

Baumaschinen

Laderraupe CAT 983 B in 1:8

TRUCKmodell-Sonderheft Baumaschinen • TRUCKmodell-Sonderheft Baumaschinen • TRUCKmodell-Sonderheft Baumaschinen •



Raupenkran Liebherr HS 853HD in 1:14,5



Kettenbagger Liebherr 934 in 1:8



Antriebskonzept für einen Radlader



CAT-Deltalader aus einem Bruder-Modell

Antriebskonzept

Tobias Braeker

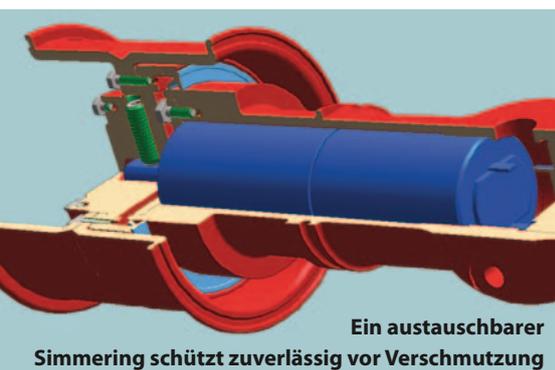
Bevor ich einen Gedanken auf das Antriebskonzept meines Radladers L25 von Orenstein & Koppel aus dem Jahr 1976 verwendete, wurden der Maßstab und somit die Baugröße definiert. Der ausführliche Bericht „Konstruktionsprinzipien“ in der Zeitschrift „CNC im Modellbau 1/2011“, ist dieser ersten grundlegenden Entscheidung gewidmet.



Eine schlanke Achse schmeichelt dem Auge



Ein robustes Design der Dichtungen verlangt der Alltagseinsatz



Ein austauschbarer Simmering schützt zuverlässig vor Verschmutzung

Anforderungskatalog

Allrad oder nicht Allrad das ist eigentlich nicht die Frage, denn die Antwort erscheint zu offensichtlich zu sein. Trotzdem ein paar Gedanken dazu: Beim Beladespiel eines Radladers erfährt die Vorderachse durch die Beladung der Schaufel immer mehr Belastung. Ihr obliegt damit die Hauptschubarbeit. Sie sollte auf jeden Fall angetrieben werden. Auf einem steilen Anstieg, wie zum Beispiel beim Verlassen einer Baugrube, wechselt das Gewicht auf die Hinterachse. In diesem Fall sollten die hinteren Räder einen Antrieb aufweisen.

Anforderung 1: Aus dieser kurzen Betrachtung wird ersichtlich, dass nur ein Allradantrieb zum Einsatz kommen kann.

Welche Eigenschaften soll mein L25 durch seinen Allradantrieb erlangen? Mein Kindheitstraum ist mit dem Radlader am Nordseestrand zu schaffen. Dort will ich einen Staudamm bauen, um einen Priel zu stauen. Ich stelle mir das genauso vor, wie ich damals mit Hand und Schaufel gegen die Strömung ankämpfte. Oder der L25 soll eine Strandburg am Flutsaum gegen die Gezeiten verteidigen.

Sand hat sehr bemerkenswerte Eigenschaften. Er kann knüppelhart sein, sodass man kaum vermag, mit der Schaufel in ihn einzudringen, oder butterweich, dass man gleich knöcheltief einsinkt. Hat gerade erst die Ebbe eingesetzt und der Strand ist noch mit Meerwasser in allen Poren versetzt, ergeben sich noch ganz andere Phänomene. Der Sand ist immer noch steinhart, doch bei leichten Bewegungen mit den Füßen verflüssigt er sich zunehmend und man sinkt unbarmherzig in ihn ein. Was ein lustiges Kinderexperiment ist, entpuppt sich für einen Radlader als echte Herausforderung. Die Schaufel muss mit ordentlich Nachdruck in den harten Sand hineingebohrt werden, während die Räder im sich verflüssigenden Sand untergehen.

Das Augenmerk richtet sich dabei natürlich vorerst auf das Können der Reifen. Dazu habe ich den Artikel „Walkende Reifen“ in der TRUCKMODELL 6/2011 verfasst. Die Wahl des passenden Antriebskonzepts hat hier jedoch tragende Bedeutung. Die Reifen dürfen nur so wenig Schlupf wie irgend möglich erzeugen. Nur so kann sicher vermieden werden, dass sich der Sand unter den Reifen verflüssigt und den Radlader versinken lässt. Die Geradeausfahrt ist hierbei logischerweise unkritisch, da alle Räder gleich schnell rotieren. Bei Kurvenfahrt legt das kurvenäußere Rad allerdings einen größeren Weg zurück, als das kurveninnere Rad, welches auf einem kleineren Kurvenradius

fährt. Somit ist die Drehzahl des kurvenäußeren Rades höher, als die des kurveninneren Rades.

Und wie verhält sich das im Stand? Bei konventionell gelenkten Fahrzeugen dreht der lenkende Reifen beim Einschlagen um seinen Auflagepunkt. Somit vollzieht er keine eigene Rotation in Achsrichtung und legt keinen Weg zurück. Die Räder eines Knicklenkers hingegen, laufen beim Einschlagen auf einer Kurvenbahn um den Drehpunkt und drehen sich um sich selbst. Dabei legen sie eine nennenswerte Strecke zurück. Das lässt sich bei meinem L25 wunderbar beobachten. Im Stand drehen sich die kurvenäußeren Räder voneinander weg und die kurveninneren Räder aufeinander zu. Sie drehen sich also gegensinnig.

Anforderung 2: Das Antriebskonzept muss also individuell in Richtung und Drehzahl drehende Räder zulassen.



für einen Radlader

Drehen ein oder mehr Räder durch, müssen die verbleibenden Reifen mit Bodenkontakt, den fehlenden Vorschub übernehmen.

Anforderung 3: Es muss dementsprechend jedes Rad mit der Fähigkeit ausgerüstet sein, dass es zu jeder Zeit und unabhängig vom Betriebszustand der anderen Räder, das volle Drehmoment übertragen kann.

Neben diesen drei grundlegenden Anforderungen ergeben sich noch folgende Erwartungen an das Antriebskonzept:

Ein Radlader ist anwendungsbedingt unentwengt am Vor- und Zurückfahren. Für ein schönes, realistisches Fortbewegen meines L25 lege ich beim Antriebskonzept Wert auf ein möglichst spielfreies und ruckfreies Reversieren.

Des Weiteren genieße ich die flüsterleise, souveräne Fortbewegung meines L25. Lästige





Unterschiedliche Drehrichtung der Räder beim Wendemanöver im Stand

Geräusche von lauten Getrieben dürfen auf gar keinen Fall auftreten. Auch wenn die sensationelle Soundakustik meines L25 die störenden Getriebegeräusche übertönen könnte.

Der L25 soll mir lange Freude bereiten. Das tut er im besonderen Maße, wenn ich ihn nicht nach jedem Einsatz sorgfältig pflegen muss. Auch häufige Reparaturen sind mir ein Graus. Wenn dann doch Mal ein Teil ausgetauscht werden muss, dann sollte es leicht erreichbar sein.

Bei all den ganzen Anforderungen bekommt das originalgetreue Aussehen noch einen Posten. Das Auge darf sich auch an dem Radlader ergötzen können.

Zusammenfassung der Anforderungen

1. Allradantrieb
2. individuelle Drehzahl der Räder
3. volles unabhängiges Drehmoment auf jedem Rad
4. ruckfreies Anfahren
5. möglichst spielfreies Reversieren
6. verschleißarm
7. geringe Pflegebedürftigkeit
8. wartungsfreundlich
9. wasserdicht
10. geringe Geräuscherzeugung
11. gefälliges Aussehen

Zur Erfüllung meiner Anforderungen werde ich zwei übliche Antriebsarten unter die Lupe nehmen: den Zentralmotor mit Differenzial und die Radnabenmotoren.

Zentralmotor mit Differenzial

Die technische Umsetzung könnte also, ähnlich dem Original, so aussehen: Wir folgen gedanklich dem Kraftfluss von einem zentralen Motor zu einem Verteilergetriebe. Dieses reduziert die Drehzahl des Motors und bedient Vorder- und Hinterachse. Ein Blick auf die Besonderheiten des Knickgelenkes, also der Lenkung eines Radladers, erklärt, warum hier auf ein Längsdifferenzial verzich-

tet werden kann. Das Knickgelenk ist exakt in der Mitte zwischen den beiden Achsen positioniert. Folglich folgen die Hinterräder beim Lenken genau der Spur der Vorderräder. Die Drehzahl von Vorder- und Hinterachse ist somit identisch.

Mit Kardanwellen wird die Leistung weiter an die Achsen übertragen und das Knickgelenk überwunden. Nun, an den Achsen angekommen, ist hier ein Differenzial von Nöten, um die Drehzahldifferenz zwischen Kurveninnen- und -außen auszugleichen.

Weiter geht es mit Wellen zu den Radnaben. Bis hierhin wollen wir kleine, zierliche Antriebs Elemente verwenden, die nur wenig Belastung erfahren. Dazu nutzen wir den physikalischen Hintergrund, dass die Leistung gleich Drehzahl mal Drehmoment $P=M \times n$ ist. Die Leistung bleibt im kompletten Antriebsstrang konstant (abgesehen von den Reibungsverlusten). So wird deutlich, dass hohe Drehzahlen das Drehmoment reduzieren. Deswegen wird meist erst dort, wo ein hohes Drehmoment erforderlich ist, die Drehzahl gewandelt. So wird erst in den Naben über ein weiteres Getriebe, dem sogenannten Vorgelege, das Drehmoment gesteigert. Aufgrund der Baugröße wird vorzugsweise ein Planetengetriebe eingesetzt. Dieses Vorgelege wird auch häufig Außenplanetengetriebe genannt. Nun endlich darf sich die Leistung der Maschine in satte Fortbewegung entfalten.

Doch erfüllt diese technische Umsetzung eines Antriebskonzeptes meine Anforderungen?

Zur Überprüfung der Funktionalität für die Anforderung 2 und 3 mache ich mir diese Gedanken: Die Geradeausfahrt wird tadellos funktionieren. Auch die Kurven werden mit Hilfe der Querdifferenziale in den Achsen gemeistert. Die Welt wäre in Ordnung, wäre da nicht eine kleine aber gemeine Eigenschaft eines mechanischen Differenziales. Dreht nämlich ein Rad durch, überträgt das benach-

barte achsengleiche Rad, kein Drehmoment. Es bleibt einfach stehen. Somit ist die ganze Achse vortriebslos. Dieses Phänomen ist bei dem Modell meines Modellbaukollegen häufig zu beobachten. Immer wenn sein Radlader einen ordentlichen Hügel schräg anfährt, ist Ende mit dem Spielspaß. Über die Diagonale hebt der Radlader je ein Rad, was beide Achsen gleichzeitig ausfallen lässt.

Die Differenziale müssen sich also sperren lassen. Nur so kann sich das Arbeitsgerät aus seiner misslichen Lage eigenständig befreien. Sind die Differenziale gesperrt, drehen sich zwangsläufig alle vier Räder synchron, auch bei Kurvenfahrt. Das bedeutet unweigerlich Schlupf bei Kurvenfahrt zwischen Rad und Untergrund. Was meinen Anforderungen nicht entspricht. Sind die Räder nun über Sperrdifferenziale gleichdrehend, muss die Lenkung die blockierten Räder herüberdrücken und zum Rutschen überzeugen. Hat die Lenkung nicht ausreichend Überzeugungskraft, bleibt der Radlader ungerührt geradeaus stehen. Schafft sie es doch sich durchzusetzen, so ist der Ausgang ungewiss. Ungewiss dahin gehend, dass sich der Radlader nicht präzise bewegt. Denn ist der Untergrund inhomogen, werden drei Räder rutschen und sich um dasjenige Rad bewegen, welches den größten Grip hat.

Dieses Verhalten setzt sich auch im Fahrverhalten fort. Der Radlader schiebt ständig mehr oder weniger kontrolliert über die Räder. Das ist in den meisten Fahrsituationen völlig unkritisch. Aber es gibt auch Unwegsamkeiten, bei denen der Fahrer es sehr schätzt, wenn die Reifen nicht rutschen. Dann liegt es am Fahrer, kontinuierlich und in weiser Voraussicht die Differenziale sinnvoll zu- und abzuschalten. Und dann gibt es noch kritische Gelegenheiten, bei denen man gerne ein gesperrtes Differenzial hätte, aber den Schlupf nicht wünscht. Das ist dann auch mit einer zuschaltbaren Differenzialsperre kaum zu meistern.

Eine große Anzahl von beweglichen Bauteilen im Antriebsstrang lässt Folgendes zu meinen Anforderungen 4-10 vermuten: Es wird schwer, alle Verschleißteile leicht austauschbar zu konstruieren. Das Gesamtspiel des Antriebsstranges wird groß sein. Viele Getriebe sind viele Geräuschquellen.

Fazit: Die technische Umsetzung ähnlich dem Original erfüllt nicht meine Anforderung.

Blick zum Großen

Warum wird beim Original auf ein Sperrdifferenzial verzichtet?

Mir ist es glücklicherweise vergönnt, einen 21-Tonnen-Radlader ausgiebig fahren zu dürfen. Mit ihm bin ich viele Fahrsituationen durchgegangen. Ich will nicht behaupten, dass ein Sperrdifferenzial in Original-Radladern keine Verwendung findet, da ich den kompletten Markt nicht überblicke. „Mein“ 21-Tonner hat

allerdings kein Sperrdifferenzial, so wie die meisten Original-Radlader.

Trotzdem interessiert mich, was wäre, wenn original Radlader Sperrdifferenziale hätten. Zur Simulation dieses Verhaltens blockiere ich im Stand alle vier Räder mit der Bremse, was in diesem Fall gesperrten Querdifferenzialen gleich kommt. Daraufhin lenke ich. Besser gesagt, ich versuche zu lenken. Dies wird durch ein klägliches Jammern der Hydraulik quittiert. Der Radlader bleibt ungerührt geradestehen. Fazit: Wenn sich 21 Tonnen im Untergrund verbissen haben, ist gutes Zureden bei blockierten Rädern nicht ausreichend. Man muss die Räder zum Ausgleichen der Drehbewegung freigeben, sonst schlägt der Radlader nicht ein. Das erklärt schon einmal, warum hier auf ein Sperrdifferenzial verzichtet wird.

Aber wie machen es nun die Großen? Wie überwinden sie die Hindernisse ihres täglichen Lebens ohne Sperrdifferenzial? Im harten Geländeeinsatz muss jedes Rad seinen Teil zur Traktion dazugeben. Da ist faules Ausruhen, nur weil das Nachbarrad gerade munter durchdreht nicht angesagt. Das wird häufig zum Beispiel durch Verwendung von Viskokupplungen, anstatt von Differenzialen erreicht. Diese Kupplungen haben die Eigenschaft, dass jedes Rad getrennt dreht und ständig Drehmoment überträgt. So kann ein Radlader auch diagonal die Beine heben, ohne einen Totalausfall der Traktion zu befürchten.

Radnabenmotoren

Dieses Fahrverhalten soll meinem O&K L25 auch innewohnen. Das Konzept ist trivial, wie genial. Und wie so häufig haben die technisch einfachen Lösungen einen gewissen Charme.

Jedes Rad erhält seinen eigenen Motor. Die Motoren sind in den Achsen positioniert und ragen in die Radnaben hinein. Deswegen werden sie auch als Radnabenmotoren bezeichnet.

Es ist leicht verständlich, dass sich jedes Rad mit seinem eigenen Motor nun in Drehzahl und Drehmoment unterscheiden kann.

Kürzer kann die Antriebskette nicht gestaltet werden. Dementsprechend gering ist das Spiel, was dem Wunsch eines ruckfreien Reversierens nachkommt. Auch die Instandhaltung bzw. Instandsetzung ist bei so geringer Bauteilanzahl sehr ökonomisch. Die Geräuschquellen sind minimiert. Jetzt hängen sie noch von der Qualität der auszuwählenden Getriebemotoren ab.

Von der elektrischen Seite gibt es grob gesagt zwei sinnvolle Varianten die Radnabenmotoren anzuschließen.

Serienschaltung

Die Motoren je Achse werden in Serie geschaltet. Hierbei gilt: Der Gesamt Widerstand wird gebildet aus der Summe der Einzelwiderstände $R_{ges} = R_1 + R_2$. Mit $U = R \times I$ bei einer Bordspannung von beispielsweise 12 V entfallen nur je 6 V auf einen Motor. Weit verfehlt, wenn man jetzt meint, einen 6-V-Motor verwenden zu können. Denn spannend wird die Betrachtung der Kurvenfahrt. Der Innenwiderstand bei Elektromotoren sinkt bei steigender Drehzahl und steigt bei fallender Drehzahl. Der Innenwiderstand ist also umgekehrt proportional zur Drehzahl. Das bedeutet, dass das schnellere kurvenäußere Rad dem Strom einen größeren Widerstand entgegenhält, als das langsamere kurveninnere Rad. Da in einer Reihenschaltung die Ströme gleich sind, $I_1 = I_2 = I_{ges}$, verlagert sich

die Bordspannung nun anders. Beim schneller drehenden Rad fällt die Spannung ab. Treibt man es auf die Spitze und blockiert ein Rad, während hingegen das Andere frei läuft, so bekommt der blockierte Motor die volle Bordspannung zu spüren, wenn der andere Motor im Freilauf ist. Denn der Widerstand des blockierten Motors fällt gegen null und der des freilaufenden Motors steigt gegen unendlich. So ist bei dieser Art von Schaltung zu beachten, dass man Motoren verwendet, die die gesamte Bordspannung ertragen können, also in diesem Beispiel 12 V.

Weiterführend will ich nun wissen, wie sich die Serienschaltung bei einem Radlader im Gelände verhält. Bleiben wir bei dem obigen Fallbeispiel mit einem blockierten und einem durchdrehenden Rad. Nach Betrachtung des Drehmoment-Stromdiagrammes wird deutlich, dass das Drehmoment eines Elektromotors direkt proportional zum Strom ist. Das durchdrehende Rad besitzt einen Innenwiderstand, der gegen unendlich strebt. Da der Strom in einer Reihenschaltung überall gleich ist, fließt durch die Stromblockade des durchdrehenden Rades auch kein Strom durch das blockierte Rad. Kein Strom ist gleichbedeutend mit keinem Drehmoment. Im Gelände wäre es also genauso bestellt, wie mit einer klassischen mechanischen Differenzialachse. Jetzt könnte man natürlich per Relais von Serien- auf Parallelschaltung umschalten, das scheint mir aber zu komplex. Eine Serienschaltung kann für mich daher keine Lösung darstellen.

Parallelschaltung

Das Radnabenmotorkonzept ist nun schon fast an der Serienschaltung gescheitert. Des-



Ein Paradoxon: Sand, knüppelhart für die Schaufel und doch butterweich für die Reifen



Ein präzises Rangieren ist hier von Nöten

wegen lohnt sich die genaue Betrachtung der Parallelschaltung.

Alle vier Motoren werden direkt über den Fahrtregler an die Bordspannung angeschlossen. Somit ist in einer Parallelschaltung $U_{ges} = U_1 = U_2$. Also muss auch hier der Motor für die volle Bordspannung ausgelegt sein. Jeder Motor kann auch hier seine individuelle Drehzahl einnehmen. Jetzt muss die Schaltung noch in der gewählten Extremsituation, ein Rad blockiert, ein Rad durchdrehend, punkten.

Das durchdrehende Rad dreht zwar auf volle Touren, verbraucht aber kaum Strom, da der Innenwiderstand des Motors gegen unendlich tendiert. Das ist gut so, denn so bricht die Akkuspannung nicht zusammen. Im Gegensatz zur Serienschaltung steht hier dem blockierten Rad die volle Leistung zur Verfügung. Das hat wiederum kaum Widerstand, was folglich zu einem hohen Strom führt. Da ein hoher Strom zu einem hohen Drehmoment führt, hat das blockierte Rad nun volles Drehmoment.

Jetzt kann das blockierte Rad wirklich den Radlader aus dem Dreck ziehen und das selbst, wenn drei Räder durchdrehen. Radnabenmotoren in Parallelschaltung führen somit in einfacher Weise zu meinem Ziel.

Entscheidung und Erfahrung

Nach Betrachtung der fahrtechnischen Vor- und Nachteile und dem Vergleich mit meiner Anforderungsliste fällt die Entscheidung für mich folgerichtig auf die Wahl von Radnabenmotoren.

Bei der Umsetzung des Originals in das Modell steht für mich die originalgetreue Abbildung der Funktionalität mit seinem Fahrverhalten im Vordergrund. Die exakte Abbildung und Anordnung aller technischen Details ist diesem Ziel untergeordnet. Und das, obwohl eine Realisierung von Zentralmotor mit Verteilergetriebe, Kardanwellen

mit Längenausgleich, Sperrdifferenzialen und Außenplanetengetrieben eine spannende Herausforderung ist.

Es spricht aus meiner Sicht natürlich auch nichts dagegen, besser zu sein, als das Original. Schließlich bewege ich mich mit einem Winzling in einer großen Welt mit all ihren Herausforderungen.

Da ich mittlerweile diese theoretischen Überlegungen in die Praxis gebracht habe, kann ich nur bestätigen, dass es sich genauso verhält, wie vorgedacht. Das Fahrverhalten ist großartig. Der L25 fährt souverän die engsten Kurven mit einer Präzision, die begeistert. Aus dem tiefsten Morast fräst er sich gekonnt heraus. Haarnadelkurven in Serpentinaugen nimmt er mit zwei gehobenen Rädern, ohne dabei die Kurve zu vergessen und zu schliddern. Ich bin sehr zufrieden.

Woran sich meine Augen allerdings gewöhnen mussten, ist, dass je nach Fahrsituation Räder durchdrehen, während andere stehen bleiben. Die stehenden Räder erzeugen, wie erläutert, dabei den größten Vorschub, auch wenn es nicht ersichtlich ist. Bei gesperrten Differenzialen mit Zentralmotor dreht nie ein Rad durch, solange eines noch Halt hat. Das ist anders. Aber eben nur eine optische Gewöhnungssache zugunsten von kontinuierlichem, präzisen und kraftvollen Vorschub. Mit den Radnabenmotoren ist das Ziel erreicht. Mehr Informationen zu meinem O&K L25 finden Sie auf meiner Internetseite www.tobias-braeker.de. In beeindruckenden Videos stellt sich dort das Fahrverhalten dem kritischen Auge.

Motorwahl

Bevor es ans Konstruieren der Achsen geht, muss ich mich nun in Abstimmung mit meinem Anforderungskatalog für die Antriebsmotoren des L25 entscheiden. Radnabenmotoren finden häufig Anwendung im Modellbau und es gibt reichlich Referenzen. Von daher sollte

es eigentlich keine Schwierigkeiten bereiten, eine entsprechende Motorauswahl zu treffen.

• RB 35

Sehr häufig kommen RB 35-Getriebemotoren zum Einsatz. Diese Motoren zeichnen sich durch ihre Robustheit und ihre günstigen Anschaffungskosten aus. Der Außendurchmesser beträgt, wie der Name es erwarten lässt, 35 mm. Auch Beschaffungsprobleme und Lieferzeiten sind hier nicht zu erwarten. Die Anschaffungskosten sind bei meiner Anwendung nicht irrelevant. Handelt es sich immer gleich um vier Stück.

Den RB 35 sind Stirnradgetriebe angeflanscht, die in verschiedenen Getriebeübersetzungen erhältlich sind. Die Zahnräder sind geradzahnt. Das lässt eine entsprechende Geräuscherzeugung erahnen.

Stirnradgetrieben ist eigen, dass immer ein konstruktiv notwendiger Versatz zwischen Eingangs- und Ausgangswelle besteht. Bei mehrstufigen Stirnradgetrieben kann auch die Ausgangswelle mittig sein. Dies ist aber selten und trifft man beim RB 35 nicht an. Der Wellenausgang ist beim RB 35 exzentrisch. Das führt zu dem Vorteil, dass man eine größere Bodenfreiheit gewinnt, wenn man die Abtriebswelle in der Fahrzeugachse nach unten dreht.

Da RB 35 relativ lang sind müssen sie häufig noch in die Radnaben und Felgen hineinragen, um die Breite des Modells zu erhalten. Durch die Exzentrizität und den großen Außendurchmesser der RB 35 müsste ich nun den originalen Felgendurchmesser aufgeben und größer gestalten. Der L25 bekäme quasi Niederquerschnittreifen. Da Reifen maßgeblich an der Optik eines Radladers beteiligt sind, behagt mir dieser Gedanke gar nicht.

Durch die Exzentrizität sitzen nun die Fahrzeugachsen, in der die Motoren integriert sind, außermittig zu den Reifen. Das erinnert an den Unimog mit seinen Portalachsen.

Der Durchmesser der Abtriebswelle beträgt 6 mm, was meinen Anforderungen genügt. Gelagert ist sie in einem ungedichteten Gleitlager. Technische Daten zur Belastbarkeit der Abtriebswelle finde ich keine.

Meine Entscheidung: Ein RB 35 wird es nicht. Er entspricht nicht meinen Ansprüchen an Akustik, Optik und Haltbarkeit.

• Brushless Motor

Mittlerweile haben auch bürstenlose Motoren in der Truckmodell-Antriebstechnik Einzug gehalten. Bürstenlose Motoren zeichnen sich durch ein schlechtes Anlaufverhalten aus. Das ist genau das Gegenteil, worauf ich besonders Wert lege. Ein Radlader im Beladebetrieb muss ständig Anfahren und Reversieren. Kompensieren kann man das mangelhafte Anfahrverhalten durch eine sehr hohe Getriebeübersetzung, die den Motor drehmo-

mentseitig beim Anfahren entlastet und ihm den Start erleichtert. Eine große Übersetzung bedeutet mehr Geräusch und einen geringeren Wirkungsgrad. Somit wäre der Vorteil des guten Wirkungsgrades, den ein bürstenloser Motor mit sich bringt, nicht mehr gegeben oder gar vernichtet.

Ein bürstenloser Motor ist ein Drehstrommotor und wird vom Fahrtregler mit einem Drehfeld gespeist. Das Drehfeld muss mit der Drehzahl des Motors übereinstimmen, sonst läuft der Motor nicht an. Da bei der Anwendung im L25 alle Motoren unterschiedliche Drehzahlen aufweisen, muss jedem Motor ein separater Fahrtregler zugeordnet werden. Das ist mir zu viel Aufwand.

• Glockenanker Motor

Außergewöhnliche Eigenschaften sind einem Glockenanker durch die besondere Bauart des Ankers in die Wiege gelegt. Seine Stärken liegen in dem hohen Drehmoment, dem großen Anfahrmoment, der schnellen Beschleunigung, dem geringen Außendurchmesser und dem leisen, schwingungsarmen Lauf.

Bis auf die schnelle Beschleunigung sind das Charakterzüge, die meinem L25 schmeicheln. Glockenankermotoren stehen dem Markt nicht allzu zahlreich zur Verfügung. Da kommt man an der Marke Faulhaber kaum vorbei, die sich auf dieses Gebiet spezialisiert hat. Sie bieten ebenso Planetengetriebe von höchster Präzision an. Faulhaber Motoren finden ihren Einsatz in der Automatisierungs- und Medizintechnik. 30.000 h Betriebsstunden sind dort keine Seltenheit. Über die Zuverlässigkeit und Qualität sollte ich mir keine Sorgen machen müssen. Das Beste ist, es gibt technische Daten. Mit diesen Zahlen, Daten und Fakten fällt mir

eine Auswahl leicht. Eine Planetengetriebe-kombination mit kugelgelagerter, gedichteter Abtriebswelle erfüllt meine Anforderung nach Wartungsfreundlichkeit. Die Abtriebswelle verfügt ebenfalls über einen Durchmesser von 6 mm. Das ist vollkommen ausreichend bei direkt angeflanschter Radnabe, die keine Biegemomente entstehen lässt.

Das gedichtete und vorgespannte Kugellager verspricht Wartungs- und Spielfreiheit. Seine Belastbarkeit wird mit bis zu 17 kg radial und 15 kg axial ausgewiesen. Auch das ist angemessen für das, was den L25 in seiner Laufbahn erwartet.

Das Präzisions-Planetengetriebe ist mit Stahlzahnradern ausgestattet. An störende Akustik verschwende ich keinen Gedanken, kenne ich die Qualität von Faulhaber hinreichend. Das Geräusch wird flüsternd leise sein. Der Vorteil eines Planetengetriebes ist unter anderem in meinem Fall, dass die Abtriebswelle zentrisch liegt, da nun Fahrzeugachsen und Räder miteinander fluchten.

Mit dem Außendurchmesser der Motorgetriebeeinheit von nur 22 mm behalte ich meinen maßstäblichen Felgendurchmesser und reichlich Gummi am Reifen bei. Im Vergleich zum RB 35 gewinne ich trotz seiner Exzentrizität leicht an Bodenfreiheit. Die Motoren passen wunderbar in eine schlanke Fahrzeugachse. Das führt zu einem gefälligen Gesamteindruck.

Die Glockenankermotoren zeichnen sich durch ein enormes Drehmoment aus und haben mit ihrer Edelmetallkommutierung einen Wirkungsgrad von bis zu 86%. Mit dem Wirkungsgrad von dem Getriebe von 70% erlange ich einen Gesamtwirkungsgrad mit $\eta_{ges} = \eta_{motor} \times \eta_{Getriebe}$ von 60%. Das dürfte von einem Brushless-Motor mit höherer Getriebe-

übersetzung schwerlich übertroffen werden. Wie wichtig die Betrachtung des Wirkungsgrades ist, zeigt sich daran, dass ein Radlader mit seinen vier Motoren kontinuierlich fährt. Mein O&K L25 hat so eine Fahrzeit von über einer Stunde.

• Entscheidung

Alle Argumente punkten für den Faulhaber, der mich technisch überzeugt. Schockiert bin ich allerdings von dem Preis. Die Motorgetriebeeinheit ist für mehr als das 14fache des RB 35 erhältlich, zuzüglich der 20%tigen Preiserhöhung, die sich Faulhaber dieses Jahr gönnt. Zurzeit besteht eine 8-wöchige Lieferzeit. Da mein vorrangiges Ziel jedoch herausragende Fahreigenschaften sind, gehe ich hier keine Kompromisse ein und entscheide mich für Glockenankermotoren.

Abdichten

So viel Wert in den Fahrzeugachsen sollte besonders geschützt sein. Die Kugellager der Planetengetriebe sind zwar schon gedichtet, doch will ich auf Nummer sicher gehen. Dazu konstruiere ich zusätzlich noch eine Wellendichtung ein, die ich leicht bei Beschädigung instand setzen kann. Der dazu verwendete handelsübliche Simmering in Industriequalität verhindert nun zuverlässig ein Eindringen von Feuchtigkeit und Schmutz.

Dichtungen leben vom geschmiert sein. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass mein abzudichtender Raum nicht voll Öl, wie bei Getrieben oder Hydraulikzylindern ist, bei denen der Leckölstrom automatisch die Dichtung feucht hält. Daher müssen sie für gelegentliche Wartung leicht zugänglich, aber nicht direkt dem Dreck ausgesetzt sein.



Im Salzwasser muss sich die Dichtung bewähren