Bremen, 26.04.2012

Aufbau und Inhalt der Diplomarbeit

Thema: "Untersuchungen zur Erweiterung des Anwendungsspektrums von Leichtbaumaßnahmen an Getrieben von Elektrofahrzeugen"

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse
Betreuender Mitarbeiter am IfaM: Dipl.-Ing. Robert Kuhfuss

Zweitprüfer: Prof. Dr. Frank Kirchner

Christoph Moje (moje@uni-bremen.de)

Aufbau und Inhalt der Diplomarbeit

Das nachfolgende Inhaltsverzeichnis entspricht vom Aufbau her dem der Diplomarbeit. Der Inhalt der einzelnen Kapitel wird anschließend erläutert. Aus der Diplomarbeit übernommene Textpassagen sind *kursiv* dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 1

1. Grundlagen und Stand der Technik / Maßnahmen zur Reduzierung von Masse 1

1.1 Eigengewichtsminimierung 2

1.1.1 Formleichtbau 2

1.1.2 Stoffleichtbau 4

1.2 Werkstoffe 4

1.3 Fertigungsverfahren 5

2. Komponenten eines Getriebes für Elektrofahrzeuge 5

2.1 Antriebskonzepte 6

2.2 Getriebeaufbau am Beispiel des Nissan LEAF 6

2.3 Getriebekomponenten 7

3. Leichtbaumaßnahmen an Getrieben von Elektrofahrzeugen 7

3.1 Mögliche Leichtbaumaßnahmen 8

3.1.1 Einsatz andere Verzahnungsarten 8

3.1.2 Verwendung von Aluminiumschrauben 8

3.1.3 Verschweißen der Gehäusehälften 8

3.1.4 Fertigung des Getriebegehäuses aus Mg-Druckguss 9

3.1.5 Eingangs- und Zwischenwelle als Hohlwelle darstellen 9

3.1.6 Verwendung eines Leichtbaudifferenzials ohne Differenzialkorb 9

3.1.7 Einsatz von gewichtsoptimierten Gangrädern 10

3.2 Bewertung der möglichen Leichtbaumaßnahmen 10

4. Ausblick 10

Einleitung

Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen und steigender Bevölkerung rückt das Thema Elektromobilität zunehmend in das öffentliche Interesse. Die Elektromobilität kann einen großen Beitrag zur Erhaltung von Ressourcen liefern. Durch die Bereitstellung von Energie aus regenerativen Energiequellen können Elektrofahrzeuge zudem emissionsfrei betrieben werden und den CO_2- Ausstoß reduzieren. Die Effizienz eines Elektrofahrzeuges ist zu einem großen Maße von dessen Masse abhängig. Eine niedrige Fahrzeugmasse wirkt sich vorteilhaft auf die Fahrdynamik, den Fahrkomfort und die Reichweite aus. Um wettbewerbsfähig zu sein ist daher das Bestreben notwendig ein Elektrofahrzeug so leicht zu gestalten, wie es unter wirtschaftlichen Aspekten vertretbar ist.

Durch den Einsatz eines Getriebes innerhalb des Antriebsstranges eines Elektrofahrzeuges kann ein kleiner, leichter und kostengünstiger Elektromotor mit niedrigem Drehmoment verwendet werden, der bei hohen Drehzahlen effizient betrieben werden kann.

Diese Arbeit zeigt Leichtbaumaßnahmen auf, die innerhalb des Getriebes eines Elektrofahrzeuges umgesetzt werden können, bewertet sie im Hinblick auf technische Machbarkeit und gibt eine Prognose in Bezug auf deren Wirtschaftlichkeit ab.

1. Grundlagen und Stand der Technik / Maßnahmen zur Reduzierung von Masse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen Kosten und Nutzen der Umsetzung einer Leichtbaumaßnahme. Denn denkbar sind viele Leichtbaumaßnahmen. Doch müssen sie auch wirtschaftlich vertretbar sein. Dazu werden Konzepte von AUDI und BMW zur Ermittlung der Leichtbaugrenzkosten (Wieviel €/kg Gewichtseinsparung darf die Umsetzung einer Leichtbaumaßnahme kosten) bei Verbrennungsfahrzeugen analysiert und auf deren Grundlage ein Modell zur Ermittlung der Leichtbaugrenzkosten bei Elektrofahrzeugen erarbeitet. Das Ergebnis dieses Modells ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Bei Betrachtung des Diagramms fällt auf, dass Leihtbaumaßnahmen deren Kosten im Bereich von 5€/kg liegen bereits rechnen, obwohl das Fahrzeug noch keine Strecke zurückgelegt hat. Grund hierfür ist folgende Betrachtungsweise. Eine Gewichtminimierung ist mit einer Erhöhung der Reichweite verbunden. Geht man davon aus, dass das Elektrofahrzeug eine konstante Reichweite beibehalten soll, so kann aufgrund der Gewichtsminimierung die Batterie kleiner gestaltet werden, was wiederum Gewichts- und Kostenvorteile zur Folge hat, da die Batterie verhältnismäßig schwer und teuer ist.

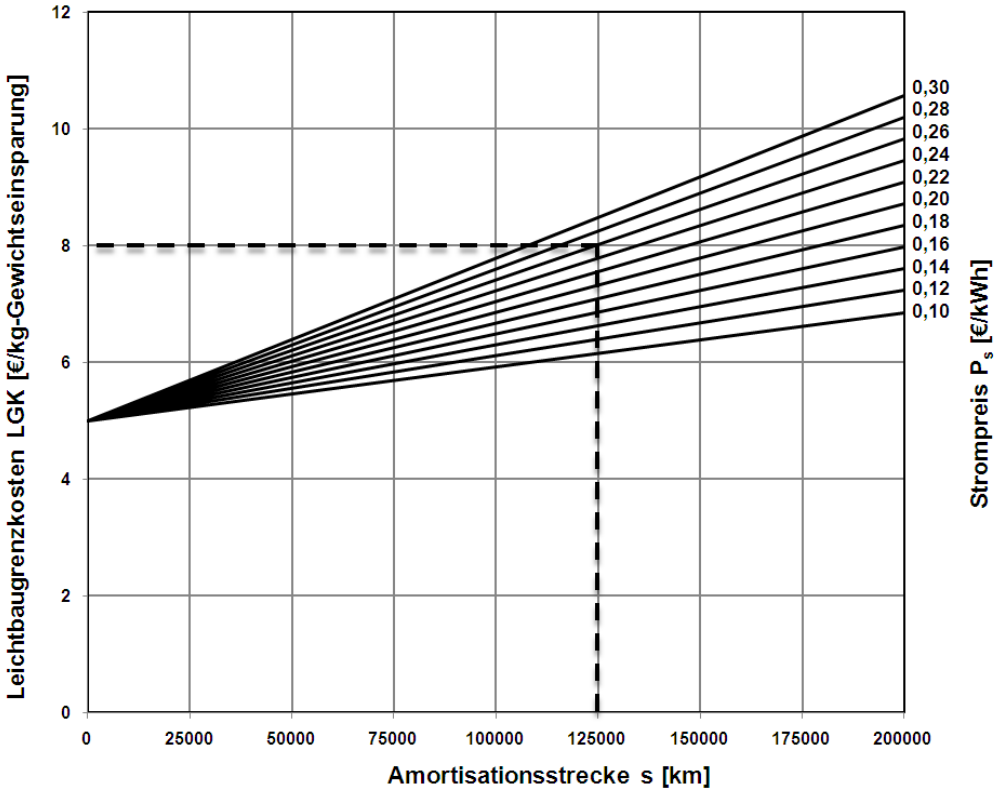

Abbildung 1-1 Leichtbaugrenzkosten eines E-Fahrzeuges bei konstanter Reichweite

1.1 Eigengewichtsminimierung

In diesem Unterkapitel wird untersucht auf welche Art und Weise das Gewicht eines Bauteils minimiert werden kann.

1.1.1 Formleichtbau

In diesem Abschnitt wird beschrieben wie ein Bauteil, durch eine auf die Belastung angepasste Form, leichter gestaltet werden kann. Als Bewertung für die Materialausnutzung dient hier der Artnutzgrad η_A. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis der von einem Volumen aufnehmbare Federungsarbeit zu der durch die Belastung tatsächlich aufgenommenen Federungsarbeit. Ist dieser Wert eins, so ist das Bauteil optimal ausgenutzt. Es sollte daher immer das Bestreben vorhanden sein das Bauteil so zu gestalten, dass dieser Wert nahezu eins beträgt.

Am Beispiel eines einseitig eingespannten Balkens , der auf Biegung belastet wird, wird diese Formoptimierung veranschaulicht (siehe Abbildung 1-2 bis Abbildung 1-4). Durch die so durchgeführte Formoptimierung können in diesem Beispiel über 70% Gewicht gespart werden.

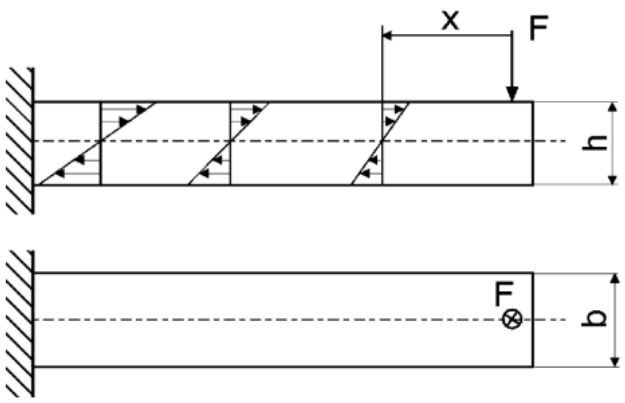

Abbildung 1-2: Ausgangsgeometrie

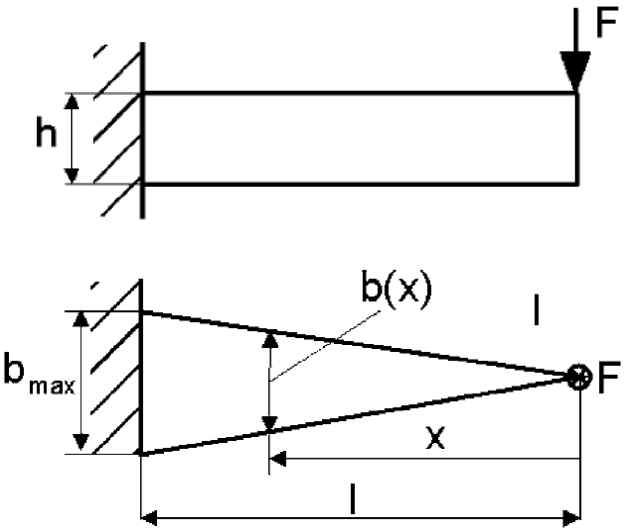

Abbildung 1-3: Profiloptimierung durch Dreiecksform

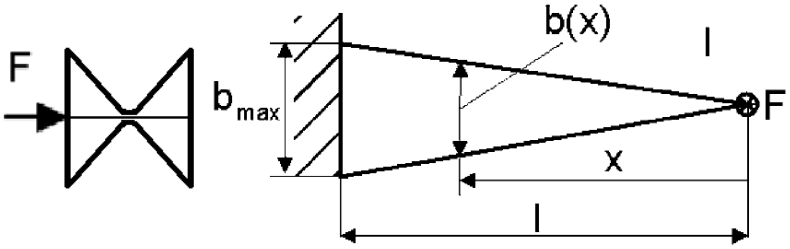

Abbildung 1-4: Weitere Profiloptimierung

1.1.2 Stoffleichtbau

Unter Stoffleichtbau versteht man das Konzept durch Werkstoffsubstitution spezifisch schwere Werkstoffe durch leichtere und festere zu ersetzen. Um die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen in Bezug auf ihr Gewicht zu beurteilen eignen sich spezifische Eigenschaften, welche auf die Dichte bezogen werden.

Darunter fallen:

- *Die spezifische Festigkeit / Reißlänge*

$$L_R = \frac{R_m}{g \cdot \varrho} \qquad \textbf{(1.1)}$$

mit der Zugfestigkeit R_m, der Gewichtskraft g und der Dichte ϱ beschreibt die Länge bei der ein Werkstoff mit konstanter Querschnittsfläche unter seinem Eigengewicht reißt. Sie ist daher ein Maß für die Werkstoffausnutzung bei reiner Zugbeanspruchung.

- *Die spezifische Steifigkeit / Dehnlänge*

$$L_D = \frac{E}{g \cdot \varrho} \qquad \textbf{(1.2)}$$

mit dem E-Modul, der Gewichtskraft g und der Dichte ϱ ist ein Maß für die elastische Verformbarkeit bei reiner Zugbeanspruchung. Je größer sie ist, desto steifer verhält sich der Werkstoff bei reiner Zugbelastung.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Eigenschaften von Leichtbauwerkstoffen beschrieben und anschließend ihre hier aufgeführten spezifischen Eigenschaften L_R und L_D miteinander verglichen.

1.2 Werkstoffe

Im Leichtbau ist es außerordentlich wichtig immer den richtigen Werkstoff für den entsprechenden Anwendungsfall zu wählen. Daher gilt es sich einen Überblick über die technologisch relevanten Werkstoffe zu verschaffen. Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über typische Leichtbauwerkstoffe, die denkbar für die Anwendung im Getriebe sind.

Es werden die Eigenschaften der Werkstoffe Stahl, Aluminium Magnesium und Titan ausführlich beschrieben und anschließend miteinander verglichen. Außerdem werden Superleichtlegierungen und deren Eigenschaften dargestellt.

1.3 Fertigungsverfahren

Die Herangehensweisen zur Eigengewichtsminimierung haben gezeigt, dass durch geeignete Werkstoffauswahl und Geometrie das Gewicht eines Bauteils reduziert werden kann. Die Geometrie eines Bauteils ist abhängig von dessen Fertigungsverfahren und nicht jeder Werkstoff lässt sich in jedem Fertigungsverfahren verarbeiten. Vor dem Hintergrund der Fertigung eines Bauteils für die Automobilindustrie ist es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wichtig ein Fertigungsverfahren einzusetzen, welches reproduzierbar ist und hohe Stückzahlen in kurzer Zeit ermöglicht. Desweiteren müssen vorgegebene Toleranzen eingehalten werden. Die Wahl des Fertigungsverfahrens hat einen großen Einfluss auf die Gestaltungsfreiheit und die Kosten eines Bauteils. Daher ist es für den Leichtbau von großer Bedeutung.

Nachfolgend werden Fertigungsverfahren beschrieben, die in der Automobilindustrie Anwendung finden und besonders im Bereich des Leichtbaus von großer Bedeutung sind.

Nachfolgend werden an dieser Stelle

- Druckgussverfahren
- Tailored Blanks
- Innenhochdruckumformen
- Verfahren zur Herstellung von Verzahnungen

beschrieben

2. Komponenten eines Getriebes für Elektrofahrzeuge

Die Komponenten des Getriebes eines Elektrofahrzeuges unterscheiden sich stark voneinander, je nachdem welches Antriebskonzept verwendet wird. Daher folgt in diesem Kapitel zunächst eine Übersicht der unterschiedlichen Antriebskonzepte.

Anschließend wird das Getriebe eines aktuellen Elektrofahrzeuges, welches in Serie produziert wird, genauer untersucht um dessen Aufbau zu veranschaulichen und herauszustellen welche Komponenten Bestandteil eines Getriebes reiner Elektrofahrzeuge sind. Dabei werden bereits umgesetzte Leichtbaumaßnahmen aufgezeigt. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Komponenten des Getriebes eines reinen Elektrofahrzeuges.

2.1 Antriebskonzepte

Für den Antrieb eines reinen Elektrofahrzeuges existieren unterschiedliche Antriebskonzepte. Je nachdem wie die Übertragung des Drehmomentes auf das Rad stattfindet sind unterschiedliche Getriebe, oder sogar keine Getriebe, im Antriebsstrang notwendig. Der überwiegende Teil der Elektrofahrzeuge wird auf einer Achse angetrieben. Nachfolgend werden daher die einzelnen Antriebskonzepte für den Antrieb einer Achse vorgestellt, deren Vor- und Nachteile erläutert und miteinander verglichen.

Nachfolgend werden an dieser Stelle drei Antriebskonzepte von Elektrofahrzeugen miteinander verglichen. Das Antriebskonzept, welches sich aus einem Motor und einem Getriebe zusammensetzt, stellt sich hierbei als das mit den meisten Vorteilen behaftete Antriebskonzept heraus. Des Weiteren ist es das Antriebskonzept welches in allen aktuell in Großserie produzierten Elektrofahrzeugen verwendet wird. Daher wird anschließend der Fokus auf die Art von Getrieben gelegt, welche in einem entsprechenden Antriebsstrang untergebracht sind.

2.2 Getriebeaufbau am Beispiel des Nissan LEAF

Dieses Kapitel hat das Ziel eine Übersicht über den Aufbau des Getriebes eines reinen Elektrofahrzeuges zu verschaffen. Neben dem hier vorgestellten eingängigen Getriebe existieren Bestrebungen auch zweigängige Getriebe in Elektrofahrzeugen zu verwenden um ein effizienteres Fahren zu ermöglichen. Diese befinden sich zur Zeit im Erprobungsstadium und haben keine Anwendung in aktuell erhältlichen Elektrofahrzeugen, welche in Großserie hergestellt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf eingängigen Getrieben. Der prinzipielle Aufbau dieser Art von Getrieben ist immer gleich: Es handelt sich hierbei um ein schrägverzahntes Stirnradgetriebe, welches zwei Übersetzungsstufen und einen festen Gang hat. Am Beispiel Nissan LEAF, wird dieser Getriebeaufbau veranschaulicht und bereits umgesetzte Leichtbaumaßnahmen aufgezeigt.

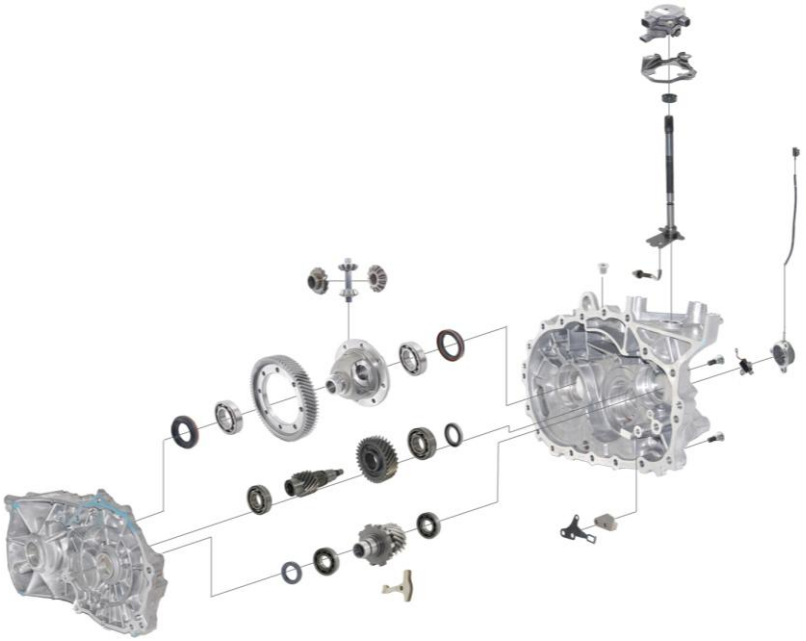

Abbildung 2-1: Getriebe Nissan LEAF [Quelle:A2MAC1]

Des Weiteren dient das Nissan LEAF-Getriebe bei nachfolgenden Berechnungen als Referenz.

2.3 Getriebekomponenten

Die Komponenten eines eingängigen Getriebes eines Elektrofahrzeuges lassen sich daher wie folgt zusammenfassen:

- *Getriebegehäuse (zwei Hälften)*
- *Dichtung (für die Getriebehälften)*
- *Eingangswelle*
- *Zwischenwelle*
- *Differenzial*
- *Gangräder (zwei je Übersetzung)*
- *Sechs Lager*
  - *Zwei auf der Eingangswelle*
  - *Zwei auf der Zwischenwelle*
  - *Zwei am Differenzial*
- *Parksperreneinrichtung*
  - *Klinkenrad*
  - *Klinke*
  - *Rückstellfeder*
  - *Mechanismus für die Klinkenbewegung*
- *Öl*
- *Entlüftung*
- *Schrauben für die Verbindung der Getriebehälften*
- *Radialwellendichtringe (mindestens drei)*
  - *Einer an der Eingangswelle*
  - *Zwei am Differenzialausgang*

3. Leichtbaumaßnahmen an Getrieben von Elektrofahrzeugen

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten aufgezeigt um die einzelnen Komponenten bzw. das Getriebe leichter zu gestalten. Die Vor- und Nachteile dieser Leichtbaumaßnahmen werden diskutiert und die Umsetzbarkeit bewertet. Der Wirtschaftlichkeit, vor dem Hintergrund einer Serienfertigung, wird dabei besondere Beachtung geschenkt.

3.1 Mögliche Leichtbaumaßnahmen

3.1.1 Einsatz andere Verzahnungsarten

Die Schrägverzahnung aktueller Getriebe von Elektrofahrzeugen erzeugt Axialkräfte, die von Lager, Getriebegehäuse und der Verschraubung der Getriebegehäusehälften getragen werden muss. Durch eine Verzahnung bei der keine Axialkräfte auftreten (Geradverzahnung) oder sie kompensiert werden (Doppelschräg- oder Pfeilverzahnung(siehe Abbildung 3-1)) ergeben sich weniger Kräfte, die von diesen Komponenten aufgenommen werden müssen, so dass sie kleiner dimensioniert werden können und sich Gewichtsvorteile ergeben. Der Einfluss der Geradverzahnung und der Doppelschräg- oder Pfeilverzahnung auf das Getriebe wird in diesem Kapitel untersucht und herausgearbeitet, ob sich Gewichtsvorteile ergeben und das Getriebe auf diese Art und Weise leichter gestaltet werden kann. Des Weiteren wird betrachtet ob diese Maßnahme auch fertigungstechnisch und wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden kann.

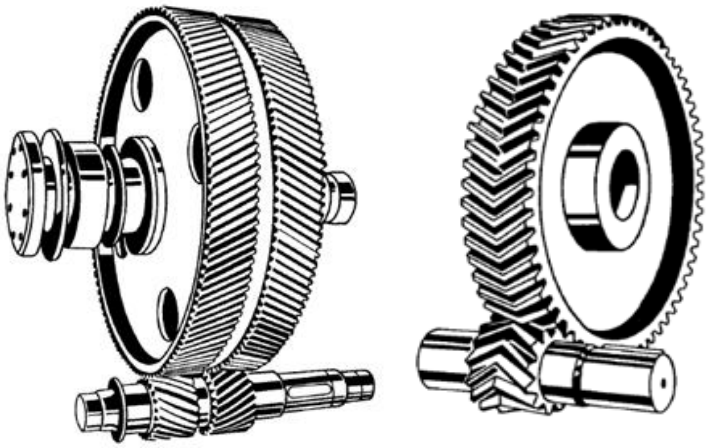

Abbildung 3-1: Doppelschräg- und Pfeilverzahnung [Quelle: Roloff/Matek]

3.1.2 Verwendung von Aluminiumschrauben

Aluminiumschrauben sind aufgrund ihrer geringeren Dichte, bei Schrauben gleicher Geometrie, ca. 65% leichter als Stahlschrauben. Es wird berechnet in welchem Maße sich durch den Einsatz von Aluminiumschrauben Gewichtsvorteile ergeben, welche weiteren Vor- und Nachteile zu erwarten sind und ob diese Leichtbaumaßnahme wirtschaftlich ist.

3.1.3 Verschweißen der Gehäusehälften

Getriebegehäuse werden so konstruiert, dass sie über die gesamte Lebensdauer nicht geöffnet werden müssen. Durch eine Verschweißung der Getriebegehäusehälften könnten Bearbeitungsschritte und Schrauben eingespart werden. Es wird untersucht, ob eine Verschweißung des Getriebegehäuses möglich ist.

3.1.4 Fertigung des Getriebegehäuses aus Mg-Druckguss

Getriebegehäuse von derzeit erhältlichen Elektrofahrzeugen werden aus Aluminiumdruckguss hergestellt. In der Getriebegehäusegestaltung für Verbrennungsmotoren lassen sich Beispiele finden, die zeigen, die zeigen, dass Magnesiumlegierungen als Werkstoff für Getriebegehäuse verwendet werden können. Dadurch ergeben sich Gewichtsvorteile von ca. 30 %. In diesem Abschnitt wird untersucht, ob ähnliche Ergebnisse auch an Getriebegehäuse von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen sind, welche Schwierigkeiten sich durch die Werkstoffsubstitution ergeben und ob diese Leichtbaumaßnahme wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden kann.

3.1.5 Eingangs- und Zwischenwelle als Hohlwelle darstellen

Wellen innerhalb eines Getriebes werden vorwiegend auf Biegung und Torsion belastet. Dadurch ergeben sich innerhalb der Welle Spannungsspitzen, die in den Randschichten ihr Maximum erreichen. Die inneren Schichten der Welle werden dadurch nur wenig beansprucht. Durch den Einsatz von Hohlwellen kann das Material besser ausgenutzt werden und es ergeben sich Gewichtsvorteile.

Es wird untersucht welche Vor- und Nachteile sich durch den Einsatz von Hohlwellen innerhalb des Getriebes ergeben, wie eine Hohlwelle sinnvoll gestaltet werden kann, mit welchen fertigungstechnischen Schwierigkeiten zu rechnen ist und ob der Einsatz wirtschaftlich zu rechtfertigen ist.

3.1.6 Verwendung eines Leichtbaudifferenzials ohne Differenzialkorb

Hintergrund dieser Leichtbaumaßnahme ist die Überlegung ein Differenzial zu verwenden, welches ohne einen Differenzialkorb auskommt, wodurch sich Vorteile im Hinblick auf Gewicht und Bauraum ergeben.

In der Industrie existieren zur Zeit mehrere Ansätze um ein Differenzial, durch den Verzicht auf den Differenzialkorb leichter zu gestalten. Die von Neumayer Tekfor (siehe Abbildung 3-2) und die von Schaeffler (siehe Abbildung 3-3) entwickelten Variante werden hier untersucht und miteinander verglichen. Auch hier werden die wirtschaftlichen Aspekte mitberücksichtigt.

Abbildung 3-2: Leichtbaudifferenzial von Neumayer Tekfor [Quelle:Neumayer Tekfor]

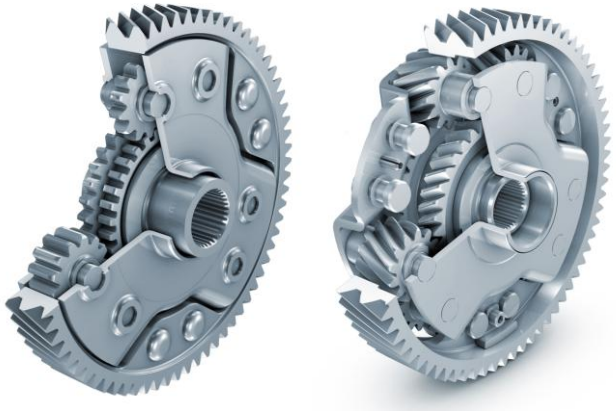

Abbildung 3-3: Leichtbaudifferenzial von Schaeffler [Quelle:Schaeffler]

3.1.7 Einsatz von gewichtsoptimierten Gangrädern

Hintergrund der Überlegung ist es den Steg von Zahnrädern, der zumeist über eine annähernd geschlossene Kontur verfügt, durch Strukturoptimierung mit Hohlräumen zu versehen, so dass sich Gewichtsvorteile ergeben. An dieser Stelle wird auf die Vorgehensweise der Strukturoptimierung eingegangen und es werden die Einsatzmöglichen aufgezeigt.

3.2 Bewertung der möglichen Leichtbaumaßnahmen

Zusammenfassend werden die einzelnen Maßnahmen in einer Übersicht dargestellt und abschließend bewertet. Des Weiteren wird aufgezeigt, welche Gewichtsvorteile sich durch die als sinnvoll erachteten Leichtbaumaßnahmen an einem Getriebe ergeben (Das Nissan LEAF-Getriebe dient an dieser Stelle als Referenz).

4. Ausblick