

2 Grundlagen

2.1 Stand der Technik

Die elektrohydraulische Energieversorgung in Form eines Hydraulikaggregates ist eine Baugruppe eines elektronisch geregelten Bremssystems nach Bild 2-1. Neben dem Hydraulikaggregat besteht ein solches Bremssystem aus den konventionellen Radbremsen (Scheibenbremse und Bremsattel), dem elektronischen Regler, der Radsensorik und der Druckmodulationseinheit, die durch Ventile das Einstellen der einzelnen Radbremsdrücke ermöglicht. Elektronisch geregelte Bremsanlagen können danach unterschieden

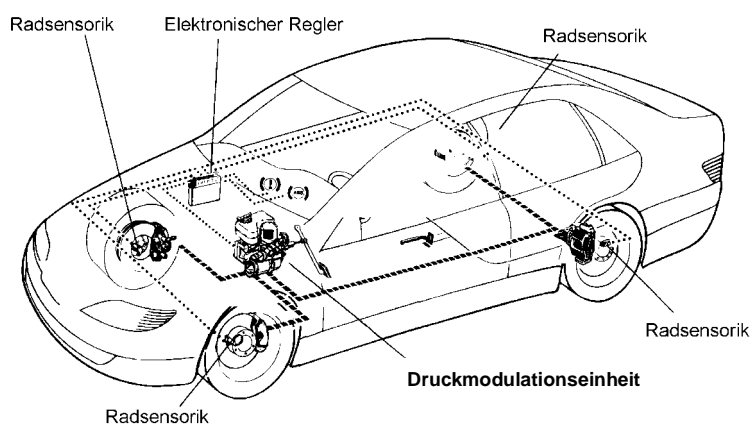


Bild 2-1: Komponenten eines elektronisch geregelten Bremssystems [A2]

werden, ob sie zusätzlich zu einer konventionellen Bremsanlage eingebaut werden können, oder nicht. Bei den Anlagen, die auf ein konventionelles Bremssystem aufbauen, ist der Unterdruck-Bremskraftverstärker als weiteres Bauteil der hydraulischen Anlage zu nennen. Zur besseren Übersicht wird zunächst die technische Entwicklung solcher Bremssysteme kurz umrissen. Bei konventionellen Bremsanlagen ohne elektronische Regelung wird der im Radzylinder bei einer Trommelbremse, bzw. der im Bremsattel bei einer Scheibenbremse, benötigte Druck durch einen Unterdruck-Bremskraftverstärker zusätzlich zur Fußkraft aufgebracht. Durch zwei getrennte hydraulische Kreise wird die Sicherheit des Systems erhöht (Zweikreis-Bremsanlage). Entwicklungsarbeiten an einem blockierfreien Bremssystem (ABS) haben schon in dem Jahre 1958 stattgefunden [A1]. Die erste Serienproduktion der gleichen Firma eines elektronisch geregelten Bremssystems fand jedoch erst 1984 unter dem Produktnamen „Mark II ABS“ statt. Da dieses System der Ausgangspunkt für die Entwicklung des AHB ist, soll die Funktion hier erläutert werden. Der Hydraulikschaltplan Bild 2-1 zeigt mit der Baugruppe 7 die hydraulische Energieversorgung. Bei Betätigung des Bremspedals wird das federbelastete Schaltventil des Bremskraftverstärkers 1 ausgelöst. Das Einlaßventil für die Hinterachse 3B wird dann direkt mit dem Motor-Pumpen-Aggregat versorgt. Die beiden vorderen Radbremsen 3A und 3C werden über den Tandem-Hauptzylinder angesteuert. Hierbei steht zusätzlich zur Fußkraft die

werden, ob sie zusätzlich zu einer konventionellen Bremsanlage eingebaut werden können, oder nicht. Bei den Anlagen, die auf ein konventionelles Bremssystem aufbauen, ist der Unterdruck-Bremskraftverstärker als weiteres Bauteil der hydraulischen Anlage zu nennen. Zur besseren Übersicht wird zunächst die technische Entwicklung solcher Bremssysteme kurz umrissen. Bei

hydraulische Verstärkung durch den Druck des Aggregates und des Flächenübersetzungsverhältnisses zur Verfügung. Mit den Schaltventilen 4 und 5 wurde ein Schaltregler zum blockierfreien Bremsen realisiert. Dieser ist allgemein unter ABS (Anti-Blockier-System) bekannt. In jedem der drei Regelkreise 3a, 3b und 3c werden durch entsprechendes Schalten der Ventile die Zustände „Druck aufbauen“ „Druck halten“ und „Druck ablassen“ in Abhängigkeit der Regelgröße Bremsschlupf¹ [A2] eingestellt.

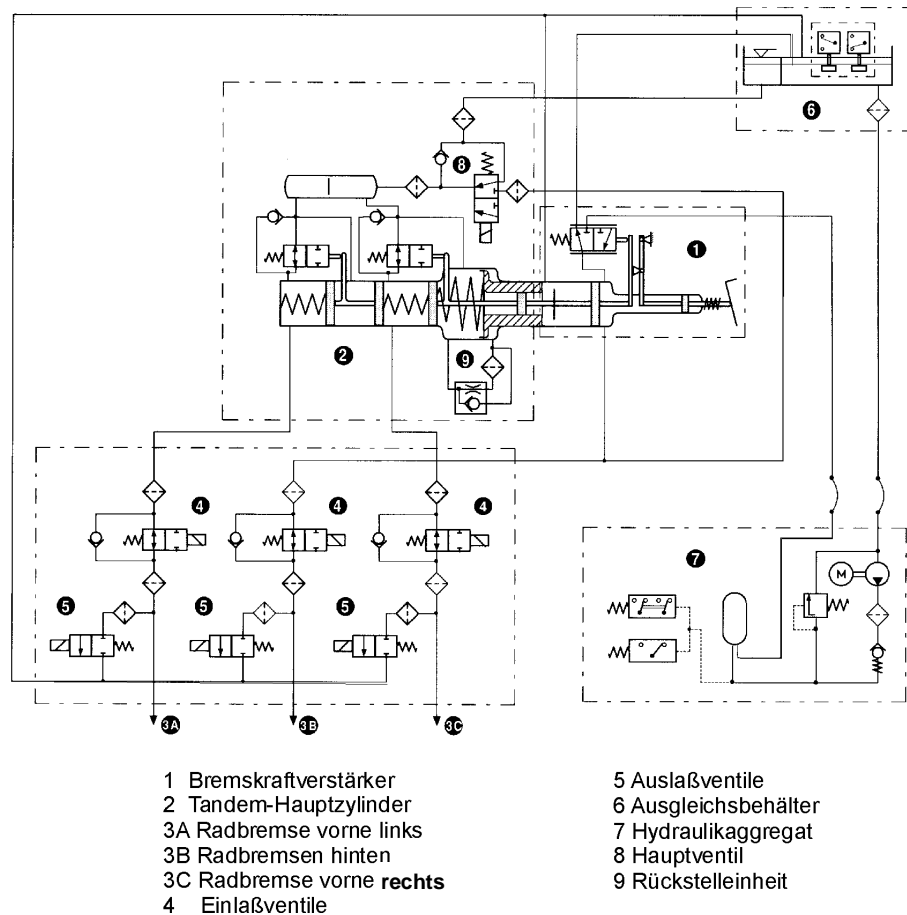


Bild 2-2: Hydraulischer Schaltplan der ABS Bremsanlage MK-II [A2]

Die weitere Entwicklung der elektronischen Bremssysteme hat weitere Funktionalität in die PKW-Bremse gebracht. Die Fahrsicherheit wurde durch Traktionskontrolle (ASR) und Giermomentenregelung (ESP) verbessert. Neben den Sicherheitsfunktionen sind Komfortfunktionen, wie z.B. ein Blockieren der Räder bei Diebstahlerkennung, denkbar. Verfolgt man die Nachfolgeprodukte der oben beschriebenen „Mark II ABS“ Anlage, so ist eine Veränderung der hydraulischen Anlage mit jeder neuen Funktion, die in die Bremse hinzugekommen ist, festzustellen. Es handelt sich deshalb bei Bild 2-2 nicht um ein universelles hydraulisches Modul.

¹ Unter Bremsschlupf versteht man den Schlupf zwischen Umfangsgeschwindigkeit eines Rades und der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges.

2.2 Motivation der Entwicklung einer aktiven hydraulischen Bremse

Ziel einer AHB-Anlage ist es eine hydraulische Anlage darzustellen, mit der die bisher bekannten Funktionen und zukünftig denkbare Funktionen realisierbar sind. Im Gegensatz zu dem „Mark II ABS“ oder auch anderen verfügbaren ABS-Anlagen werden stetige Ventile für die Druckmodulation der einzelnen Radbremsen verwendet. Neben den regelungstechnischen Vorteilen eines kontinuierlichen Stellgliedes² ergeben sich aber hieraus Konsequenzen für die elektrohydraulische Energieversorgung. Die prinzipbedingte Leckage eines Schieberventils muß durch das Motor-Pumpen-Speicher Aggregat (MPSA) ausgeglichen werden. Neben dem Volumenstrombedarf für die Ventilleckage muß auch die hydraulische Energie für die Betriebsbremsfunktion (Abbremsen der Räder ohne Regeleingriff) und die Regelbremsungen (Abbremsen der Räder mit Regeleingriff) geliefert werden. Dies bedeutet, daß die Pumpe des MPSA während der Fahrt häufiger in Aktion treten muß als bei aktuellen ABS Anlagen, welche die Pumpe nur für die Regelbremsung benötigen. Folglich ist bei der gestiegenen Einschaltdauer eine höhere Lebensdauer des gesamten MPSA gefordert. Aufgrund der immer weiter steigenden Komfortansprüche im KFZ tritt die Geräuschproblematik zunehmend in den Vordergrund.

2.3 Komponenten und Systemgrenzen der elektrohydraulischen Energieversorgung

Im folgenden Abschnitt soll der Begriff der elektrohydraulischen Energieversorgung über seine Komponenten und Systemgrenzen definiert werden. Die Komponenten Elektromotor, Pumpe und Speicher werden hinsichtlich ihres Einsatzes in einer PKW-Bremsanlage und den damit verbundenen grundsätzlichen Problemen betrachtet. Eine tiefergehende Betrachtung der Komponenten erfolgt in den Kapiteln, in denen die Entwicklungsideen zu der jeweiligen Baugruppe vorgestellt werden.

Elektromotor

In den gängigen elektronisch geregelten Bremssystemen finden mechanisch kommutierende Gleichstrommotoren Anwendung zum Antrieb der Pumpe. Dies ist im wesentlichen durch die Kosten bestimmt. Die Nachteile der mechanischen Kommutierung sind zum einen der Bürstenverschleiß und der Verlust im Bürstenfeuer. Die Betriebsspannung ist das 12V-Bordnetz, welches zwischen 8,5 V und 14,4 V schwanken kann. Problematisch ist bei dem Betrieb dieser Motoren der Anfahrstrom zu sehen. Da dieser nicht geregelt wird und zu Beginn noch keine Gegeninduktion durch die Läuferbewegung, die der treibenden Spannung entgegenwirkt, vorhanden ist, strebt der Strom

² Ein kontinuierliches Stellglied kann auch eine Komfort-Verbesserung im Regeleingriff bewirken. Das „ABS-Rattern“ wird durch die Schaltventile verursacht und kann durch ein solches Stellglied umgangen werden.

dem Endwert aus dem Verhältnis von Versorgungsspannung zu Kupferwiderstand entgegen. Bei einem 250 W Motor kann diese Anfahrstromspitze knapp 70 A betragen. Der kurzzeitig lieferbare maximale Strom einer Kfz-Batterie hängt stark von ihrem Ladezustand ab. Dieser ist im allgemeinen nicht überwacht und somit nicht bekannt. Daher kann der Anfahrstrom nicht in allen Situationen garantiert werden. Abhilfe kann hier entweder durch eine höhere Betriebsspannung oder durch einen geregelten Anfahrstrom geschaffen werden. In der Automobilindustrie wird daher ein höheres Spannungsniveau des Bordnetzes angestrebt. Weiterhin sollen elektronisch kommutierende Motoren eingesetzt werden. Diese haben sich jedoch in der breiten Anwendung noch nicht durchgesetzt, da sie durch zusätzlich notwendige Leistungselektronik im Vergleich zu mechanisch kommutierenden Gleichstrommotoren zu teuer sind.

Hinsichtlich der Dimensionierung ist anzumerken, daß Leistungen kleiner 500 W benötigt werden.

Pumpe

Die Pumpe muß die Bremsflüssigkeit auf einen Druck von ca. 200 bar komprimieren und einen Volumenstrom von 400 cm³/min liefern können. Das Fördermedium Bremsflüssigkeit besteht aus Glykolether und Additiven wie Farbstoff und Korrosionsinhibitoren. Im folgenden sollen die wesentlichen Aspekte für die Pumpenbauteile unter der Randbedingung, Bremsflüssigkeit zu fördern, erläutert werden, da hier ein signifikanter Unterschied zur Hydraulik auf Mineralölbasis vorliegt.

Die Bremsflüssigkeit greift Oberflächenbeschichtungen wie Lacke oder Verzinkungen an. Weiterhin werden bestimmte Metalle, wie z.B. Kupfer, angegriffen. Daher sind nicht alle Legierungen für Bauteile der Pumpe geeignet. Insbesondere sind die Werkstoffe für Gleitlagerungen und druckbelasteten metallischen Dichtungen kritisch hinsichtlich der Verträglichkeit mit Bremsflüssigkeit zu prüfen. Bei den Dichtungswerkstoffen für elastomere Dichtungen (Manschetten, Nutringe, O-Ringe etc.) ist anzumerken, daß der Standard-Werkstoff der Ölhydraulik NBR (Kurzbezeichnung nach DIN/ISO 1629 für Acrylnitril-Butadien-Kautschuk [A17]) mit Bremsflüssigkeit nicht verträglich ist. Vielmehr kommt EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk [A17]) und PTFE (Polytetrafluorethylen oder auch bekannt unter dem Namen Teflon) zum Einsatz. Das Problem hierbei ist, daß es sich um Sonderwerkstoffe handelt und somit nur eine geringere Auswahl an Dichtungen am Markt verfügbar ist. Weiterhin sind die Abmessungen bei den geforderten Volumenströmen klein gegenüber denen von Pumpen der Ölhydraulik, so daß nur wenige Dichtungen im Standard-Programm der Hersteller zu finden sind.

Bei Spaltdichtungen ist der Einfluß der stark temperaturabhängigen Viskosität zu berücksichtigen. Bremsflüssigkeit darf nach der Norm³ bei -40 °C eine kinematische Viskosität von 1800 mm²/s nicht überschreiten und bei +100 °C 1,5 mm²/s nicht unterschreiten. Bei Spaltdichtungen sind insbesondere die hohen Temperaturen kritisch, da hier der volumetrische Wirkungsgrad der Pumpe sinkt.

³ SAE J1703 Fassung Oktober 1985

Bei vielen elektronisch geregelten Bremssystemen wird die Pumpe nicht dazu benutzt, den Radbremsdruck aufzubauen, sondern um gegen den Druck des hydraulischen Unterdruckverstärkers Bremsflüssigkeit im Falle einer Bremsung mit Regeleingriff zu fördern. Daher wird auch relativ geringe Lebensdauer⁴ von der Pumpe für diesen Einsatzfall gefordert. Im Gegensatz dazu, wird bei einer elektrohydraulischen Energieversorgung eine zuverlässige und langlebige Pumpe benötigt. Neben der Lebensdauer tritt die Geräuschentwicklung der Pumpe, aufgrund der gestiegenen Komfortansprüche im Kfz, immer mehr in den Vordergrund. Die Schallabstrahlung der Pumpe und der angegliederten hydraulischen Anlage läßt sich in zwei Ursachen unterteilen. Zum einen sind mechanische Erregung der Struktur, und zum anderen sind Wechselwirkungen mit dem Fluid aufgrund von Druckpulsationen zu nennen. Die Frage wie stark Druckschwankungen zu Schallabstrahlung führen, hängt auch sehr stark von der Einbausituation der Hydraulikanlage ab. So ist es zum Beispiel möglich, daß mit der gleichen hydraulischen Anlage bei verschiedenen Einbausituationen (räumliche Anordnung der Aufhängung) unterschiedliche Schallpegel festgestellt werden können. Es ist jedoch kein sinnvoller Weg zur Vermeidung störender Geräusche, die durch die hydraulische Anlage verursacht werden, sich nur auf eine möglichst akustisch optimale Anbringung im KFZ zu verlassen. Vielmehr ist es anzustreben, die gesamte hydraulische Anlage so pulsationsarm wie möglich zu gestalten. Die Problematik der Druckpulsationen in einer hydraulischen Anlage ist dadurch gekennzeichnet, daß der Druck und der Volumenstrom Zustandsgrößen in Abhängigkeit des Ortes und der Zeit sind. Eine Fluid ist daher ein Schwinger mit unendlich vielen Eigenwerten. Es gilt daher, die Anregung durch die Pumpe gering zu halten.

Speicher

Der Hydrospeicher hat folgende Aufgaben bei der elektrohydraulischen Energieversorgung:

- Energie wird bevorratet zur Durchführung von Bremsungen mit Bremskraftverstärkung.
- Bei Bedarf werden kurzzeitig größere Mengen Bremsflüssigkeit zur Verfügung gestellt, z.B. bei einer ABS-Regelung. Dadurch kann die Pumpe auf einen geringeren Förderstrom und auf eine geringere Leistungsaufnahme ausgelegt werden.
- Der Versorgungsdruck wird aufrecht erhalten und das Abstellen der Pumpe während längerer Perioden der Betriebszeit wird ermöglicht.
- Passive Pulsationsdämpfung der Druckschwingungen, die durch die Pulsation des Pumpenförderstromes verursacht werden.

Die Hydrospeicher in ausgeführten elektronisch geregelten Bremssystemen unterscheiden sich in ihrem Konstruktionsprinzip nicht von den in der Ölhydraulik bekannten Konstruktionsprinzipien [A7] [A8]. Lediglich bei der Werkstoffauswahl des Trennelementes zwischen der Bremsflüssigkeit und dem Speichergas ist die Verträglichkeit zu beachten. Üblich ist hier für Membranen oder Blasen Butyl in Kombination mit dem Speichergas Stickstoff, um möglichst geringe Diffusionsraten zu erzielen. Die Lebensdauer eines kon-

⁴ Die Lebensdauer bewegt sich in der Größenordnung 20 Stunden Dauerbetrieb

ventionellen Hydrospeichers wird neben der Beweglichkeit des elastomeren Trennelementes auch durch den Druckverlust auf der Gasseite bestimmt. Ein Druckverlust von 30 bar bei einem Fülldruck von 80 bar ist in der Literatur [A2] als Verschleißgrenze angegeben.

Der Speicher wird durch sein Nutzvolumen, den unteren und den oberen Druckarbeitspunkt bestimmt. Das Nutzvolumen bestimmt sich aus der Verbraucher-Kennlinie der gesamten Bremsanlage und der geforderten Sicherheitsreserve. Der untere Druckarbeitspunkt, in Bild 2-3 exemplarisch an dem Hydrospeicher der Anlage nach Bild 2-2 links dargestellt, ist der Druck, bei dem spätestens die Pumpe eingreifen muß um den Systemdruck zu erhöhen. Der obere Druckarbeitspunkt, in Bild 2-3 rechts dargestellt, ist der maximale Druck, auf den der Hydrospeicher aufgeladen wird.

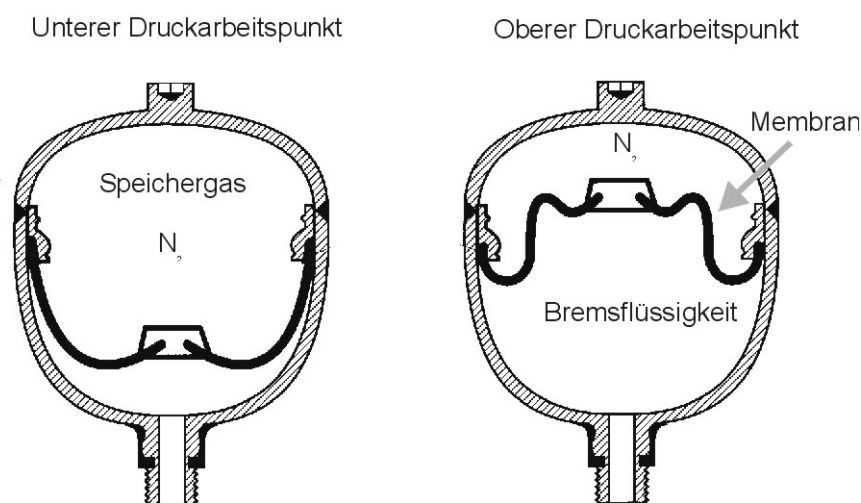


Bild 2-3: Hydrospeicher der MK-II Anlage [A2]: geschweißter Membranspeicher mit Stickstoff als Speichergas.

Der Hydrospeicher muß, wie in der Ölhydraulik üblich, möglichst nahe an die Pumpe gebaut werden, damit die Druckpulsationen aufgrund von Volumenstromschwankungen der Pumpe im Speicher gedämpft werden. Würde der Speicher über lange Leitungen mit der Pumpe verbunden, so kann durch Rohrschwingungen in dem dazwischenliegenden Stück Schall abgestrahlt werden.

Systemgrenzen

Unterscheidet man den Signalfluß und den Energiefluß, so erkennt man in Bild 2-4 die Wandlung der elektrischen in die hydraulische Energie, wie bei einem Hydraulikaggregat zu erwarten ist. Durch den Energiefluß unterscheidet sich das zu betrachtende System nicht von einem in der Ölhydraulik üblichen Hydroaggregat. Im Signalfluß ist jedoch ein Unterschied zu erkennen. Aus dem System werden Sensor-

Informationen der einzelnen Baugruppen herausgeführt. Mit diesen kann zum einen in einer übergeordneten Informationsverarbeitung Diagnose betrieben werden und zum anderen können Regelungen betrieben werden. Als Stellgröße ist hier die Ansteuerung des elektrischen Antriebes zu sehen.

Die hydraulischen Systemgrenzen sind durch den Ansaugstutzen der Pumpe und die Anschluss-Druckleitungen hinter dem Hydrospeichers definiert. Der elektrische Eingang in das System ist eine Spannungsversorgung von dem Bordnetz, welche für den elektrischen Antrieb und die Versorgung der Sensorik benötigt wird.

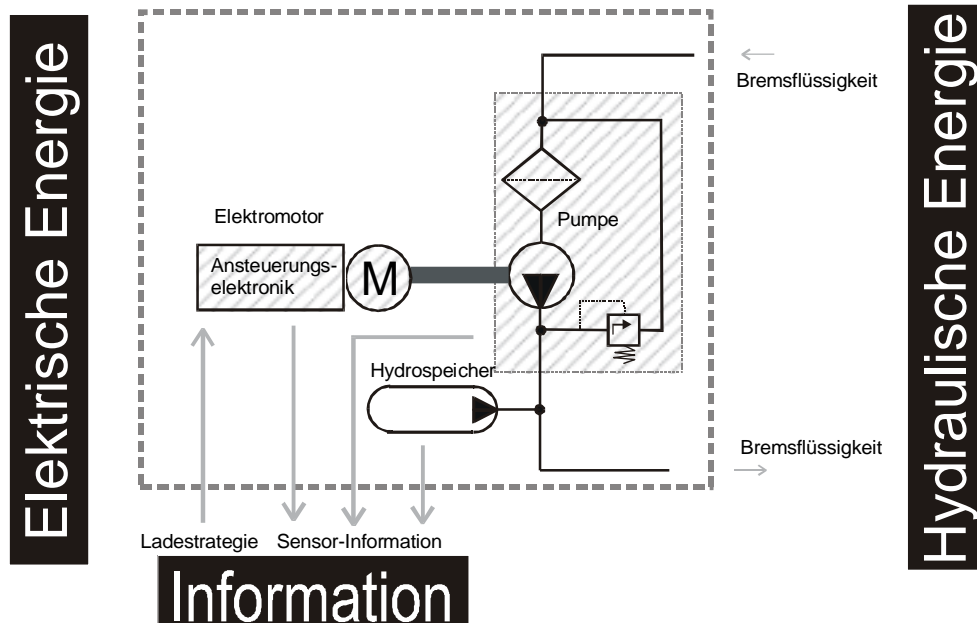


Bild 2-4: Schnittstellen der elektrohydraulischen Energieversorgung

2.4 Anforderungen

Neben den Eckdaten nach Tabelle 2-1, die aus dem Lastenheft des Industriepartners entnommen sind, ist die geforderte Lebensdauer von Interesse. Hierzu ist es wichtig zu wissen, welche Bauteilbelastung einem Autoleben entspricht. Auf dieser Basis kann mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren die geforderte Lebensdauer in eine Bauteilbelastung umgerechnet werden. Um ein Autoleben zu definieren, wird ein bewährtes Lastwechselprofil in Tabelle 2-2 vom Industriepartner übernommen und mit der aufgeführten Volumenaufnahme-Kennlinie in Bild 2-5 kombiniert. Der Bedarf für die Radbremsen wurde anhand eines Kfz der Oberklasse, welches eine größere Volumenaufnahme als ein Mittelklasse oder Kleinwagen hat, ermittelt. Bei der Ermittlung dieser Kennlinie wurde ein BMW 740 i als Kfz der Oberklasse gewählt, weil hierfür Messungen verfügbar waren. Das Lastwechselprofil bezieht sich auf die Häufigkeit der Druckanforderung der 4 Radbremsen. Da sich dies nicht ohne weiteres auf eine eindeutige und definierte Zustandsänderung des Hydrospeichers beziehen lässt, wird die Summe des in einem Autoleben umgepumpten Volumens herangezogen. Nach Tabelle 2-2 ist die in einem Autoleben für

alle Bremsungen benötigte Menge Bremsflüssigkeit ca. 4.4 m^3 . Da es sich hier um eine Abschätzung handelt, wird mit dem „glatten“ Wert von 4.5 m^3 gerechnet.

Tabelle 2-1: Anforderungen aus dem Lastenheft AHB

Allgemeine Randbedingungen	
Temperaturbereich	-40 °C bis +120 °C
Betriebsmedium	Bremsflüssigkeit gemäß SAE J1703
Umgebungsbedingungen	Motorraumklima
Anforderungen an die Pumpeneinheit des MPSA	
maximaler Druck	200 bar
geforderter Volumenstrom bei Raumtemperatur	$390 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$
Lebensdauer	mindestens 1000 Stunden Dauerbetrieb
Anforderungen an die Elektromotoreinheit des MPSA	
Betriebsspannung	12 V
minimal zulässige Betriebsspannung	8,5 V
Definition des mittleren Stromverbrauchs bezogen auf ein Zeitintervall	<ul style="list-style-type: none"> • 40 A bis 10 s • 10 A bis 30 min
Antriebsleistung	Ist anzupassen an die Lastkennlinie der Pumpe (daher keine festen Forderungen)
Drehzahl	
Drehmoment	
Anforderungen an die Hydrospeichereinheit des MPSA	
oberer Druckarbeitspunkt p_2	200 bar
unterer Druckarbeitspunkt p_1	150 bar
Nutzvolumen V_0	50 cm^3
Sicherheitsreserven	<ul style="list-style-type: none"> • Speicher soll Volumen unterhalb des unteren Druckarbeitspunktes für einen Notbetrieb (z. B. Pumpenausfall) zur Verfügung stellen • Bei einem Defekt darf kein Gas in die Bremsflüssigkeit gelangen, ohne daß der Fehler erkannt wurde und entsprechende Notmaßnahmen ergriffen wurden

Anhand der Forderungen in Tabelle 2-1 läßt sich mit diesem Ergebnis eine Bauteilbelastung angeben, die einem Autoleben ohne Sicherheitsfaktoren entspricht. Für die Pumpe ergibt sich ein Dauerbetrieb von 187 Stunden und 30 Minuten bei einem Volumenstrom von $400 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Für den Hydrospeicher ergibt sich die Lastwechselzahl aus dem Verhältnis des Gesamtvolumens von 4.5 m^3 zu dem pro Hub abgegebenen Nutzvolumen. Dieses hängt von der Ladestrategie ab. Falls diese nicht bekannt ist, so ergeben sich bei Vollhüben mit einem Nutzvolumen von 50 cm^3 90.000 Lastwechsel Unsicherheiten bei der Volumenaufnahme der vier Radbremsen in dem Bereich kleiner Drücke unter 50 bar verschieben die Werte in der dritten und vierten Spalte der Tabelle 2-2. Diese Unsicherheiten können über den

Verschleiß bzw. über ein unterschiedliches Lüftspiel⁵ der Scheibenbremsen auftreten, ohne daß die Radbremse defekt oder an der Verschleißgrenze ist.

Beim Bremsbelagverschleiß wird die Volumenaufnahme des Bremssattels größer, da der

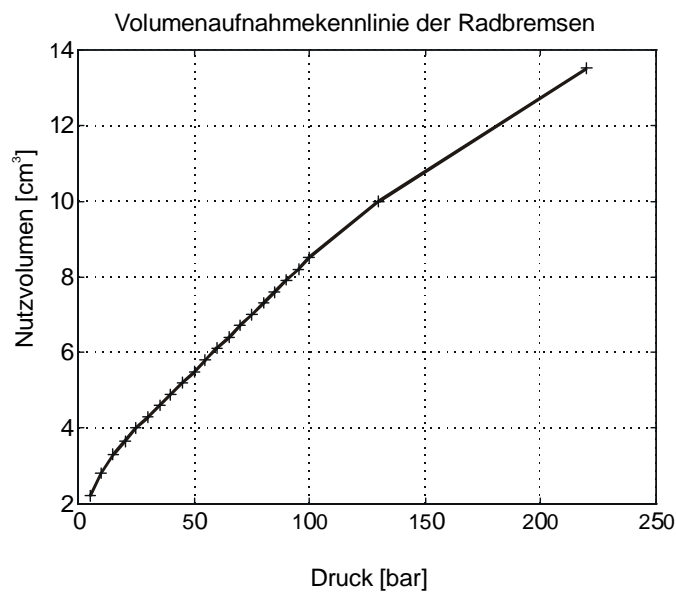


Bild 2-5: Volumenaufnahme der Bremsen eines BMW 740 i

Kolben weiter ausgefahren ist, und somit ein größeres Volumen in der Radbremse und den Leitungen als hydraulische Kapazität wirkt. Bei einem größeren Lüftspiel wird ein größeres Volumen benötigt, bis die Beläge an der Scheibe anliegen. Aus diesen Gründen ist die oben durchgeführte Betrachtung des Volumenbedarfs als theoretische Näherung zu betrachten. Widrige Einflüsse können z.B. durch Sicherheitsfaktoren nach oben hin abgeschätzt werden.

Tabelle 2-2: Lastwechselprofil mit den Daten für einen BMW740 i

Druck [bar]	Anzahl der Lastwechsel [-]	BMW 740 i [cm ³]	BMW 740 i Summe [cm ³]
5	150.000	2,2	330000
10	165.000	2,8	462000
15	190.000	3,3	627000
20	185.000	3,65	675250
25	160.000	4	640000
30	125.000	4,3	537500
35	90.000	4,6	414000
40	58.000	4,9	284200
45	35.000	5,2	182000
50	20.000	5,5	110000
55	10.000	5,8	58000
60	5.000	6,1	30500
65	3.000	6,4	19200
70	1.000	6,7	6700
75	500	7	3500
80	200	7,3	1460
85	50	7,6	380
90	50	7,9	395
95	50	8,2	410
100	2100	8,5	17850
130	30	10	300
220	20	13,5	270
Summe über ein Autoleben			4.400.915 cm³ (≈ 4.4 m³)

⁵ Unter dem Lüftspiel versteht man das sich einstellende Spiel zwischen der rotierenden Bremsscheibe und dem im Bremssattel geführten Bremsbelag aufgrund der Dichtungsreibung des Bremskolbens und des axialen Schlages der Scheibe. Ebenso nimmt die Struktur der Reibpartner, z. B. Riefen in der Scheibe, ungleiche Abnutzung etc., Einfluß auf das Lüftspiel.