

20.11.2017

## Die Radbremse – ein schwer unterschätztes Bauteil

### Bremsen früher und heute

Wie kann man die Bremsen schonen? Indem man die Bremsenergie den Reifen aufbürdet. In der Formel 1 kann man hin und wieder beobachten, dass beim Anbremsen Rauch von einem einzelnen Reifen aufsteigt, meistens vom kurveninneren Vorderrad. Der Volksmund sagt: „Wo Rauch ist auch Feuer.“ Noch pointierter die bayrische Version: „Wo´s raucht, do brennt´s.“ Das stimmt nicht ganz, Raucher können es bestätigen. Hohe Temperaturen sind aber auf jeden Fall im Spiel. Beim Beispiel Formel 1 raucht der stehende Reifen, weil er die Bremsenergie vom Fahrzeug auf die Fahrbahn überträgt. Was ihm nebenbei den gefürchteten Bremsplatten einbringt.

Ältere Mitbürger können sich erinnern, eine Vollbremsung war früher immer begleitet von einem schrecklichen Quietschen der Reifen, oft gefolgt von einem lauten, metallischen Scheppern. Dieses Quietschen ist aus dem Geräuschbild des Straßenverkehrs vollständig verschwunden, dank ABS. Das Scheppern ist geblieben, wenn auch nur noch selten. Das ABS verhindert, wie der Name schon sagt, ein Blockieren der Räder. Die gesamte Bremsenergie bleibt in den Bremsscheiben stecken. Die gesamte Bremsenergie? Nicht ganz, denn Luft und Reibung bremsen ebenfalls. Allerdings ist dieser Anteil bei einer Vollbremsung sehr gering, sodass wir sie bei den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigen müssen. Was wir aber bedenken müssen ist die Tatsache, dass die Autos heute schwerer und windschnittiger sind, über wesentlich mehr Motorleistung verfügen, und die Reifen erheblich mehr Reibkraft aufbauen.

### Bremsendimensionierung

Wenn ein Fahrzeug beim Bremsentest schlecht abschneidet, schieben die Tester reflexartig der Bremse den schwarzen Peter zu. Umgekehrt, bei sehr guten Bremswegen, jubeln sie z.B. über die gute Bremswirkung der Carbonbremsen, falls vorhanden. Sie wollen nicht verstehen, dass die Bremse nicht mehr tun kann, als den Reifen soweit abzubremsen, bis er sich im Bereich der optimalen Reibkraft befindet. Daran ändert auch eine noch so teure Carbonbremse nichts.

Anders beim Fading. Wenn nach mehreren Bremsungen hintereinander dieser optimale Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn nicht mehr erreicht wird, ist tatsächlich die Bremse dafür verantwortlich. Sie ist dann unterdimensioniert. Die Schwierigkeiten bei der anforderungsgerechten Auslegung wollen wir aufzeigen.

Apropos thermische Belastung. In regelmäßigen Abständen geistern die elektrischen Radnabenmotoren durch die Medien. Auch die Frage über Sinn und Unsinn dieser Technologie beschäftigt uns.

Folgende Fragen versuchen wir zu beantworten:

- Wie hoch ist die Bremsenergie und von welchen Faktoren hängt sie ab?
- Wie gehen die Radbremsen mit der dabei erzeugten Wärme um?
- Welche konstruktiven Merkmale wirken sich positiv und welche negativ auf die Bremsen aus?
- Wie sind Bremsscheiben aus Carbon zu bewerten?
- Wie steht es mit elektrischen Radnabenmotoren?

## Die Bremsenergie

Sie hängt ab vom Fahrzeuggewicht und von der Geschwindigkeit. Genauer gesagt vom Geschwindigkeitsunterschied vor und nach der Bremsung.

### Ein Beispiel:

- Ein Fahrzeug wiegt zwei Tonnen; bei SUVs und Flaggschiffen keine Seltenheit.
- Es erreicht eine standesgemäße Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h.
- Die Verzögerung betrage  $10 \text{ m/s}^2$ , das entspricht in etwa Erdbeschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Moderne Reifen auf Asphalt erreichen problemlos diesen Wert. Semislicks, wie sie reine Sportfahrzeuge und supersportliche Limousinen gerne verwenden, erreichen bei optimaler Betriebstemperatur 13 bis  $15 \text{ m/s}^2$ .

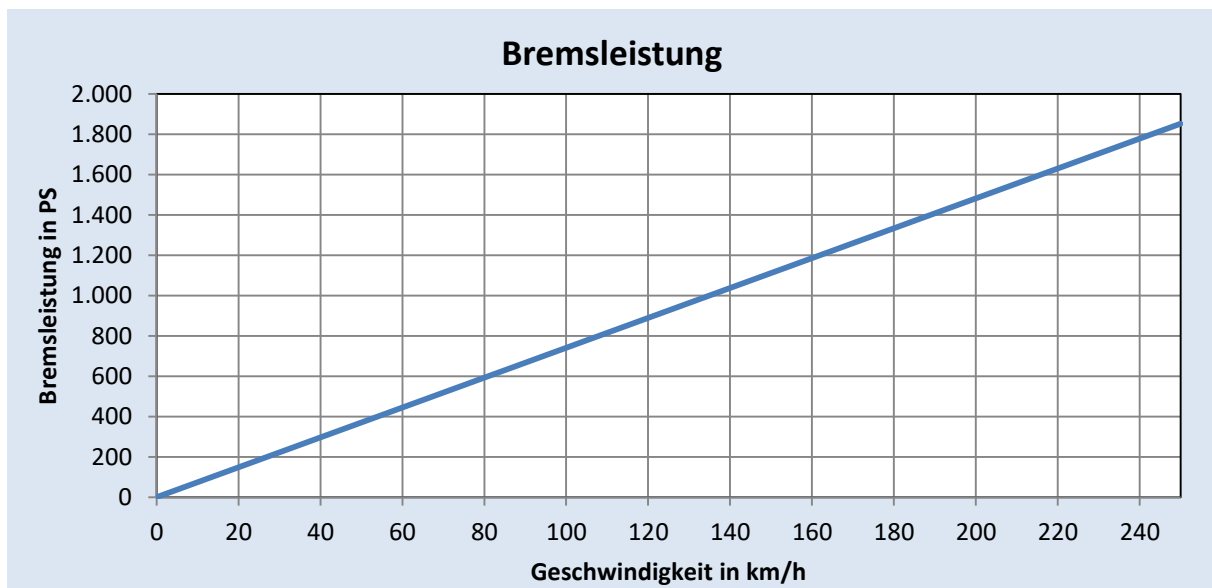
Aus diesen Vorgaben berechnen wir Schritt für Schritt Bremskraft, Bremsleistung und Bremsenergie über der Geschwindigkeit.

### Bremskraft:

Die Bremskraft errechnet sich aus der Masse und der Verzögerung. Sie ist über der Geschwindigkeit konstant. Sie beträgt in unserem Beispiel **20 kN**.

### Bremsleistung:

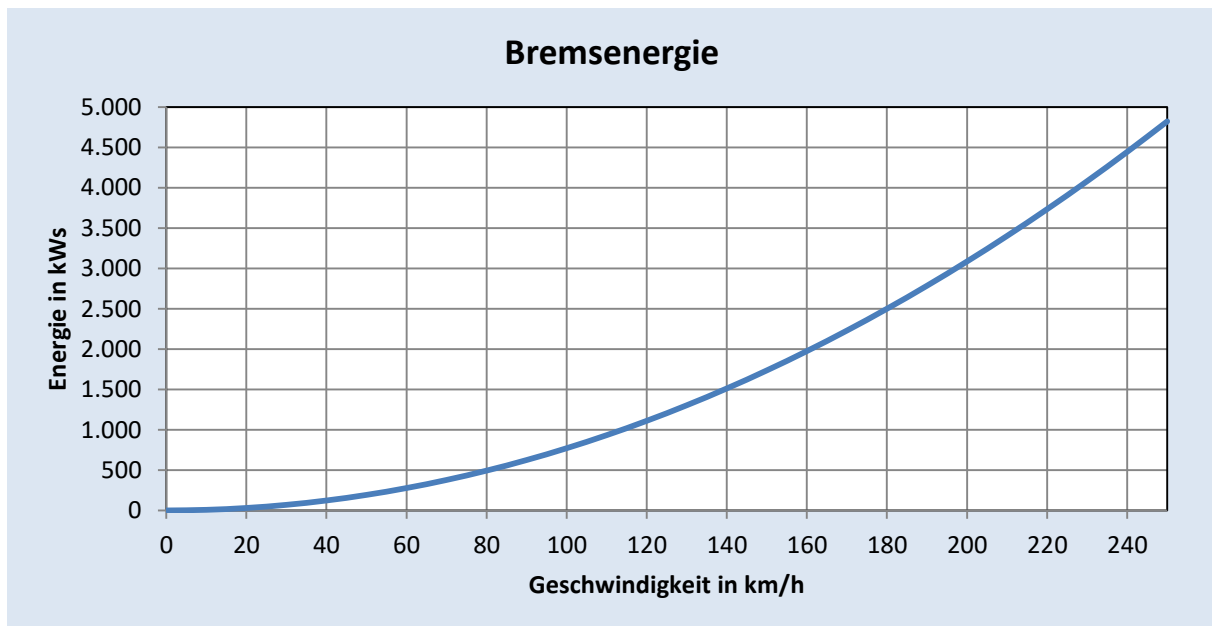
Die Bremsleistung nimmt linear mit der Geschwindigkeit zu. Sie errechnet sich aus Kraft mal Geschwindigkeit. Das folgende Diagramm zeigt eindrucksvoll die hohen Werte schon bei niedrigen Geschwindigkeiten.



Bereits bei 60 km/h ist die Bremsleistung bei den allermeisten Fahrzeugen höher als die Motorleistung. Bei 250 km/h stemmt sich die Bremse mit satten 1.800 PS gegen die Trägheitskraft des Fahrzeugs.

## Die Bremsenergie

Wir betrachten eine Verzögerung von einer bestimmten Ausgangsgeschwindigkeit bis zum Stillstand. In diesem Fall lautet die Formel für die Bremsenergie (= Bremsarbeit)  $E = m \cdot V^2 / 2$ .



Menschen und sogar Ingenieure tun sich schwer mit progressivem Verhalten. Man muss sich immer wieder vor Augen führen, dass bei doppelter Geschwindigkeit die vierfache Energie anfällt, bei dreifacher die neunfache, bei vierfacher die 16-fache, und bei fünffacher Geschwindigkeit die 25-fache Energie. Beispiel 50 km/h => 190 kW; 250 km/h => 4.750 kW. Will man beispielsweise wissen, wie viel Energie beim Bremsen aus 200 km/h bis 100 km/h anfällt, muss man lediglich die Differenz aus den beiden Werten bilden, in diesem Fall 3.000 – 750 = 2.250 kW.

Die reinen Zahlenwerte der Wärmemenge sind für Nicht-Techniker und sogar die meisten Techniker wenig aussagekräftig. Jeder weiß aber aus Erfahrung wie elend lange es dauert, im elektrischen Wasserkocher 1 Liter Wasser zum Kochen zu bringen. Die Bremsung aus 250 km/h bringt beinahe schlagartig 15 Liter Wasser von Raumtemperatur auf Siedetemperatur. Das zeigt auch überdeutlich, wie unrealistisch Wasserkühlung bei der Bremse wäre.

### Temperaturen

Eine Trivialität: Wo Energie vernichtet wird, wird es heiß. Wo viel Energie vernichtet wird, wird es sehr heiß. Bei der Bremse wird einmal wenig, ein andermal viel, und manchmal ganz viel Energie vernichtet. Wenig in der Stadt, hier kommt die Bremse kaum auf Betriebstemperatur. Etwas mehr auf der Landstraße, aber am meisten auf der Autobahn bei Bremsungen aus hoher Geschwindigkeit.

Wenn man unbedingt wissen will, wie viel die Bremse des eigenen Wagens verkraftet, muss man sein Gefährt bis ca. 80 Prozent Höchstgeschwindigkeit voll beschleunigen, und dann bis etwa 30 Prozent abbremsen. Die Bremsung kann, muss aber nicht an der maximalen Reibgrenze stattfinden. Sechs m/s<sup>2</sup> reichen völlig aus, denn die vernichtete Energie bleibt annähernd gleich. Wichtig ist, anschließend sofort wieder voll zu beschleunigen. Dieses Spielchen kann man so lange betreiben, bis die Bremse überhitzt. Bei keinem Fahrzeug reicht die Abkühlzeit während der Beschleunigung aus, um einen stabilen Zustand zwischen Antrieb und Bremsen herzustellen. Das Bremsversagen kündigt sich an durch ein immer weiches Pedalgefühl und immer höhere Pedalkräfte.

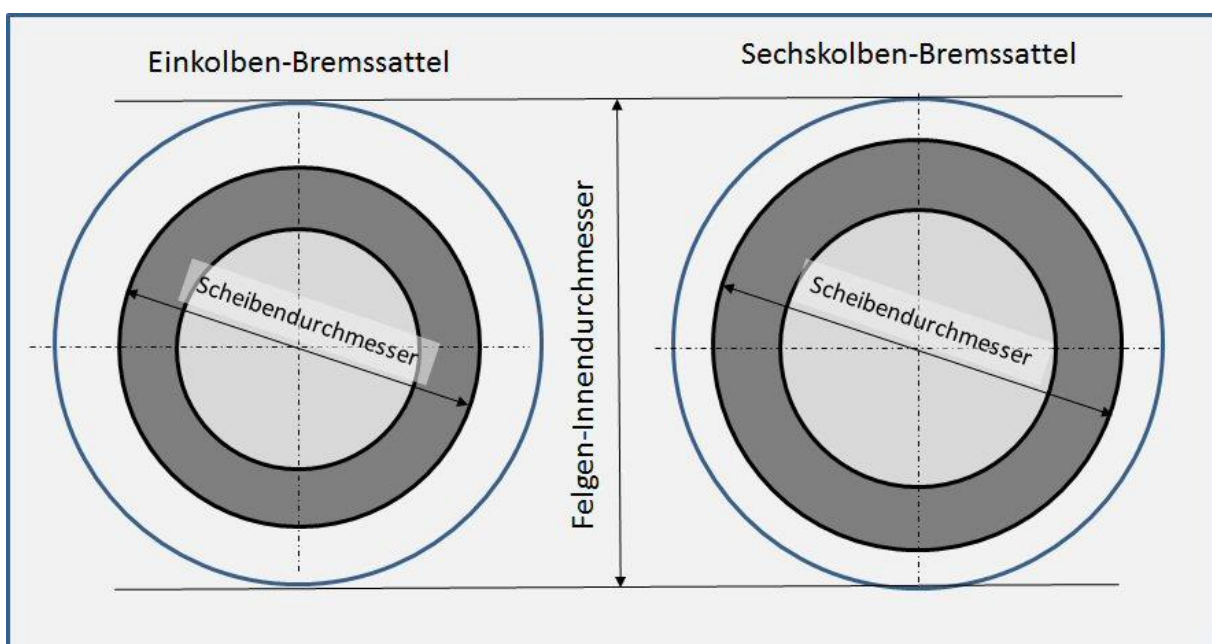
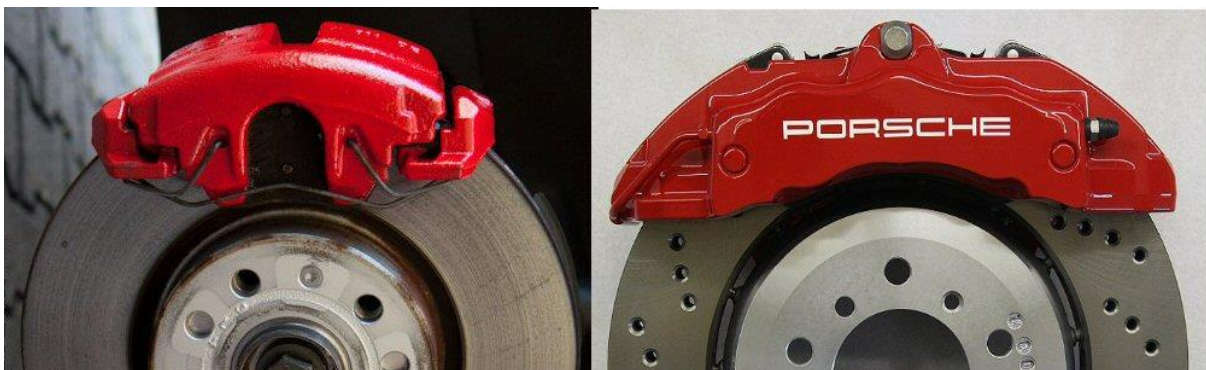
Wieso ist der Antrieb der Bremse derart überlegen? Es liegt an der effizienteren Kühlung. Die Antriebsaggregate, egal ob Benziner, Diesel oder mittels Elektronen, besitzen eine effiziente Wasserkühlung, mit einer leistungsfähigen Umlaufpumpe und einem riesigen Kühler an der günstigsten Stelle im Fahrzeug. Davon können die Bremsen nur träumen. Sie verrichten ihre undankbare Arbeit in-

nerhalb der Felgen, wo sie allem ausgesetzt sind, was die Umwelt anbietet. Nur mit üppiger Kühlluft hapert es.

Die Antwort der Techniker auf diese Herausforderung lautet: Riesige Bremscheiben. Sie müssen im Durchmesser den vorhandenen Bauraum möglichst gut ausfüllen, und zudem möglichst dick sein. Dass Bremscheiben aus Grauguss bei diesen Bedingungen nicht besonders leicht sein können leuchtet ein.

Scheibendurchmesser und Scheibendicke bestimmen wie gesagt die Standfestigkeit der Bremse bei Extrembelastung. Die Masse der Scheibe ist zuständig für die aufnehmbare Wärmemenge, die Oberfläche für die Wärmeabgabe. Aus diesen Zusammenhängen resultiert das Streben nach möglichst großem Außendurchmesser. Oberfläche und Masse der Bremscheibe steigen im Quadrat des Durchmessers. Da kommt der Trend zu immer größeren Reifen- und Felgendurchmessern wie gerufen.

Was aber ist der Grund für den Einsatz von sündhaft teuren Mehrkolbenbremsansätzen als Ersatz für den Einkolbenbremsansatz? Eine wichtige Größe von Bremsansätzen ist die Steifigkeit. Der Ansatz soll sich bei Belastung möglichst wenig verformen. Maßgeblich für die Steifigkeit ist die Brücke zwischen den beiden Ansatzhälften. Eine kurze Brücke wie bei einem Einkolbenbremsansatz muss durch entsprechende Brückenhöhe ausgeglichen werden. Die Brücke eines Sechskolbenbremsansatzes ist deutlich länger; entsprechend dünner ist sie dimensioniert. Dazu kommt noch die Formsteifigkeit durch den längeren Bogen.



Bei identischer Felge ist die Bremsscheibenfläche beim 6-Kolbensattel erheblich größer. Sie kühlt schneller und effizienter ab.

### **Bremskraftverteilung**

Bremsen hassen Frontantrieb, SUVs und Dieselmotoren. Am gefürchtetsten ist die nicht ganz seltene Dreier-Kombination. Der Grund ist die hohe Vorderachslast (schwere Dieselmotoren), eine hohe dynamische Achslastverlagerung durch hohen Schwerpunkt (SUV), und eine ungünstige Lage der vorderen Bremsscheibe weit außen in der Felge (Frontantrieb-spezifisch). Es kommt also einiges zusammen, was den vorderen Bremsen das Leben sehr schwer macht. Die Bremsen hinten fristen, von Ausnahmen abgesehen, ein beschauliches Dasein.

Im Zeitalter der elektronischen Fahrstabilitätsregler kann man die hinteren Bremsen deutlich kräftiger dimensionieren, um die vorderen zu entlasten. Früher musste man bei Bremsungen in der Kurve immer gewärtig sein, von der eigenen Hinterachse überholt zu werden. Mit den damaligen Mitteln wäre eine ungefährliche Bremsenauslegung bei SUVs mit Frontantrieb und Dieselmotoren gar nicht mehr möglich.

Verschiedentlich klagen Automobiltester über schwächelnde Bremsen bei diversen Fahrzeugen. Beispiel Audi TT RS Coupé. Obwohl kein SUV sondern ein Sportcoupé, kommen auch bei ihm einige ungünstige Umstände zusammen. Die Motorlage vor der Vorderachse, eine Piëchsche Erbkrankheit, daraus resultierend eine hohe Vorderachslast, und daraus zwangsweise folgend ein relativ kurzer Radstand. Das alles müsste die vordere Bremse eigentlich wegstecken ohne zu murren. Was sie leider nicht tut.

Am anderen Ende der Gewichtsverteilungs-Skala befindet sich der Porsche 911er. Er schleppt den Motor sozusagen hinter sich her, hinter der Hinterachse nämlich. Bei ihm haben die vorderen Bremsen kein Problem, die hinteren dagegen schon. Die Auslegung der hinteren Bremsen ist eine knifflige Angelegenheit, denn wenn die Hinterachse bei Porsche-üblichen hohen Verzögerungen überbremst, kann kein Fahrer der Welt sie wieder einfangen. Ist sie zu schwach dimensioniert, kostet es Bremsweg. Die Ingenieure bei Porsche können einem leidtun.

Wäre nicht der Cayman mit seinem Mittelmotor der bessere Porsche? Zweifelsohne, Porsche duldet aber keine Konkurrenz im eigenen Hause zum heiligen 911er, und verpasste prompt dem Cayman eine Vierzylindermotörchen. Schönen Gruß vom Käfer.

Stichwort Mittelmotor. Seriöse Sportwagen besitzen selbstverständlich Mittelmotor vor der Hinterachse und eine Gewichtsverteilung von 40/60 vorne/hinten. In Verbindung mit langem Radstand und niedrigem Schwerpunkt ideale Voraussetzungen für die Bremsen.

### **Bremsenkühlung**

Die effiziente Kühlung der Bremsscheiben ist eine Wissenschaft für sich. An der Karosserie außen herrscht eine hohe Windgeschwindigkeit und dadurch Unterdruck. Die Kühlluft muss deshalb von innen nach außen durch die Felge geleitet werden, mit Hilfe ausgeklügelter Luftleitungen. Hilfreich sind Felgen mit großen Öffnungen, wie z.B. Alufelgen, weil sie den Luftstrom nur wenig behindern.

## Bremsscheiben aus Carbon

Dass Carbonscheiben auch nicht mehr können als optimal verzögern wurde schon angesprochen. Worin liegt dann der Witz dieses Materials? Natürlich im Gewicht. Bremsscheiben aus Grauguss sind irre schwer, ihre Pendanten aus Carbon im Verhältnis federleicht. Oben wurde behauptet, die Masse sei ein wichtiges Kriterium für die Energieaufnahme. Das stimmt nach wie vor. Wie aber geht die Carbonscheibe mit der Energie um? Simple Antwort: Sie strahlt die Wärme ab. Und das hat sie auch bitter nötig, denn Kohlenstoff ist bekanntlich brennbar. Rotglühend wie die Grauguss-scheiben bei Extrembelastung kann und darf sie nicht werden, sonst kann man sie nur noch als Grillkohle verwenden. Deshalb sollte man nach einer Vollbremsung aus höchster Geschwindigkeit auch nicht gleich stehen bleiben, sondern der Bremse noch ein paar Minuten Abkühlzeit bei verhaltener Fahrweise gönnen.

Das ist aber beileibe nicht die einzige Besonderheit der Carbonbremsen. Die thermische Belastung der umliegenden Bauteile steigt durch die Strahlungswärme enorm an: Bremsschläuche, Gummilager usw. müssen besonders geschützt oder durch Metallbauteile ersetzt werden. Dem Fahrkomfort sind Metalllager in der Radaufhängung nicht gerade zuträglich. Außerdem „funktionieren“ die Carbonbremsen nur in einem ganz bestimmten, ziemlich hoch liegenden Temperaturfenster. Nur dann liegt der Reibwert der Bremsbeläge auf dem hohen Niveau, das man von diesen Bremsen erwartet.

Auf der Rennstrecke sind diese Eigenheiten kein Thema. Wer aber daneben auch noch im normalen Straßenverkehr unterwegs sein will, sollte sich den Kauf von Carbonbremsen gut überlegen. Die Vorteile wiegen die Nachteile keinesfalls auf. Denn die Auswirkung der ungefederten Massen auf das Fahrverhalten wird stark überschätzt. Und die paar Kilo Gewichts-minderung sind durch mehrere tausend Euro teuer erkaufte. Sie bedeuten beim Renneinsatz vielleicht das eine oder andere Zehntel in der Rundenzeit. Aber sogar da gibt es meistens effizientere Möglichkeiten, sein Geld in Gewichts-minderung zu investieren.

Alles in Allem kein Plädoyer für Carbon.

## Radnabenmotoren

In regelmäßigen Abständen tauchen sie immer wieder auf wie das Phantom der Oper: Die elektrischen Radnabenmotoren.



Das Beispiel von Michelin kann seine Ähnlichkeit mit dem oft zitierten Multifunktionshaustier nicht verleugnen. Gut gemeint, aber eindeutig des Guten zu viel.

Die Idee eines Radnabenmotors als solche hat ja etwas Bestechendes: Den Motor dahin zu setzen, wo er direkt auf das Rad wirkt, ohne zusätzliche Elemente, die Gewicht, Reibung und Kosten verursachen. Es gibt dabei nur ein klitzekleines Problem. Wohin mit der Bremsenergie?

Die Hoffnung der Fangemeinde speist sich aus der Überlegung, dass eine Elektromaschine beides kann, sowohl Antreiben als auch Bremsen. Separate, verschleißbehaftete Radbremsen werden überflüssig, Quietschgeräusche aus der Bremse gehören der Vergangenheit an.

So schön es klingt, die Sache hat einen Pferdefuß, und zwar einen gewaltigen. Wie wir oben gesehen haben, beträgt die Leistung der Radbremse bei einer Vollbremsung ein Vielfaches der Antriebsleistung. Nun könnte man hergehen, und die Radnabenmotoren so leistungsfähig auslegen, dass sie eine Vollbremsung ermöglichen. Dazu muss man sie aber gehörig überdimensionieren. Die höhere Leistungsfähigkeit führt im Gegenzug zu einer besseren Beschleunigung, was den Energieumsatz erhöht. Dann kann man zwar eine Vollbremsung durchführen, aber nur aus niedriger Geschwindigkeit, und auch das nur ein einziges Mal. Man muss berücksichtigen, dass die Elektromotoren durch das Antreiben bereits thermisch vorbelastet sind. Kommt dann noch die Bremsenergie dazu, wird es sehr schnell ungemütlich. Bevor also das Kupfer auf die Straße tropft, die Energiehalbleiter in der Steuer Elektronik durchbrennen, und die Bremse komplett versagt, muss eine Regelung das Temperaturniveau und den Energieeintrag in das Fahrzeug beschränken.

Das geeignete Biotop für ein derartiges Fahrzeug ist der stadtnahe Bereich, selbst die Landstraße ist schon problematisch. Auf der Autobahn kann man bestenfalls in der Lastwagenkolonne mitschwimmen. Das erinnert ein wenig an die Leistungsreduzierung von Motorrädern, um in eine günstigere Schadensklasse zu kommen. Motoren mit 70 PS und mehr wurden auf 27 PS gedrosselt, was eine recht eigenwillige Charakteristik ergab. Das Fahren bereitete überhaupt kein Vergnügen. Das sollte jedoch kein Argument gegen reine Stadtfahrzeuge sein, bei denen der Fahrspaß nicht im Vordergrund steht. Andere Anwendungsfälle wären noch Gabelstapler und diverse Arbeitstiere, die mit niedrigen Geschwindigkeiten unterwegs sind, z.B. Paketwägelchen für Hermes oder DHL.

Oder vielleicht ein Supersportwagen wie der Lamborghini Terzo Millennio?



In Zusammenarbeit mit dem Massachusetts Institute of Technology, kurz MIT, entsteht die Vision eines Supersportwagens mit allerhand futuristischen Merkmalen. Unter anderem mit vier Radnabenmotoren, die den Wagen für das dritte Jahrtausend laut Lamborghini „zu neuen Spitzenleistungen treiben sollen, die in dieser Kombination bis heute bei Elektrofahrzeugen unbekannt sind“. Anscheinend gelten die physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht für das legendäre MIT. Aber Lamborghini hat für genügend zeitlichen Puffer gesorgt, schon allein durch die Namensgebung. Bis das dritte Jahrtausend über unsere Nachkommen hereinbricht, ist der Elektroantrieb schon längst Ge-

schichte, und elektrische Radnabenmotoren tauchen höchstens in Archiven als technische Kuriosität auf. Zum Schmunzeln über die Technikgläubigkeit in den goldenen Jahren der hemmungslosen Energieverschwendung.

### **Zusammenfassung**

Alle Anforderungen an die Bremssysteme moderner Fahrzeuge aufzuzählen und zu erläutern würde Bücher füllen. Vieles von dem was heute selbstverständlich ist, wurde in vielen Mannjahren an Weiterentwicklung und Optimierung mühsam erarbeitet. Spektakuläre Neuerungen sind auf der Bremse Seite nicht mehr zu erwarten. Der Markt wird sich zukünftig noch mehr in zwei Lager aufteilen. Zum einen in den Billigsektor, für den alles bereits einbaufertig in den Regalen liegt. Zum anderen in das Hochpreissegment, für dessen Klientel die Ausstattung nicht edel und teuer genug sein kann. Aber auch hier sind die Spielräume durch die Physik begrenzt. Bremsscheiben aus Carbon bleiben den „Rennpferden“ vorbehalten, Radnabenmotoren den „Ackergäulen“. Es sei denn, der Gesetzgeber überrascht uns mit drastischen Tempolimits und Fahrverboten, die eine völlig andere Mobilitätskultur fördern. So, wie sie beispielsweise Audi mit dem Urban Concept im Jahre 2011 vorstellte.



Das ist so weit von den heutigen Automobilen entfernt, da kommt es auf Radnabenantrieb auch nicht mehr an.

**Jacob Jacobson**