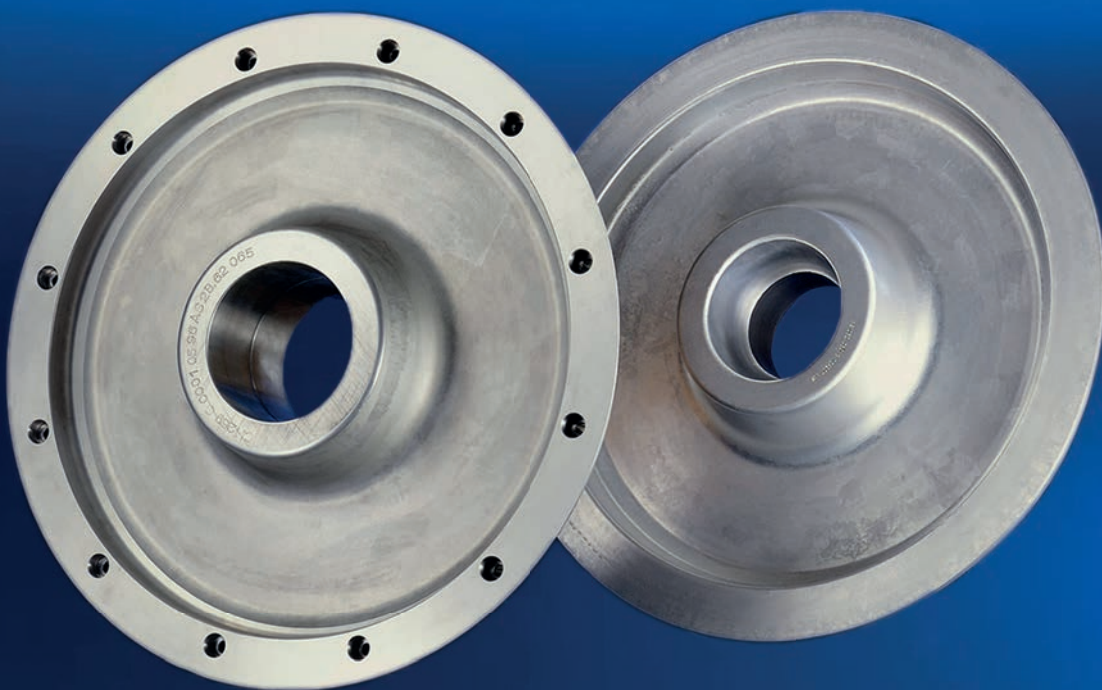


Technische Information

Aluminium-Radscheiben für
den Schienenverkehr



OTTO FUCHS KG
Geschmiedete Perfektion

Aluminium-Radscheiben für den Schienenverkehr

In Zeiten stetig ansteigender Energiekosten gewinnt die Reduzierung des Leergewichtes der Fahrzeuge auch im Schienenfahrzeugbau immer mehr an Bedeutung. Daher bekommt auch in diesem Bereich der Einsatz des Werkstoffes Aluminium einen immer höheren Stellenwert. Zum Beispiel wird der Wagenkasten bereits seit vielen Jahren häufig in Vollaluminium mittels Integralbauweise hergestellt. Vorteile dieser Bauweise ist die Gewichtsreduzierung, einhergehend mit der Minimierung der Bauzeit und zum Teil auch der Kosten.

Im Drehgestellbereich dominiert hingegen noch der Einsatz von Stahl. Auch hier lassen sich zahlreiche Bauteile identifizieren, die grundsätzlich für eine Ausführung in Aluminium geeignet sind. Die Verringerung der Drehgestellmasse, und dabei vor allem der ungefederten Massen, bewirkt jedoch nicht nur eine Einsparung von Antriebsenergie sondern hat auch einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und die Belastung der Schienen [1].

In der letzten Zeit sind in der Bahnindustrie verstärkt Bemühungen erkennbar, auch im Drehgestellbereich durch den Einsatz geschmiedeter Aluminiumbauteile das Leergewicht von Schienenfahrzeugen zu reduzieren. Die dabei umgesetzten Lösungen erfordern zum Teil aufwändig herzustellende Komponenten, die in mehrstufigen Schmiedeprozessen aus Freiform- und Gesenkschmiedoperationen in die gewünschte Form gebracht werden. Beispiele sind hier Drehgestellanlenkungen, Federunterlagen oder Kupplungsteile.



Aluminium Schmiedeteile für den Drehgestellbau

OTTO FUCHS stellt sich als kompetenter Partner, mit seiner über 80jährigen Erfahrung in der Entwicklung und Herstellung von hochwertigen und sicherheitsrelevanten Aluminium-Schmiedestücken, an die Seite seiner Kunden aus der Luft- und Raumfahrtindustrie, dem Automobil- und Nutzfahrzeugbau aber auch dem Schienenfahrzeugbau.

Geschmiedete Aluminium-Schienenräder



Schmiederohling einer Aluminium-Radscheibe

Unter schmiedetechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten stellt die Aluminium-Radscheibe die interessanteste Möglichkeit zur Realisierung einer Gewichtseinsparung dar, weil die rotationssymmetrische Kontur eines Rades eine rationelle und somit kostengünstige Fertigung durch einstufiges Pressen erlaubt. Im Vergleich zu anderen bisher realisierten Anwendungen ergibt sich für diese Radscheibe die günstigste Relation von Mehrkosten zu Mindergewicht. Diese Gewichtsverringerung wirkt vor allem deutlich in Richtung einer Einsparung von Antriebsenergie [2].

Schließlich haben sich geschmiedete Aluminium-Räder aufgrund dieser Vorteile im Pkw-Bau, der Nutzfahrzeugindustrie und selbstverständlich im Flugzeugbau bereits seit Jahrzehnten durchgesetzt.

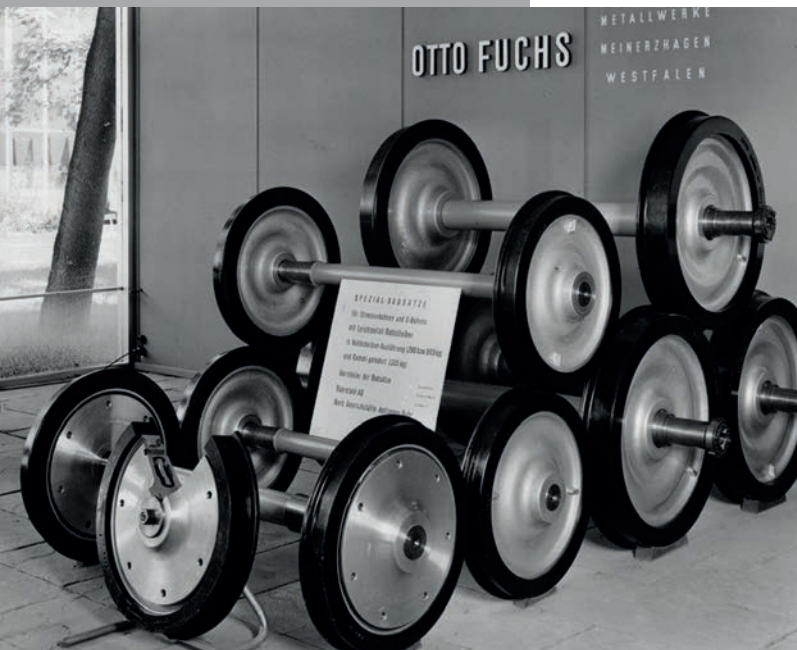
Weitere Vorteile von geschmiedeten Aluminium-Schienenrädern:

- 1) Die Verringerung der ungefederten Massen bewirkt eine Verbesserung des Fahrkomforts sowie eine Verringerung von dynamischen Radialbeanspruchungen des Fahrzeugs beim Überfahren von Hindernissen auf der Schiene [1].
- 2) Die aufgrund des niedrigeren Elastizitätsmoduls ($\frac{1}{3}$ des Stahls) höhere Nachgiebigkeit der Aluminiumradscheibe fördert den Abbau stoßartiger Beanspruchungen [1]. Es ist aus den gleichen Gründen auch mit einer Verminderung des Reifenverschleißes sowie der Riffel- und Unrundheitsbildung zu rechnen.
- 3) Der niedrigere Elastizitätsmodul des Aluminiums führt im Scheiben/Reifen-Schrumpfverband zu einer vollkommen andersartigen Verteilung der Schrumpfspannungen, die durch ein deutlich niedrigeres Spannungsniveau im Radreifen gekennzeichnet ist. Vor allem bei abgefahrenen Reifen ergibt sich so ein geringeres Bruchrisiko für den Reifen. Eventuell wird dadurch auch das Betriebsgrenzmaß günstig beeinflusst. Ein zusätzlicher Effekt ist die Verminderung des Fahrgeräusches verglichen mit gleichwertigen Stahlkonstruktionen [1, 2, 3, 6].

Das Aluminium-Schienenrad ist, aufgrund der im Vergleich zum Stahl geringeren Härte und Verschleißbeständigkeit, eine zweiteiligen Radkonstruktion - bestehend aus einer Aluminium-Radscheibe und einem darauf aufgezogenen herkömmlichen Stahlradreifen. Der Stahlreifen übernimmt in diesem System die komplexen Beanspruchungen im Radaufstandspunkt (Hertz'sche Pressung, Reibungswärme, Verschleiß). Die Radscheibe dagegen wird einer rein mechanischen Belastung aus statischer Vorspannung infolge der Schrumpfverbindungen Welle/Nabe bzw. Scheibe/Reifen sowie den dynamischen Beanspruchungen aus Radlast und Querkräften ausgesetzt.

Aufbauend auf diesem Konstruktionsprinzip unterscheidet man zwischen einer ungefederten Variante - starre Konstruktion aus Scheibe und unmittelbar darauf geschrumpftem Radreifen - und einer gummigefederten Variante.

Konstruktionsprinzip von Aluminium-Rädern



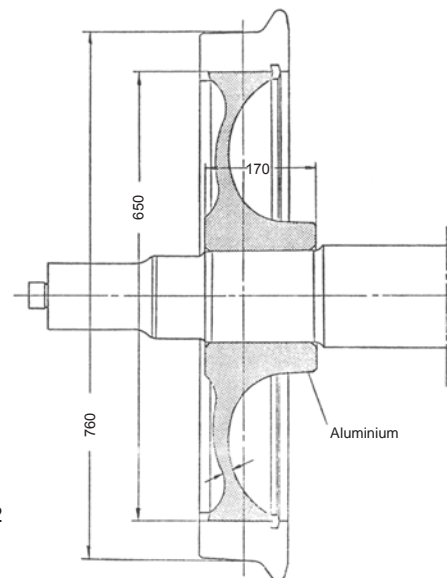
Radsätze mit Aluminium-Radscheiben unterschiedlicher Bauart

Grundkonzeption:

Aufgrund der geringen Härte und der Verschleißeigenschaften des Aluminiums müssen die Funktionen der Radscheibe mit Nabe einerseits und die der Lauffläche andererseits konstruktiv getrennt und von unterschiedlichen Werkstoffen übernommen werden. Für die komplexe Beanspruchung der Lauffläche haben sich überwiegend perlitische Stähle bestens bewährt. Daraus resultiert als Grundkonzept ein bereiftes Rad. Für die konstruktive Gestaltung bereifter Aluminium-Schieneräder bestehen zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten.

Das ungefederte Rad:

Es besteht aus einer Aluminium-Radscheibe, auf die ein Stahlradreifen unmittelbar aufgeschumpft wird. Diese Lösung stellt den kostengünstigsten Weg zu einer Gewichtseinsparung dar und bietet sich als Ersatz für Stahl-Monoblockräder oder bereifte Stahlräder an - zum Beispiel bei S-Bahnen, Bergbahnen etc.. Untersuchungen bei der Hamburger Hochbahn an Rädern mit 860 mm Laufkreisdurchmesser ergaben ein Mindergewicht von 80 kg gegenüber einem gleichartigen Stahlrad [3]. Prototypen eines Versuchsrades (LK 920 mm), die Gegenstand eines von der EU geförderten Forschungsvorhabens waren, weisen einen Gewichtsvorteil von 75 kg gegenüber einem geschmiedeten Monoblockrad aus Stahl auf [6]. Zusammengefasst liegt die Gewichtseinsparung bezogen auf die Radscheibe bei ca. 40 - 50%.



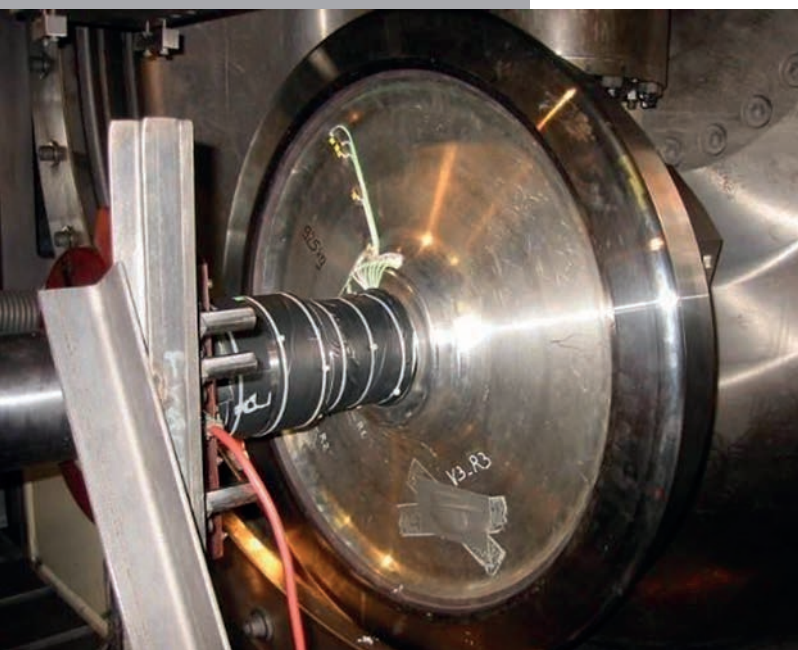
Ungefedertes Rad des ET 212 der Köln-Bonner Eisenbahn

Vermessung in mm

Das gummigefederte Rad:

Zwischen Radscheibe und Reifen befindet sich eine Gummi-Zwischenlage. Die Hauptanwendungsbereiche liegen im Nahverkehr und im Regionalverkehr. Aus preislicher Sicht dürfte der Einsatz gummigefederter Räder mit Aluminium-Radscheiben nur dort in Frage kommen, wo ansonsten bereits gleichartige Stahlkonstruktionen eingesetzt werden. Untersuchungen für verschiedene Anwendungszwecke haben einen Gewichtsvorteil von zum Beispiel 59 kg pro Rad bei U-Bahn-Rädern [3] und von 100 kg pro Rad bei Anwendungen im Vollbahnbereich bei einem Laufkreisdurchmesser von 920 mm ergeben [5].

Schrumpfverbindung Reifen-Radscheibe



Aluminium-Stahl-Verbundrad auf einem zweiaxialen Räderprüfstand

Beim ungefederten Rad wird ein herkömmlicher Radreifen auf eine Radscheibe aufgeschumpft. Für die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Schrumpfverbindung sowie für die Betriebsfestigkeit der Radscheibe ist die richtige Abstimmung des Schrumpfübermaßes von ausschlaggebender Bedeutung. Der geringere Elastizitätsmodul des Aluminiums führt bei vergleichbarer Radscheibenkonstruktion mit Stahlscheiben zu größeren Werten für das Schrumpfübermaß. Eine pauschale Angabe eines geeigneten Schrumpfübermaßes kann nicht erfolgen, da diese zusätzlich auch von der konstruktiven Nachgiebigkeit der Radscheibe abhängt. Ein zu hohes Schrumpfübermaß kann zu unzulässig hohen Vorspannungen der Radscheibe führen, die, mit der Betriebsbeanspruchung überlagert, die Betriebsfestigkeit beeinträchtigen kann. Ein zu geringes Schrumpfübermaß gefährdet dagegen einen sicheren Sitz des Radreifens.

In diesem Zusammenhang ist es als einen weiteren Vorteil des Aluminiumrades anzusehen, dass die größere Nachgiebigkeit des Aluminiums eine höhere Sicherheit gegen Vorspannkraftverluste infolge von Setzerscheinungen in der Schrumpffuge oder eines Aufwalzens des Radreifens bewirkt.

Bei der Ausführung eines bereiften Rades mit Aluminium-Scheibe als gummi-federte Version entfällt der Schrumpfverband. Gegenüber einer reinen Stahlkonstruktion ergeben sich in dieser Hinsicht keine Unterschiede, da die Elastizitätskonstanten von Aluminium und Stahl gegenüber denen des Gummis vernachlässigt werden können.

Bei der Ausführung eines bereiften Rades mit Aluminium-Scheibe als gummi-federte Version entfällt der Schrumpfverband. Gegenüber einer reinen Stahlkonstruktion ergeben sich in dieser Hinsicht keine Unterschiede, da die Elastizitätskonstanten von Aluminium und Stahl gegenüber denen des Gummis vernachlässigt werden können.

Pressverband

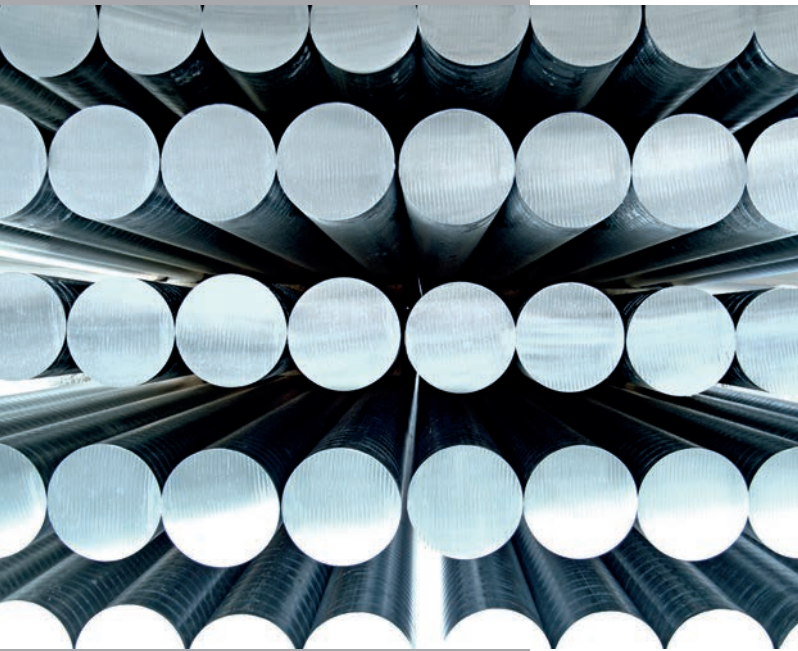
Für die Bemessung der erforderlichen Presssitzübermaße gelten sinngemäß die Überlegungen wie für den Reifen-Radscheiben-Schrumpfverband. Der tendenziell stärker vorhandenen Neigung des Aluminiums zum Fresen auf der Stahlachswelle während des Auf- oder Abpressens kann durch eine entsprechende Beschichtung der Achswelle oder der Nabenbohrung sowie der Verwendung von Ölabpressbohrungen in der Radscheibe begegnet werden.

Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Stahl kommt es bei klimatischen oder betriebsbedingten Temperaturänderungen des Pressverbandes zwar zu Veränderungen des Presssitzübermaßes. Aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls des Aluminiums sind die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Vorspannung des Pressverbandes jedoch ebenfalls gering und gefährden die Sicherheit des Verbandes nicht, wie entsprechende Betriebsversuche gezeigt haben [3,4].

Ein Vorteil eines Aluminium-Stahl-Pressverbandes gegenüber einer gleichwertigen Stahlkonstruktion besteht in der Verminderung der Kantenpressung, die eine ungünstige Wirkung auf die Dauerfestigkeit der Welle entfaltet [6].

Im Zuge der zunehmenden Verbreitung von Niederflur-Fahrzeugkonzepten im Bereich des ÖPNV werden auch verstärkt Losradsätze eingesetzt. In diesen Fällen entfällt der Wellen-Naben-Pressverband zugunsten einer Wälzkörperlagerung.

Angewandte Werkstoffe



Aluminium-Schmiedevormaterial

Als idealer Radscheibenwerkstoff hat sich die Legierung EN AW 6082 T6 in Hunderten von Radscheiben als auch in Millionen von Pkw-Räder und Sicherheitsbauteilen für den Fahrwerksbereich über viele Jahre bewährt. Neben den guten mechanischen Eigenschaften (Tabelle 1) und der ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit lässt sich dieser Werkstoff schmiedetechnisch problemlos verarbeiten. Die lange Lebensdauer einer Radscheibe erfordert neben der Betriebsfestigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung auch eine ausgesprochene Korrosionsbeständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen, Streusalzen und anderen Zuschlagstoffen, die aus einer entsprechenden Industrie- oder Innenstadatmosphäre heraus auf die Radoberfläche einwirken. Trotz der dem Stahl deutlich überlegenen Korrosionsbeständigkeit ist ein Korrosionsschutzanstrich vorzusehen, der insbesondere gegen die bei der Fahrzeugpflege und -wartung häufig verwendeten sehr aggressiven Reinigungsmittel resistent ist [zum Beispiel 4].

| Zustand | Streckgrenze | Zugfestigkeit | Bruchdehnung | Brinellhärte |
|---------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| T6 | >260 | >310 | >10 | >90 |

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte der Legierung EN AW 6082 T6

Neben den statischen Festigkeitskennwerten hat die OTTO FUCHS KG umfangreiche Erfahrungen mit der Dimensionierung dynamisch beanspruchter Bauteile, so dass auch eine Dimensionierung der Radscheibe auf fundierten Kenntnissen der dynamischen Werkstoffeigenschaften erfolgen kann.

Zur weiteren Gewichtsoptimierung von Aluminium-Schmiedeteilen stehen außerdem die OTTO FUCHS Werkstoffe AS28 und AS29 (EN AW 6110 A) zur Verfügung. Sie bieten neben gesteigerter Festigkeit, auch eine der Legierung EN AW 6082 T6 gleichwertige Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Diese Werkstoffe sind gleichfalls in Hunderttausenden von Bauteilen im Fahrwerksbereich von Kraftfahrzeugen im Einsatz und haben sich dort bestens bewährt. Die charakteristischen mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 2 aufgeführt.

| Zustand | Streckgrenze | Zugfestigkeit | Bruchdehnung | Brinellhärte |
|---------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| T6 | 330-380 | 360-410 | >6 | 110 |

Tabelle 2: Werkstoffkennwerte der Legierung EN AW 6110 A

Wie diese Tabelle zeigt, erreicht der Aluminium-Werkstoff EN AW 6110 A in der für die Dimensionierung ausschlaggebenden Streckgrenze durchaus die Werte gebräuchlicher Radscheibenwerkstoffe (C1-C3 nach UIC 812).

Anwendungsbeispiele



Aluminium-Stahl-Radsatz der
Köln-Bonner Eisenbahn

In der Vergangenheit sind bereits unterschiedlichste Anwendungen von Aluminium-Schienenrädern realisiert worden, von denen einige auch heute noch in Betrieb sind. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Betriebssicherheit von Aluminium-Radscheiben mit der von Stahlscheiben gleichzusetzen ist, wenn bei der Konstruktion des Rades die spezifischen Eigenschaften des Aluminiums berücksichtigt werden.

Die Schweizer Bundesbahn hat für die Personenwagen der Brünigbahn Radscheiben aus EN AW 6082 T6 eingesetzt und seit 1944 in Betrieb. Die Höchstgeschwindigkeit dieser Bahn beträgt 75 km/h bei einer Spurweite von 1.000 mm und einer Radlast von 40 kN. OTTO FUCHS hat seinerzeit die Radscheiben für ca. 500 solcher Räder hergestellt. Die einzelnen Radscheiben wogen 37,2 kg und erbrachten gegenüber einer Stahlkonstruktion eine Gewichtseinsparung von ca. 60 kg pro Rad. Der Stahlradreifen wurde auch bei dieser Konstruktion unmittelbar auf die Radscheibe mit einem Untermaß von 1,2 mm aufgeschumpft und wird dort-routinemäßigen mit Stahlreifen neu bereift.

Die Köln-Bonner Eisenbahn nahm 1960 den Probetrieb mit OTTO FUCHS Radscheiben aus Aluminium auf und rüstete neu konzipierte Serienfahrzeuge ($V_{\max} = 120$ km/h, Achslast 100 kN, Fahrleistung 120.000 km/p. a.) mit Radscheiben der Legierung EN AW 6082 T6 auf. Das Rad war eine zweiteilige Konstruktion, in der ein herkömmlicher Radreifen unmittelbar auf die Aluminium-Radscheibe aufgeschumpft wurde. Nach einer Gestaltoptimierung der Bauteile sowie einer Anpassung der Schumpfmaße an die Erfordernisse des Aluminiums erreichten die Räder Laufleistungen von 360.000 km ohne jede Beanstandung [2].

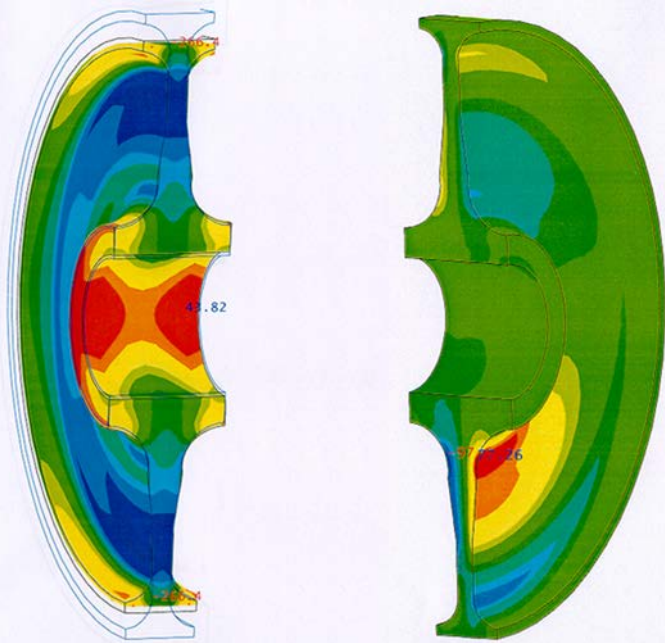
Die Chicago Transit Authority, Illinois, setzt seit 1965 auf mehr als 150 Fahrzeugen stahlbereifte Schienenräder mit Aluminium-Radscheiben ein. Studien aus dem Jahre 1975 beweisen eine Laufleistungen von mehr als 660.000 km ohne jede Beanstandung der Radscheiben.

Besondere Erwähnungen verdienen außerdem die Untersuchungen der Hamburger Hochbahn AG aus den 1970er Jahren. Treibsätze mit Aluminium-Radscheiben von OTTO FUCHS haben dort innerhalb von 10 Jahren Laufleistungen von ca. 1 Million km ohne Beanstandung absolviert [3,4].

Die jüngsten Bestrebungen zum Einsatz von geschmiedeten Aluminium-Radscheiben datieren aus Mitte der 1990er Jahre. Hier hat OTTO FUCHS in Zusammenarbeit mit zwei verschiedenen Radsatzherstellern gummigefederte Räder für den Einsatz im Hochgeschwindigkeitsverkehr entwickelt, die alle geforderten Prüfungen bestanden und die Zulassung zum Versuchsbetrieb erhalten hatten. Im Zuge der Substitution gummigefederter Räder durch Monoblockräder im Hochgeschwindigkeitsverkehr der Deutschen Bahn wurde ein Serieneinsatz leider nicht realisiert, obwohl mit diesen Rädern eine Gewichtseinsparung von 200 kg je Radsatz erzielt werden konnte [5].

Im gleichen Zeitraum wurden auch einige Anwendungen ähnlicher OTTO FUCHS Radkonzepte in Nahverkehrsfahrzeugen, zum Beispiel an Straßenbahnen in Den Haag, realisiert.

Einsatz- und Entwicklungsmöglichkeiten



FEM-Analyse einer Aluminium-Radscheibe

Radscheiben aus Aluminium können vor allem dort eingesetzt werden, wo eine Gewichtseinsparung dringend gefordert und der anfallende Mehraufwand für den Aluminiumeinsetz über eine entsprechende Kosten-Nutzen-Relation gerechtfertigt ist. Diese Kosten-Nutzen-Relation kann sich aus detaillierten Life-Cycle-Cost Analysen ebenso ergeben wie aus der Einhaltung von festen Gewichtsvorgaben, die über die Einsetzbarkeit eines bestimmten Produktes entscheiden oder die mit einer entsprechenden Pönalisierung versehen sind. LCC - basierte Kosten-Nutzen-Rechnungen gehen heute je nach Anwendungsfall von einem Kostenvorteil von € 20,00 bis € 50,00 je eingespartem Kilogramm Leergewicht aus. Auf dieser Grundlage lassen sich zahlreiche Anwendungen von Aluminium-Schmiedeteilen wirtschaftlich darstellen.

Ein weiteres starkes Motiv könnten auch die günstigen Auswirkungen des Aluminiums auf die Schallemissionen sein, deren Verringerung in vielen Anwendungen eine hohe Priorität genießt. Sowohl in der Literatur als auch in von OTTO

FUCHS durchgeführten Untersuchungen finden sich Hinweise auf ein besseres NVH-Verhalten (Noise Vibration-Harshness) von Aluminium-Radscheiben im Vergleich zu solchen aus Stahl [7].

Hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit bestehen keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen Stahl- und Aluminium-Radscheiben, insbesondere wenn bei der Dimensionierung der Bauteile zeitgemäße Berechnungsverfahren und Hilfsmittel, zum Beispiel FEM-Berechnungen, Verwendung finden. Die sehr gute, das heißt glatte und nicht von Zundereindrücken beeinträchtigte Oberfläche von Aluminium-Schmiedestücken begünstigt zudem die betriebssichere Auslegung dynamisch beanspruchter Bauteile. In jedem Fall erfordert der Leichtbau, unabhängig davon ob in Stahl oder Aluminium, eine detaillierte Kenntnis der zu erwartenden Betriebsbeanspruchungen.

Fazit:

OTTO FUCHS hat zahlreiche Entwicklungen von Aluminium-Radscheiben als Hersteller der Schmiedeteile mit begleitet und das Know-how für die Auswahl und Verarbeitung der erforderlichen Werkstoffe eingebracht. Unter den heutigen Anforderungen des Nah- und Hochgeschwindigkeitsverkehrs und dem zunehmenden Zwang zur Gewichtseinsparung erscheinen die Rahmenbedingungen für die Entwicklung geschmiedeter Aluminiumräder denkbar günstig.

Literatur:

- [1] Kötschke, Radscheiben für Schienenfahrzeuge aus Leichtmetall, Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge 15 (1970), Nr. 6, S. 214
- [2] A. Schieb, Erfahrungen mit Aluminium-Radscheiben bei der Köln-Bonner Eisenbahn KBE, Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge 15 (1971), Nr. 1 S. 19
- [3] H. Burarcic, U-Bahn-Versuche über das Zusammenwirken von Rad und Schiene über hinsichtliche Geräuschentwicklung, Laufverhalten, Stoßübertragung, Reibung, Abnutzung und Wellenbildung; Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge 17 (1973), Nr. 5/6, S. 119 ff.
- [4] H. König, Die gepressten Aluminium-Scheibenradkörper der Treibradsätze des Triebwagens DT3 der Hamburger Hochbahn, Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge 17 (1973), Nr. 5/6, S. 133
- [5] T. Gerlach, J. Villmann, B. Velten, Leichtbau als Herausforderung für den Schienenverkehr, Der Eisenbahningenieur Nr. 3/98, S.72 ff.
- [6] Hiperwheel – High Performance Railroad Wheelset, EU-Forschungsvorhaben im Rahmenprogramm Sustainable Growth, Contract Nr. G3RD-CT_200-00244
- [7] F.G. de Beer, M.H.A. Janssens; Comparison of the noise emission of a composite aluminium-steel wheel and a reference wheel; TNO Report TPD-HAG-RPT – 970027; TNO Institute of Applied Physics, 1997, Delft, Netherlands

