

## 15.04.2025 Softwarebremse statt Brake-by-Wire

Nachwachsende Generationen von Entwicklern möchten nichts aus den Fehlern der Vergangenheit lernen. Sie produzieren viel lieber ihre eigenen. In ihrer Phantasie geht es immer nur in Richtung nach oben, hin zu aufwändiger, komplexer, zu mehr High-Tech, Elektronik und KI. Deshalb versuchen sie es immer wieder mit „By-Wire“-Lösungen. Egal ob Bremse oder Lenkung, alle 20 bis 30 Jahre sind die negativen Erfahrungen der älteren Generation nichts mehr wert, denn die nachrückende Entwicklungsgeneration ist sich sicher, es mit den heutigen Möglichkeiten viel besser hinzubekommen. Es stimmt ja auch. Die Elektronik ist um ein vielfaches leistungsfähiger, die elektrischen Aktuatoren wesentlich schneller und genauer, eine stabile elektrische Versorgung mit hoher Leistung steht bei Elektromobilen Gewehr bei Fuß und wartet nur noch darauf, angezapft zu werden.

### Bremssystem für Elektro- und Hybridfahrzeuge

Bleiben wir beim Bremssystem. Für Elektro- und Hybridfahrzeuge muss die Möglichkeit der Bremsenergierückgewinnung mit Hilfe der Rekuperation sichergestellt werden. Der Elektroantrieb erfüllt dabei zwei Aufgaben:

1. Simulation des Motorschleppmoments eines Verbrennungsmotors bei Fahrpedalstellung Null bzw. beim Segeln. Ohne das vom Verbrennungsmotor gewohnte Schleppmoment ist das Fahren sehr anstrengend, weil man bei der geringsten Verzögerung auf das Bremspedal steigen muss.
2. Erzeugen eines Bremsmoments beim Tritt auf das Bremspedal, das dem echten Bremsmoment entspricht, welches allein durch die Radbremsen ohne Rekuperation erzeugt würde.

Dabei treten mehrere Schwierigkeiten auf:

- Das vom Elektroantrieb erzeugte Bremsmoment schwankt. Es hängt ab vom Ladezustand des Speichers, der Leistung der Elektromaschine und der Fahrgeschwindigkeit.
- Der Fahrer darf aber keinen Unterschied in der Pedalkennlinie spüren im Vergleich zu einem normalen Bremsvorgang ohne Unterstützung durch den Elektroantrieb.

### Brake-by-Wire

Das Bremssystem hat also die Aufgabe, der Fahrervorgabe entsprechend ein Summenbremsmoment aus elektrischem Bremsmoment und konventionellem Radbremsmoment zu erzeugen. Das gelingt am besten durch ein Brake-by-Wire-System, bei dem das Bremspedal vom Bremssystem entkoppelt ist, und das Pedalgefühl durch einen Kennliniensimulator erzeugt wird. Allerdings konnten sich Brake by Wire-Systeme nicht durchsetzen, sowohl aus Aufwands- und Kostengründen, als auch aufgrund zu hoher sicherheitstechnischer Risiken.



ZF Schaubild

An der Aufwands-, Kosten- und Sicherheitssituation hat sich bis heute nichts geändert. Z.B. müssen alle Sensoren und Kabel dreifach redundant ausgelegt werden, wobei bei Fehlern im System eine Entscheidung zwei zu eins zu treffen ist. Man benötigt für die Aktuatoren zwei voneinander unabhängige Batterien und Stromkreisläufe. Man benötigt einen Pedalweg/Pedalkraftsimulator. Und natürlich benötigt man elektromechanische Aktuatoren an allen vier Rädern. Aufgrund der thermischen Belastung stellen elektromechanische und elektronische Bauteile in der Nähe der Bremsscheiben eine extreme Herausforderung dar, speziell an der Vorderachse.

In der Praxis wurde das Pedalgefühl reichlich negativ bewertet. Dabei wurde doch gerade das Pedalgefühl als großer Pluspunkt herausgestellt, denn die Charakteristik war „theoretisch“ per Software frei wählbar. Woran lag es? Es lag an der Dynamik. Dabei ist nicht der Druckgradient an den Rädern gemeint, sondern das zeitliche Missverhältnis zwischen Pedalkraft und Raddruck.

Bei einem traditionellen Bremskraftverstärker schiebt der Fahrer mit seinem Fuß die Flüssigkeitssäule vor sich her in die Radbremsen. Anders bei Brake by Wire. Ein Sensor erfasst den Fahrerwunsch, ein Steuergerät errechnet daraus den zugehörigen Raddruck, und steuert dementsprechend die elektromotorischen Aktuatoren. Dieser Vorgang des Erfassens, Berechnens und Einstuerns dauert etliche Millisekunden. Außerdem kann er immer erst stattfinden, wenn die Betätigung eine bestimmte Position erreicht hat. Der Raddruck hinkt dem Fahrerwunsch immer ein klein wenig hinterher. Das spürt der Fahrer, auch wenn es theoretisch nicht nach viel aussieht.

Das äußert sich in der Praxis so, dass man fast ständig ein geringfügig zu heftig aufs Pedal steigt. Besonders im Feinbereich ist ein genaues, müheloses Dosieren nicht möglich. Probefahrten mit fertigen Systemen vermittelten genau diesen Eindruck.

Noch eine Ergänzung zum Pedalfeeling. Es wird behauptet, der Mensch könne sich an fast alles ziemlich rasch gewöhnen. Das stimmt auch, wenn es sich um Bedienkräfte und Bedienwege handelt. Was ihm aber nicht überhaupt nicht behagt ist,

1. wenn eine Reaktion auf seinen Input mit Zeitverzug erfolgt. Das weiß der PC-User, dessen Cursor seiner Mausbewegung hinterhereilt;
2. wenn auf seine Vorgabe unterschiedliche Reaktionen erfolgen;
3. wenn Stick-Slip-Effekte ihm die Dosierung erschweren.

Die nächste Schwierigkeit ergibt sich beim Pedalsimulator. Er muss nicht nur die vom Unterdruck-Bremskraftverstärker her gewohnten und als optimal bewerteten Pedalkraft-Pedalweg-Kennlinien möglichst genau nachbilden, sondern auch Dämpfung und Hysterese. Keine leichte Aufgabe, an der

so manches Entwicklerteam scheiterte, egal, wie viel Aufwand betrieben wurde. Kostenseitig ein nicht zu unterschätzender Faktor.

### **Entkoppelter Bremskraftverstärker:**

Um das Rekuperations-Bremsmoments in das Gesamtbremsmoment zu integrieren, ohne den Fahrer zu irritieren, entwickelten verschiedene Bremsenhersteller sog. entkoppelte Bremskraftverstärker. Die Erfahrungen mit diesen Systemen sind alles andere als zufriedenstellend. Sehen wir uns mal die Klagen eines Porsche Taycan-Fahrers an:

Meinen Taycan 4S habe ich seit ca. Juni 2022. Vom Hof gefahren - hat von Anfang an einwandfrei re-  
kuperiert (Brems-Rekuperation, Dauerrekuperation, Autorekuperation).

**„Irgendwann nach einigen Monaten fiel die Rekuperation beim Bremsen sporadisch aus (das ist wohl die 'Bremsenpflege').** Das hatte ich bis dahin nicht bemerkt, zumal die Bremswirkung dann deutlich schwächer wird, wenn nicht gleichzeitig rekuperiert wird. Meine Vermutung war, dass sich der Wagen über Connect mal wieder ein Update gezogen hatte (da wurden ständig Updates angezeigt, keine Ahnung für was alles).

**Die sporadisch fehlende Bremsreku ist extrem unangenehm, weil man sich nie darauf verlassen kann, dass die Bremswirkung gleich bleibt. Wenn ich z.B. in 30 Sek. 5x hintereinander bremse, kann es sein, dass 3x rekuperiert und 2x nicht. Einmal wäre ich fast irgendwo aufgefahren, weil plötzlich die Bremskraft fehlte mangels Reku.**

Die Werkstatt konnte nichts feststellen, dann wurde vor einigen Monaten ein "großes Update" gemacht. Ich fuhr vom Hof und auch hier übrigens normale Reku beim Bremsen (nichts mit Einbremsen o.ä.). Dennoch wurde das Problem mit dem Update nicht behoben. Immer noch sporadische "Ausfälle" der Bremsreku. Nachdem ich einmal in einer kritischen Situation war, habe ich nochmal einen Termin mit dem PZ ausgemacht und die haben heute nochmals bestätigt, dass alles in Ordnung sei.

Andere Taycan Fahrer haben mir dieses unstete Bremsverhalten ebenfalls bestätigt. Jetzt wundere ich mich, dass hier im Forum kaum etwas davon zu lesen ist. Hier gibt es einige Andeutungen dazu: [Endlich! Reku auf der Bremse...](#)

Da steht z.B. dass es im Sportmodus häufiger auftritt. Ich fahre fast nur im Sportmodus. Weiß dazu jemand mehr?

Bin ich der Einzige für den diese "Bremsenpflege" ein Problem ist? Es fühlt sich fast an, als würden die Bremsen ohne vorherige Ankündigung versagen (gefühlte 30-40% weniger Bremsleistung). Wenn ich auf Auto-Reku umschalte, dann verschwindet es meistens für eine Weile (Brems-Reku funktioniert dann sofort wieder).

Und falls irgendjemand von Porsche mitlesen sollte: Was hat man sich denn bei dem Auto-Reku Knopf gedacht? Wieso kann man den nicht blind bedienen? Wenigstens einen Bestätigungssound für Automodus wäre hilfreich, weil ich bei 150 km/h auf der Autobahn nämlich sonst 2-Sek auf das Display starren muss, bis es auf Auto umstellt - das ist doch gaga! Und warum diese Einstellung nicht gespeichert werden kann muss man gar nicht erst verstehen (ist für einen Fahrer sicher irrelevant, ob da mal irgendwelche Normwerte in irgendeinem Modus gemessen wurden und man deshalb - das muss man sich mal vorstellen - grundsätzliche Einstellungen nicht speichern darf).“

Dazu muss man wissen, dass Porsche alle 150.000 verkauften Taycan zurückruft, angeblich wegen Problemen mit den vorderen Bremsschläuchen. Wer soll das glauben? Porsche verbaut ja nicht erst seit dem Taycan Bremsschläuche, also müsste eine gewisse Erfahrung mit diesen Elementen vorhanden sein. Man wird den Verdacht nicht los, dass da mehr dahintersteckt. Vermutlich ein Problem mit dem futuristischen Bremssystem.

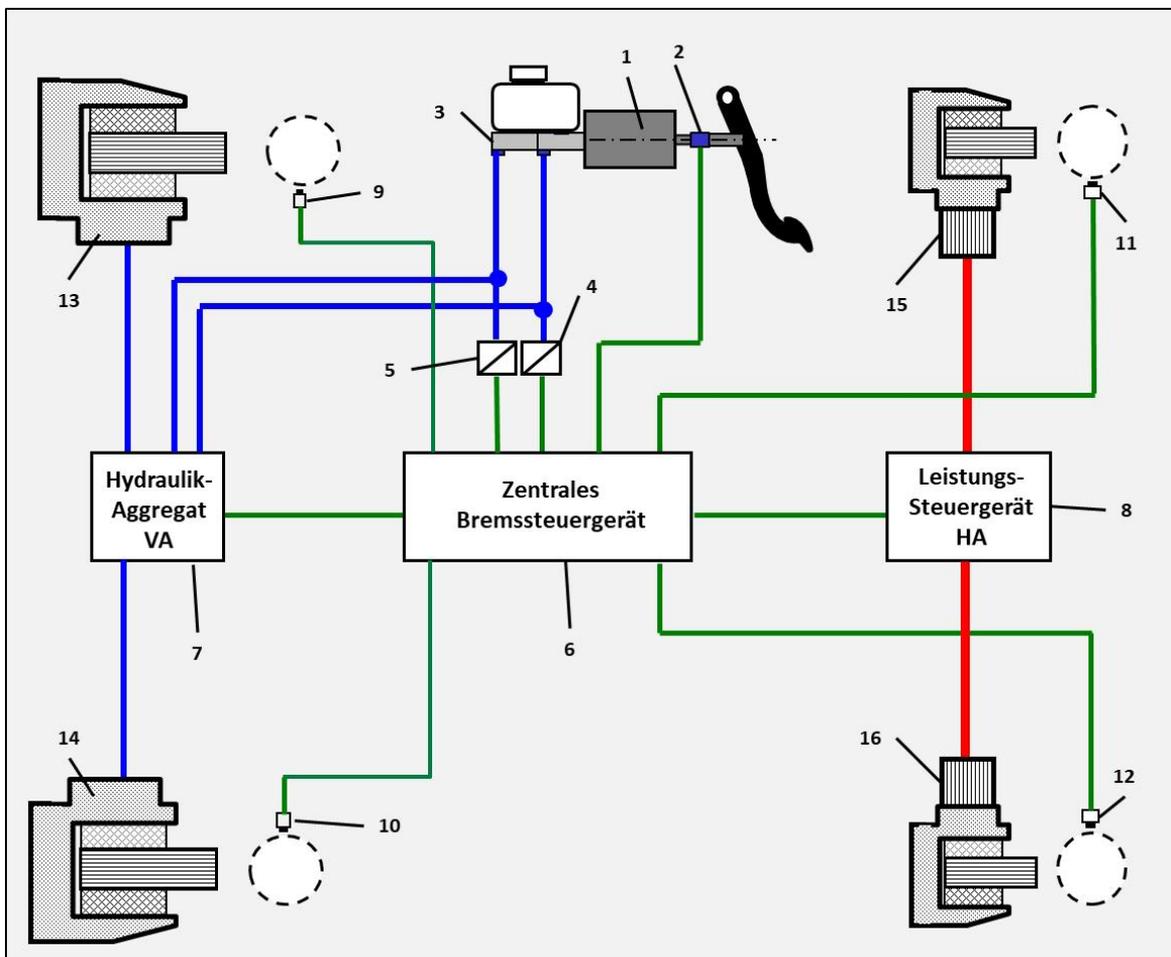
Der Verdacht erhärtet sich, weil plötzlich Audi ebenfalls seine Elektrofahrzeuge zurückruft, die über das gleiche Bremssystem verfügen wie der Taycan. Ebenfalls wegen Bremsschläuchen.

Und BMW? Denen bescherte Conti den teuersten Rückruf in der Geschichte. Mit einem konventionellen Bremssystem kann das Problem nicht zusammenhängen, die sind dazu viel zu ausgereift und zu billig. Es muss andere Ursachen haben, zum Beispiel fehlerhafte Elektronik in den Bremsregelsystemen. So wie man BMW kennt, sind sie technischen Neuerungen prinzipiell aufgeschlossen. Das ist dann die Quittung für den technischen Fortschritt.

Never Change a running System!

### Softwarebremse – Variante 1:

**Definition:** Unter Softwarebremse versteht man ein Bremssystem, bei dem man die wichtigsten Brems-Parameter per Software bestimmen kann, ohne Änderungen an der Hardware vornehmen zu müssen.



1 Elektromotor 2 Pedalkraftsensor 3 Tandemhauptbremszylinder 4/5 Drucksensoren  
6 Zentrales Bremssteuergerät 7 Hydraulikaggregat 8 Leistungssteuergerät Hinterachse  
9/10/11/12 Raddrehzahlsensoren 13/14 Hydraulische Bremssättel Vorderachse  
15/16 Elektromechanische Bremssättel Hinterachse

### **Kennzeichen:**

Die Softwarebremse ist ein System,

- das die Anforderungen eines Elektro- bzw. Hybridfahrzeugs hinsichtlich Rekuperation und Brems-/Schleppmoment in vollem Umfang erfüllt,
- die Sicherheitsanforderungen eines konventionellen Systems erfüllt, im besten Fall sogar übertrifft,
- nicht kostspieliger und aufwändiger ist als ein konventionelles Bremssystem.
- es von der kleinen Fahrzeugklasse bis zur Luxusklasse einsetzbar ist.

### **Unterschiede zum Brake-by-Wire?**

- Ein Pedalgefühl-Simulator ist überflüssig.
- Es gibt einen Bremskraftverstärker wie bei der konventionellen Bremse, allerdings wirkt er nicht per Unterdruck, sondern elektromechanisch.
- Der Fahrer hat immer die Verbindung des Pedals mit den Radbremsen.
- Die Pedalkraft/Pedalweg-Zuordnung kann entsprechend dem bekannten Optimum ausgelegt werden.

### **Unterschiede zum konventionellen Bremssystem:**

Das Konzept der im Bild dargestellten Softwarebremse unterscheidet sich von einem konventionellen Bremssystem durch zwei Kernelemente.

- Bei der Bremsbetätigung ist der Unterdruckbremskraftverstärker durch einen elektromechanischen Bremskraftverstärker (1) ersetzt.
- Bei den Radbremsen sind die beiden hinteren hydraulischen Bremssättel durch elektromechanische Bremssättel (15, 16) ersetzt.
- Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass die beiden Bremskreise eines Tandemhauptbremszylinders in jeweils eine einzelne Vorderachsbremse geleitet werden.

### **Funktion:**

Der Fahrerwunsch wird in einem Pedalwegsensor (2) erfasst und in das zentrale Bremssteuergerät (6) geleitet. Darin werden auch die Signale der beiden Drucksensoren (4, 5) und die Raddrehzahlsignale (9, 10, 11, 12) verarbeitet.

Das zentrale Bremssteuergerät koordiniert die Aktivitäten des elektromechanischen Bremskraftverstärkers (1), des ESP-Hydraulikaggregates (7) für die VA-Bremsen (13,14), sowie des Leistungssteuergerätes (8) für die elektromechanischen HA-Bremsen (15, 16).

Die Bremsenkennlinien können in mehrere Fälle unterteilt werden:

- Schleppmomentsimulation ohne Bremspedalaktivität, gesteuert ausschließlich über das Fahrpedal.
- Koordination von Rekuperationsbremskraft und Radbremskraft an der Hinterachse bei leichten Bremsungen bis etwa  $2 \text{ m/s}^2$ .
- Weiterer Anstieg der Bremskraft durch Druckaufbau in den VA-Radbremsen und dem weiteren Bremskraftanstieg an den HA-Bremsen.

Insgesamt müssen die Betätigungskennlinien den heute üblichen optimalen Kennlinien weitestgehend entsprechen. Unter keinen Umständen sind Abweichungen der Bedieneigenschaften von Bremsung zu Bremsung oder Unstetigkeiten bei einzelnen Bremsmanövern akzeptabel

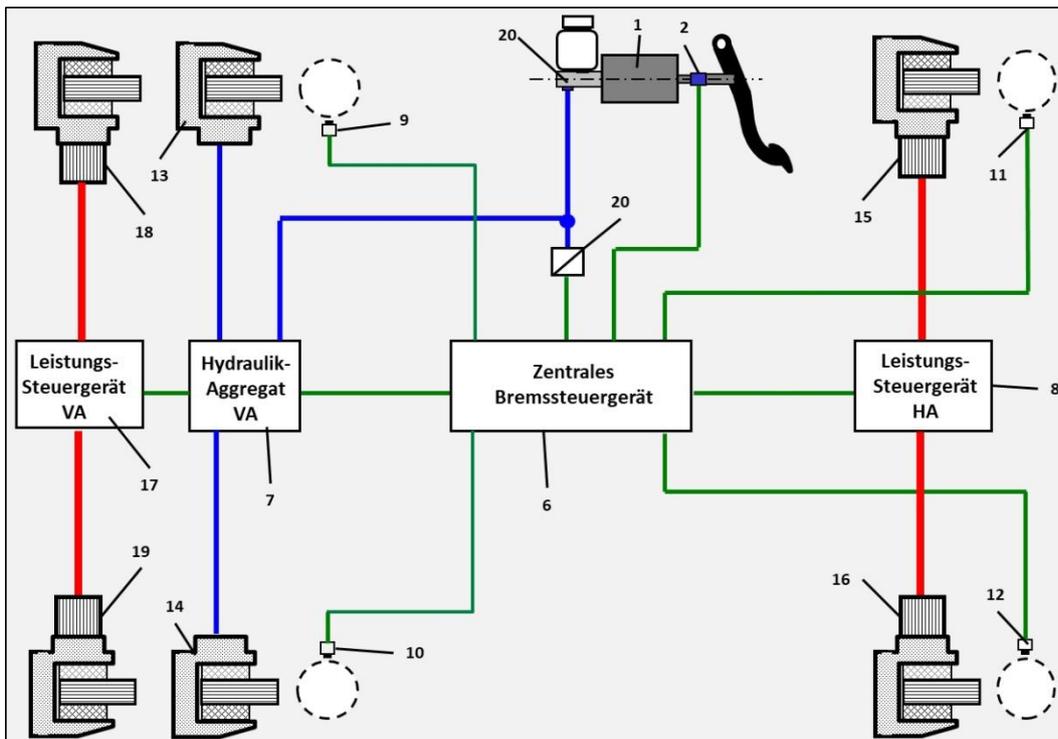
### Vorteile gegenüber konventionellem Bremssystem:

- Kleinerer Einbauraum durch Entfall des voluminösen Unterdruckbremskraftverstärkers.
- Entfall einer Unterdruckpumpe.
- Situationsgerechte Verteilung der Bremskraft.
- Auflösung des Zielkonflikts zwischen Bremsweg und Bremsstabilität.
- Vereinheitlichung der Bremsanlage innerhalb einer Baureihe, im Idealfall sogar baureihenübergreifend.
- 30 Prozent kürzerer Bremspedalweg durch Wegfall der hydraulischen Versorgung der HA-Bremsen.
- 50 Prozent kürzerer Bremspedalweg im Falle einer Versorgung der VA-Bremsen über das ESP-Hydroaggregat ab ca. 60 Prozent Verzögerung
- Kleineres, leichteres und kostengünstigeres Hydraulikaggregat durch kleinere Rückförderpumpe und Entfall von Ventilen.

### Sicherheitskonzept:

- Bei Ausfall eines vorderen Bremskreises wirkt der andere Bremskreis plus die HA-Bremsen.
- Bei Ausfall der HA-Bremsen wirken beide VA-Bremsen.
- Bei Ausfall der Bremskraftverstärkung bremsen die beiden VA-Bremsen mit Hilfe der ESP-Hydraulik plus die beiden HA-Bremsen.

### Softwarebremse - Variante 2:



Variante zwei unterscheidet sich von Variante 1 durch einen Single-Hauptbremszylinder (20), sowie zwei zusätzliche elektromechanische Bremssättel (18,19) an der Vorderachse. Die beiden VA-Bremssättel jeder Seite wirken auf dieselbe Bremscheibe.

#### **Vor-/Nachteile:**

Vorteile dieser Anordnung gegenüber Variante 1:

- Doppelt so großer Spielraum für Rekuperation bzw. Bremsenergierückgewinnung.
- Noch bessere Möglichkeiten bei der Auflösung des Zielkonflikts Bremsweg vs. Bremsstabilität.
- Nochmals kleinerer Bremskraftverstärker und Hauptbremszylinder.
- Identische elektromechanische Bremssättel an VA und HA – Gleichteileprinzip.

Nachteile:

- Größerer Aufwand und höhere Kosten durch zusätzliche Bremssättel.
- Im Bereich von Normalbremsungen (bis 40 Prozent Verzögerung) echtes Brake by Wire. Der elektromechanische Bremskraftverstärker wirkt in diesem Bereich als Pedalweg- und Pedalkraftsimulator.

#### **Fazit:**

Die Softwarebremse verbindet in idealer Weise die Vorteile des konventionellen Bremssystems mit den Vorteilen von Brake-by-Wire, ohne die Nachteile zu übernehmen. Durch die kostengünstige Auslegung ist ein Einsatz nicht nur in Hybrid- und Elektrofahrzeugen möglich, sondern auch in Verbrennerfahrzeugen. Kleinerer Bremskraftverstärker, kürzere Pedalwege und weitgehende Vereinheitlichung von Bauteilen sind wichtige Argumente für einen solchen Schritt. Der Unterdruckbremskraftverstärker, der schon viele Angriffe überlebte, würde erstmalig in Bedrängnis geraten.

#### **Wer soll es umsetzen?**

Allen voran natürlich die traditionellen Bremsenhersteller ZF-Bremsen (vormals TRW) und Conti. Beide durchlaufen gerade eine selbst verursachte Durststrecke, und könnten dringend einen großen Wurf gebrauchen. Aber auch Bosch könnte sich einmischen und mit einem von beiden ein gemeinsames Projekt aufsetzen.

**In Deutschland versucht man, Kompetenz durch Komplexität zu simulieren.**