Concepts for Hybrid Vehicles“, Vortrag Intelligent Braking 2011, IQPC Köln, Vortrag am 28.09.2011

[35] *Leiber, H., Unterfrauner, V.*: "Bremssystem mit adaptiv steuerbarem Belaglüftspiel" erteilte Patente der Patentfamilie E114 der Firma IPGATE AG: EP2225133B1, US8864244B2, CN101945787B, Anmeldetag der deutschen Prioritätsanmeldung: 21.12.2007.

[36] *Leiber, T., Köglsperger, C., Unterfrauner, V.*: „IBS- Integriertes Bremssystem“, Automobilelektronik Kongress Ludwigsburg, Manuskript zum Vortrag am 10.06.2010

[37] *Leiber, T., Leiber, H., van Zanten, A.*: “Auswirkung des autonomen Fahrens auf zukünftige Bremssysteme, ATZ-Sonderausgabe März 2019

© IPGATE AG