

RWTH Aachen University
Fakultät für Maschinenwesen

Institut für Kraftfahrzeuge
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Seminararbeit

Nicht-pneumatische Reifen

Ökobilanz für die Verwendung eines Tweels an einem Personenkraftwagen

vorgelegt von:

Maike Scholtes, Matrikel-Nummer: 308623

betreut von:

Dipl.-Wirt.-Ing. David Struck

Aachen, November 2015

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Reifen - Historische Betrachtung	3
3	Motivation	6
3.1	Energiefluss in einem Personenkraftwagen	6
3.2	Rollwiderstand	7
4	Twheel	8
4.1	Aufbau	8
4.2	Vorteile	9
5	Ökobilanz	10
5.1	Erstellung von Ökobilanzen	10
5.2	Vergleich pneumatischer Reifen vs. Twheel	11
5.2.1	Produktion/Entsorgung	11
5.2.2	Benutzungsphase	14
5.2.3	Twheel Stages	16
6	Zusammenfassung und Ausblick	19
7	Literaturverzeichnis	21

1 Einleitung

Verbrauchs- und Abgaswerte heutiger Personenkraftwagen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Um CO₂ Ziele, wie z.B. die durch die EU getroffene Regelung von maximal 95g CO₂ pro Kilometer bezogen auf die Fahrzeugflotte eines Herstellers bis 2020 zu erreichen, müssen deutliche Optimierungen vorgenommen werden.

Heutige Fahrzeugkonzepte für Personenkraftwagen nutzen ausschließlich pneumatische, d.h. mit Luft gefüllte Reifen. Diese haben sich historisch, z.B. durch ihren Komfort bei Unebenheiten, als sinnvoll erwiesen. Michelin, sowie mittlerweile auch andere Hersteller, verfolgen momentan allerdings das Konzept eines luftlosen Reifens. Dieser ist nicht als Vollgummireifen, welcher ebenfalls auf dem Markt erhältlich ist, zu verstehen, sondern basiert auf einem völlig neuartigen Konzept.

In dieser Arbeit wird ein pneumatischer Reifen mit dem sogenannten Tweel von Michelin verglichen. Dafür werden die Eigenschaften, welche den pneumatischen Reifen historisch gesehen erfolgreich gemacht haben, näher beleuchtet, da mindestens diese auch durch das Tweel erfüllt werden sollten. Darüberhinaus wird der generelle Aufbau eines Tweels, sowie das verwendete Material betrachtet.

Außerdem werden dem Tweel weitere positive Eigenschaften, wie z.B. durch einen geringeren Rollwiderstand bessere Verbrauchswerte und damit natürlich auch geringere CO₂ Emissionen nachgesagt. Diese Eigenschaften sollen ebenfalls betrachtet werden.

In dieser Arbeit wird aber über den reinen Vergleich der Benutzungsphase des Reifens bzw. des Tweels hinaus, der gesamte Herstellungsprozess, sowie die Entsorgung betrachtet. Um diese Phasen und die dazugehörigen Prozesse besser beurteilen zu können wird eine sogenannte Lebenszyklusanalyse eines pneumatischen Reifens und eines Tweels mit Hilfe einer Ökobilanz durchgeführt. Diese Arbeit erklärt, wie diese Analyse durchgeführt wird und welche Kategorien dabei eine Rolle spielen und präsentiert anschließend eine zusammenfassende Gesamtbilanz für den Vergleich eines pneumatischen Reifens und eines Tweels. Anschließend beschäftigt sich diese Arbeit mit den möglichen Nachteilen des Tweels, sowie mit den Zukunftsperspektiven für luftlose Reifen.

2 Reifen - Historische Betrachtung

Die Erfindung des Rads an sich kann wohl ca. auf die Mitte des 4. Jahrhunderts v. Chr. zurückdatiert werden. Die ersten Räder bestanden aus einer Holzscheibe versehen mit einem Eisenband als Lauffläche. Die Weiterentwicklung der Holzscheibe zu einem, heute besser bekannten, Speichenrad, machte das Rad zwar leichter, aber es gestaltete sich insgesamt immer noch sehr unkomfortabel.

So wurde im 19. Jahrhundert der pneumatische Reifen gleich zweimal erfunden. Das erste Patent meldete 1846 Robert William Thomson an. Seine Erfindung geriet allerdings mit seinem Tod in Vergessenheit.

So kam es das 1888 John Boyd Dunlop den pneumatischen Reifen neu erfand und ihn ebenfalls zum Patent anmeldete. Wohl auch der zum selben Zeitpunkt stattfindenden Entwicklungen im Bezug auf das Automobil durch Carl Benz und Gottlieb Daimler, und der Erfindung des Pedal-Fahrrads, ist es zu verdanken, dass dieser Reifen Abnehmer fand. Der mit Luft befüllte Reifen brachte allerdings einige Nachteile mit sich, die bis heute in



(i) Wagenrad

(ii) Pneumatischer Reifen

(iii) Tweel

Abb. 2-1: Entwicklung des Reifens [pic]

unterschiedlicher Form und Ausprägung existieren. Pneumatische Reifen sind sehr komplex im Vergleich zu massiven Reifen, müssen häufiger gewartet werden und können durch Beschädigungen ihre Luft verlieren. Umso interessanter ist es zu betrachten, warum der pneumatische Reifen eine solche Verbreitung finden konnte.

Die positiven Eigenschaften des pneumatischen Reifens werden klar, wenn seine Eigenschaften im Vergleich zu denen eines massiven Rades, auf den unebenen Straßen des 19. Jahrhunderts betrachtet werden. So konnte festgestellt werden, dass ein pneumatischer Reifen einen wesentlich geringeren Verlust kinetischer Energie erfährt wenn er über Hindernisse rollt, als ein massiver Reifen [RC06].

Außerdem gehört ein pneumatischer Reifen zur Gruppe der sog. „Top Loaders“. Das bedeutet, dass bei einem pneumatischen Reifen ähnlich wie bei einem Fahrrad-Speichen-Rad die gesamte Struktur verantwortlich ist für das Tragen von Lasten. Das Gegenteil davon, ein

sog. „Bottom Loader“, liegt hingegen bei einem massiven Rad vor. Das bedeutet, dass hier lediglich der Teil des Rades zwischen Kontaktfläche und Mittelpunkt für das Tragen von Lasten verantwortlich ist. Dieser Mechanismus muss deshalb am gesamten Rad mehrfach wiederholt werden, was dazu führt, dass die Ladekapazität pro Masse deutlich schlechter ist. Abbildung 2-2 zeigt diesen Sachverhalt [RC06].

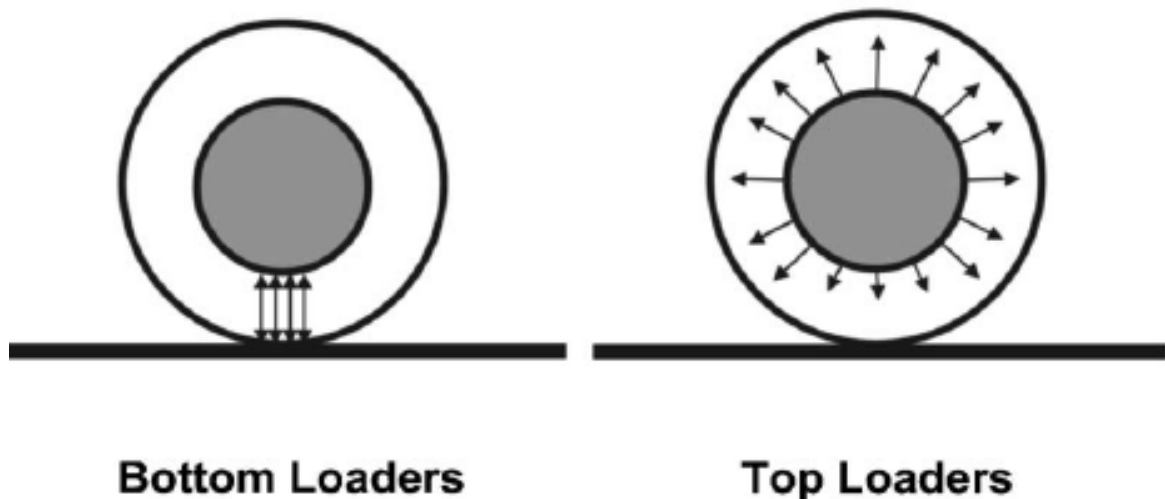


Abb. 2-2: Belastungsmechanismus [RC06]

Ein weiterer großer und wohl offensichtlicher Faktor, der zum Erfolg des pneumatischen Reifens geführt hat ist seine geringere Steifigkeit. Ein massives Rad erlaubt nur kleine Deformationen, während bei einem pneumatischen Rad die vorhandene Füllluft als Federung benutzt werden kann und so große Deformationen und eine relativ geringe Steifigkeit erlaubt [RC06].

Das letzte wohl entscheidende Kriterium über das ein pneumatischer Reifen verfügt ist der geringere Kontaktdruck des Reifens im Reifenlatsch. Massive Reifen haben typischerweise einen sehr hohen Kontaktdruck, während in pneumatischen Reifen der Kontaktdruck ungefähr äquivalent zum Luftdruck des Reifens ist. Dieser geringe Kontaktdruck bringt außerdem den Vorteil mit sich, dass eine große Reifenaufstandsfläche zwischen Reifen und Straße erforderlich ist, was dazu führt, dass Zugkraft gut übertragen werden kann und eine längere Haltbarkeit sowohl des Reifens als auch der Straße gewährleistet ist [RC06].

Diese vier Kriterien haben beim Personenkraftwagen zum Erfolg des heute bekannten und verwendeten pneumatischen Reifens geführt. Es ist also ganz klar das ein neues Konzept eines nicht pneumatischen-, also luftlosen Reifens, mindestens diese vier Kriterien erfüllen muss, um Anwendung zu finden. Das Konzept eines solchen Reifens wird mittlerweile von vielen Reifenherstellern verfolgt. In dieser Arbeit soll konkret ein luftloser Reifen von Michelin betrachtet werden, welcher mit dem Namen Tweel betitelt ist. Das Konzept des Tweels

versucht die genannten dominierenden Eigenschaften der pneumatischen Reifen zu erfüllen [RC06], sowie darüber hinaus noch weitere Vorteile für den Verbraucher und vielleicht auch die Umwelt zu liefern.

3 Motivation

3.1 Energiefluss in einem Personenkraftwagen

In einem durchschnittlichen Personenkraftwagen kann, wie in Abbildung 3-1 gezeigt, weniger als ein Drittel der Energie des Kraftstoffes vom Motor in mechanische -, also nutzbare Energie, umgewandelt werden. Mit zusätzlichen Verlusten im Antriebsstrang kann nur ca. 20% der Energie an den Reifen genutzt werden. Dort wird die Energie benötigt, um die sog. Fahrwiderstände zu überwinden. Fahrwiderstände sind definiert als die Summe aller Kräfte, die zur Fortbewegung des Fahrzeuges überwunden werden müssen. Diese Widerstände lassen sich in vier Gruppen zusammenfassen: Luftwiderstand, Steigungswiderstand, Rollwiderstand und Trägheitskräfte (beim Beschleunigen und Bremsen). Trotz einer kontinuier-

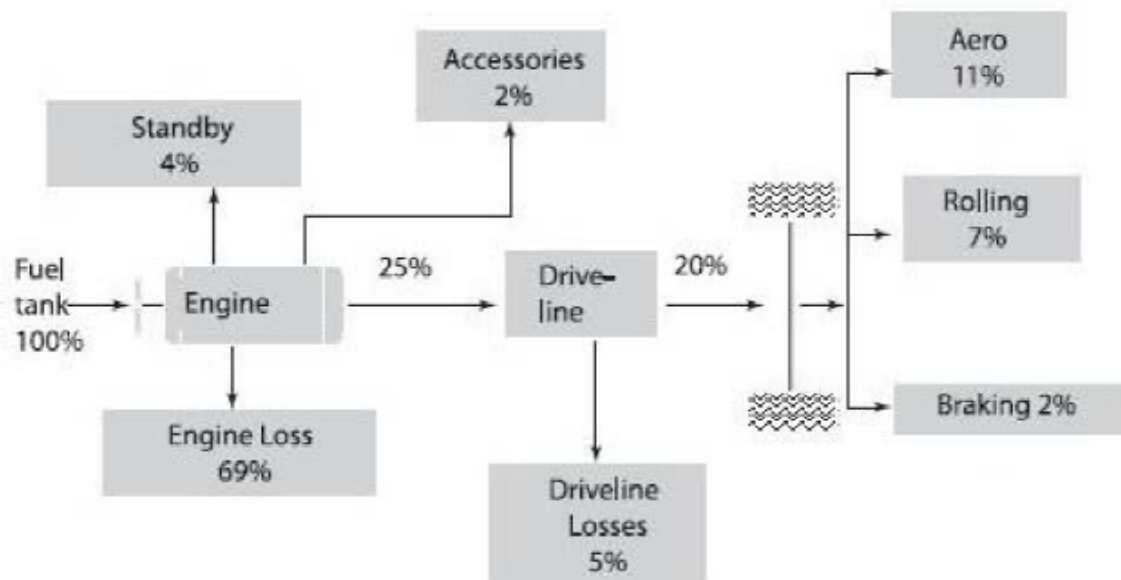


Abb. 3-1: Energieverteilung in einem Personenkraftwagen (Highway Fahrt) [Cob09]

lichen Verbesserung des Antriebsstranges und des Motors selbst, zeigt dies eindrucksvoll, dass jede mögliche Reduzierung der Fahrwiderstände durchaus sinnvoll ist um den Energiebedarf eines Fahrzeuges zu reduzieren.

Bei der Betrachtung eines pneumatischen Reifens im Vergleich zu einem Tweel soll verstärkt der Rollwiderstand betrachtet werden, da dieser durch Veränderungen der Bereifung optimiert werden kann.

3.2 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand ist definiert durch den Energieverbrauch eines Reifens bezogen auf die zurückgelegte Strecke.

Ein pneumatischen Reifen weist durch die Gummimischung visko-elastisches Verhalten auf, welches für den Rollwiderstand verantwortlich ist. D.h., dass sich der Reifen unter Einwirkung einer Kraft verformt und ein Teil der Energie als Wärme am Reifen dissipiert.

Wie stark dieser Einfluss ist kann über den sog. Rollwiderstandsbeiwert definiert werden. Dieser fasst alle Widerstandsanteile des Rollwiderstandes zusammen und beschreibt sie in einer dimensionslosen Kennzahl. Diese Kennzahl ist definiert als der Quotient aus Rollwiderstandskraft und Radlast:

$$c_r = \frac{F_{roll}}{F_N} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Ein durchschnittlicher pneumatischer Reifen weißt einen Widerstandsbeiwert von 0.010 auf [Cob09]. Der beste zurzeit am Markt verfügbare pneumatische Reifen verfügt über einen Rollwiderstandsbeiwert von ca. 0.006 [Cob09]. Dieser soll im Folgenden mit dem Tweel, welches zum derzeitigen Entwicklungsstand einen Widerstandsbeiwert von ca. 0.0055 aufweist, verglichen werden [Cob09]. Das bei dem Tweel verwendete Polyurethane weist weniger visko-elastisches Verhalten auf, was zu dieser Verbesserung führt [VJTS11]. Allerdings birgt dieses Verhalten von Polyurethane den Nachteil, dass die Reifendämpfung ebenfalls reduziert wird. Aus diesem Grund werden z.B. FEM Simulationen durchgeführt, um die optimalen Kriterien hinsichtlich Speichendicke und „Shear Band“ (genauere Angaben zum Aufbau siehe Kapitel 4.1) Design zu finden, welche weiterhin einen geringen Energieverlust gewährleisten, aber trotzdem die Flexibilitätseigenschaften des Reifens erhalten [JVST13]. Außerdem sind zusätzlich weitere Tweel Stages geplant, welche den Rollwiderstandsbeiwert auf 0.004 und 0.003 sinken lassen sollen [Cob09]. Tabelle 3-2 zeigt wie sich dies auf den durchschnittlichen Verbrauch eines Personenkraftwagens auswirkt. Die Verbräuche für Widerstandsbeiwerte kleiner 0.0055 sind allerdings rein hypothetisch und mit dem Computer berechnet, da noch keine Reifen mit diesen Widerstandsbeiwerten existieren.

Drive Cycle	Rollwiderstandsbeiwert						
	0.003	0.004	0.0055	0.006	0.008	0.010	0.0115
Kombiniert (l/100km)	8.46	8.57	8.73	8.79	9.00	9.22	9.37

Abb. 3-2: Verbrauchswerte bei unterschiedlichem Widerstandsbeiwert [Cob09]

4 Tweel

Das Tweel ist ein Konzept eines luftlosen, also nicht pneumatischen, Reifens, welches von Michelin entwickelt wurde. Der Name ist eine Kombination aus „Tire“ und „Wheel“. Auch andere Hersteller haben Konzepte für luftlose Reifen entwickelt. Nicht pneumatische Reifen werden momentan an Baustellenfahrzeugen, Rasenmähertraktoren und Quads verwendet. Eine Verwendung am Personenkraftwagen ist derzeit nicht bekannt.

4.1 Aufbau

Das Tweel verfügt über einen sog. „Shear Beam“. Dieser besteht aus zwei Membran Schichten konstanter Größe, die von einer Schicht eines elastischen Materials, welches ein geringe Elastizitätsmodul aufweist (genauere Angaben fallen vermutlich unter Geheimhaltung, siehe [RC06]), getrennt werden. Die Außenseite des „Shear Beams“ ist mit einer gummierten Lauffläche versehen. Außerdem ist der „Shear Beam“ über verformbare Speichen aus Polyurethane mit einer Stahlfelge verbunden.



Abb. 4-1: Foto eines Tweels [She]

4.2 Vorteile

Das Tweel erfüllt alle oben genannten Kriterien, die historisch gesehen zur Dominanz des pneumatischen Reifens geführt haben. Außerdem verfügt es über weitere Vorteile, welche sich auch bei der Verwendung an Personenkraftwagen positiv auswirken können.

Einer der offensichtlichsten Vorteile gegenüber des pneumatischen Reifens ist, dass der Reifen nicht durch eine Beschädigung Luft verlieren kann. Außerdem ist die ständige Wartung zum Erhalt des richtigen Luftdrucks nicht notwendig. Das Design des Tweels und eben der Verzicht auf die Befüllung mit Luft, entkoppelt die Steifigkeit des Reifens von dem im pneumatischen Reifen vorherrschenden Luftdruck. Dies bietet mehr Freiheitsgrade beim Design und der Umsetzung [RC06].

Einen weiteren Vorteil bietet die oben bereits erwähnte Reduzierung des Rollwiderstandsbeiwerts, welcher sich positiv auf den Verbrauch und den Verschleiß des Reifens bzw. des PKWs auswirkt.

Das Tweel befindet sich allerdings momentan noch in der Entwicklungsphase d.h. Langzeitfaktoren, wie z.B. der vermutlich geringere Verschleiß, der zu einer zwei bis dreimal längeren Haltbarkeit im Vergleich zum klassischen Reifen führen soll, sind noch nicht ausreichend überprüft [hV15]. Auch andere Faktoren können sich durch den gegenwärtigen Stand der Forschung durchaus noch verändern.

5 Ökobilanz

Die Vorteile des Tweels deuten darauf hin, dass es durchaus in der Lage sein könnte bessere Ergebnisse hinsichtlich Komfort, Verbrauch und Handling zu liefern als ein pneumatischer Reifen. Es existieren diverse Studien zur Ökobilanz eines pneumatischen Reifens. Diese betrachten den Umwelteinfluss eines Reifens über seine gesamte Lebensdauer, also von der Gummi Herstellung bis zur Entsorgung des Reifens. Mit der Erstellung einer Ökobilanz für ein Tweel, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, beschäftigen sich [Cob09] und [BC11]. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Arbeiten für den amerikanischen Markt erstellt wurden und somit auch amerikanische Daten enthalten. So unterscheidet sich z.B. die jährliche durchschnittliche Fahrleistung von der europäischen, sowie die Liste der meist gefahrenen Autotypen inklusive deren Durchschnittsverbräuche und auch der Energiemix in den USA ist ein anderer. Außerdem wichtig zu beachten ist, dass in dieser Bilanz nur Benzin betriebene Fahrzeuge Berücksichtigung finden, andere Antriebsarten werden nicht betrachtet. Übertragungen dieser Daten für eine Beurteilung des Tweels bei Verwendung in Deutschland sind also mit Vorsicht durchzuführen. Zu beachten ist außerdem, dass sich das Tweel noch in der Entwicklungsphase befindet und somit noch nicht alle Prozesse endgültig entwickelt, sowie für die Massenproduktion ausgelegt sind.

Im Folgenden wird kurz auf die Erstellung solcher Ökobilanzen eingegangen, sowie ein Überblick über die in den oben genannten Arbeiten gewonnenen Ergebnisse gegeben.

5.1 Erstellung von Ökobilanzen

Obwohl es gewisse ISO Richtlinien für die Erstellung von Ökobilanzen gibt, existieren verschiedene Methoden zur Bewertung des jeweiligen Umwelteinflusses verschiedener Komponenten. Viele dieser Methoden sind in kommerzieller Software implementiert. In dieser Arbeit wird die Software SimaPro (System for Integrated Environmental Assessment of Products) und die EcoIndicator99 Methode verwendet.

Die erste Schwierigkeit bei der Erstellung von Ökobilanzen bzw. Bilanzen über den Einfluss auf die Umwelt, ist die Definition des Terms Umwelt. EcoIndicator99 teilt alle Einflüsse in drei Kategorien ein: Human Health (menschliche Gesundheit), Ecosystem Quality (Qualität des Ökosystems) und Resources (Ressourcen). Diese Kategorien sind natürlich nicht in der Lage wirklich jeden Umwelteinfluss zu erfassen, sollten aber eine vertretbare Grundlage bieten. Eine weitere wichtige Frage ist, wie diese Kategorien gegeneinander gewichtet werden und zu einer gemeinsamen Einheit zusammengeführt werden sollen. EcoIndicator99 gewichtet den Einfluss auf die menschliche Gesundheit, sowie die Qualität des Ökosystems gleichermaßen zu je 40 %. Der Einfluss auf die Ressourcen wird nur halb so viel, also mit 20% gewichtet. Damit wird folgende Skalar erlangt:

$$Pt = 0.4(EQ) + 0.4(HH) + 0.2(R)$$

Gl. 5-1

Wobei EQ, HH und R jeweils der normierte Wert für Ecosystem, Human Health bzw. Resources sind. Außerdem können sich gewisse Einflüsse in den einzelnen Kategorien durchaus überschneiden. Diese werden dann jedoch jeweils nur einer Kategorie zugeordnet. So fallen unter die Kategorie „Human Health“ die Anzahl und Dauer, sowie die verlorenen Lebensjahre, von Krankheiten ausgelöst durch Umwelteinflüsse. In diese Kategorie fallen ebenfalls die meisten Folgen von Klima Veränderungen. Die Kategorie „Ecosystem Quality“ beschäftigt sich hingegen mehr mit der Artenvielfalt, sowie der Nutzung von Land. Den Einfluss in der Kategorie „Resources“ zu bewerten gestaltet sich schwierig, da eine gewisse Ungewissheit über die Anzahl der vorhandenen Rohstoffe herrscht. Deshalb ist die Einheit dieser Kategorie die sog. „surplus energy“ in MJ pro kg, die zusätzlich benötigt wird, um in der Zukunft ein Kilogramm einer Ressource in schwer zugänglichen Quellen abzubauen. Die Anzahl der Punkte die sich durch dieses Verfahren ergibt wird anschließend so skaliert, dass sie zu der von EcoIndicator99 verwendeten Skala passt, bei der 1000 Punkte der jährlichen Umweltbelastung eines durchschnittlichen europäischen Bürgers entsprechen. Je mehr Punkte ein Prozess bzw. eine Phase dabei erlangt desto größer ist der negative Einfluss auf die Umwelt [Cob09].

5.2 Vergleich pneumatischer Reifen vs. Tweel

In dieser Arbeit werden für den Vergleich des pneumatischen Reifens mit dem Tweel die Produktions-, Entsorgungs- und Benutzungsphase des Reifens betrachtet. Abbildung 5-1 zeigt eine allgemeine Gegenüberstellung dieser Werte.

5.2.1 Produktion/Entsorgung

Es ist zu erkennen, dass das Tweel sowohl in der Produktions- als auch in der Entsorgungsphase, verglichen mit dem pneumatischen Reifen, eine leicht erhöhte Punkte Anzahl, also einen erhöhten negativen Einfluss auf die Umweltbilanz, hat.

Generell unterscheiden sich die in der Produktion verwendeten Materialien für einen pneumatischen Reifen und ein Tweel erheblich. Bei einem pneumatischen Reifen hauptsächlich von Bedeutung ist die Herstellung und Verwendung von Gummi, während ein Tweel vor allem auf Polyurethan angewiesen ist. Aus diesem Sachverhalt heraus ergeben sich auch die Unterschiede in den Kategorien für die Produktion, die in Abbildung 5-4 und 5-5 zu erkennen sind. Die Ökobilanz für die Produktion eines pneumatischen Reifens verfügt über die Kategorie „Land use“. Diese wird durchaus kontrovers diskutiert. Zur Erzeugung von Gummi müssen Gummibäume gepflanzt werden. Dies geschieht traditionell in der Amazonas Region in Bolivien und Peru und seit Beginn des 20. Jahrhunderts auch Süd Asien. Man rechnet pro 1 kg produziertem natürlichem Gummi 7 m² Land, die jährlich benötigt werden [Cob09]. Aus diesem Grund wurde häufig natürlicher Wald in Monokulturen verwandelt, was

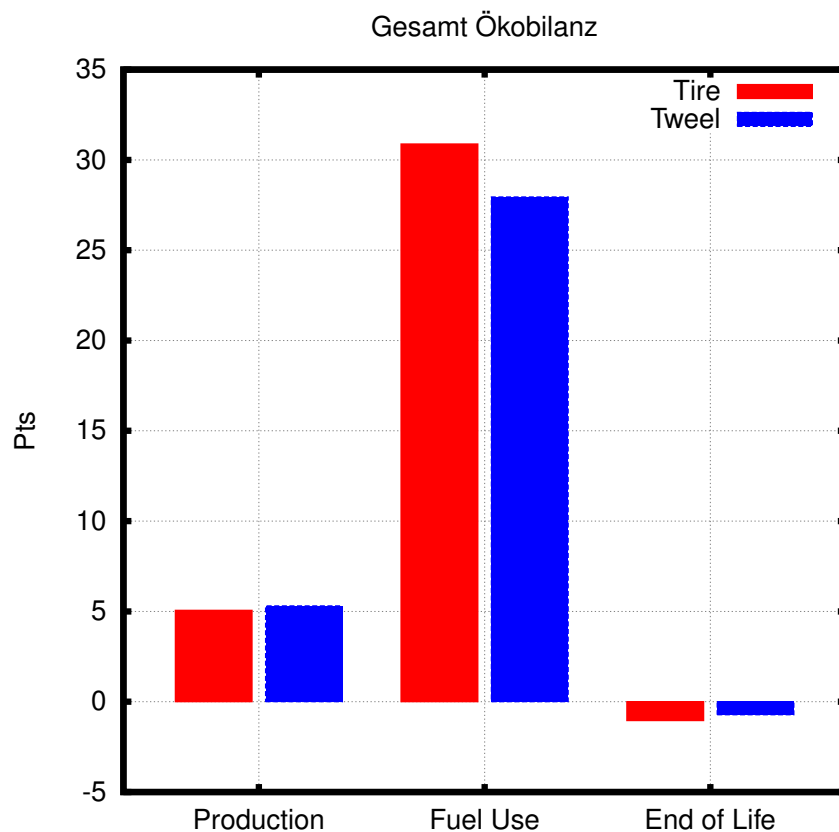


Abb. 5-1: Gesamt Ökobilanz [Cob09]

nicht als sinnvoll erachtet werden kann. Allerdings muss auch bedacht werden, dass eine Monokultur durch Photosynthese immer noch positives zur Umweltbilanz beisteuern kann, was z.B. bei Verwendung des Waldes als Bauland nicht der Fall wäre.

Die Betrachtung von Polyurethan ist schwieriger, da Michelin die genauen Bestandteile aus denen sich das Polyurethan eines Tweels zusammensetzt unter Verschluss hält [Cob09].

Außerdem sind die Gewichtsunterschiede der beiden Reifenkonzepte zu beachten. Das Gewicht, jeweils ohne Stahlfelge, des pneumatischen Reifens beträgt 10 kg, während das Tweel 12 kg wiegt [Cob09].

Die erhöhten Werte während der Produktion sind also auf die Herstellung von Polyurethane, sowie den generell etwas höheren Materialbedarf des Tweels zurückzuführen [Cob09].

Auch die Entsorgungsphase soll im Folgenden etwas näher beleuchtet werden. Generell ist zum momentanen Zeitpunkt die Betrachtung der Entsorgung des Tweels eher hypothetisch, da es sich noch nicht in Massenproduktion befindet und somit auch noch keine größeren Mengen entsorgt werden müssen.

Allgemein lässt sich Gummi aufgrund der Eigenschaften, die Duroplast mit sich bringt, nicht neu formen, wenn es in seiner Endform vulkanisiert ist. Aus diesem Grund sammelten sich lange Zeit Reifenstapel ausgedienter Reifen auf Deponien. Da dies allerdings aus Umwelt-

sicht nicht sinnvoll ist wurden Verfahren entwickelt, wie Duroplaste sinnvoll recycelt werden können. Zu den wichtigsten Prozessen in den USA zählen die Herstellung von Kraftstoffen mit Hilfe der Reifen, Einsatz im Bauwesen und die Verwendung von geriebenem Gummi für weitere Produkte. Abbildung 5-2 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten in den USA.

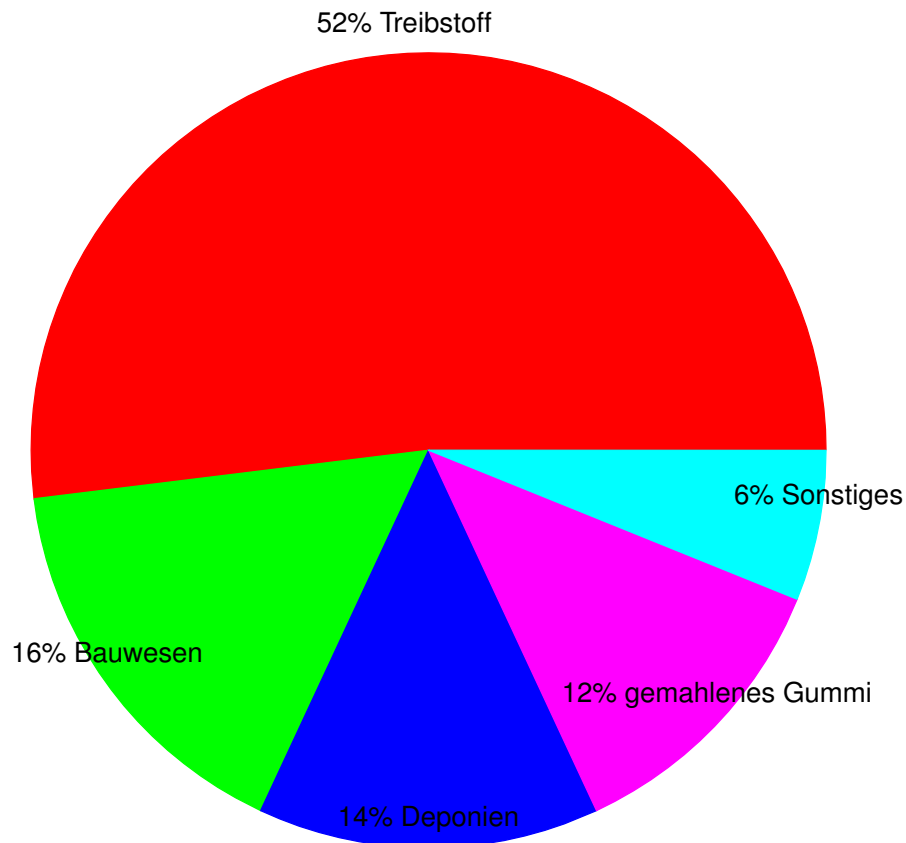


Abb. 5-2: Entsorgung pneumatischer Reifen [Cob09]

Bei einem Tweel kann die Lauffläche voraussichtlich genauso entsorgt werden wie das Gummi eines pneumatischen Reifens. Auch die Stahlfelge kann nach Entsorgung der Speichen und des „Shear Bands“, wie beim pneumatischen Reifen, weiter verwendet werden. Problematisch beim Tweel ist jedoch die Entsorgung der Polyurethane Speichen. Momentan gibt es noch keine entsprechenden Prozesse zum Recyclen von Polyurethane, da es im Vergleich zu Gummi, wesentlich weniger verwendet wird. Deshalb wird das meiste Polyurethane momentan auf Deponien entsorgt. Dies könnte sich aber voraussichtlich mit einer steigenden Anzahl von Tweels, die recycelt werden müssen ändern. Abbildung 5-3 zeigt die prozentuale Verteilung bei der Entsorgung eines Tweels [Cob09].

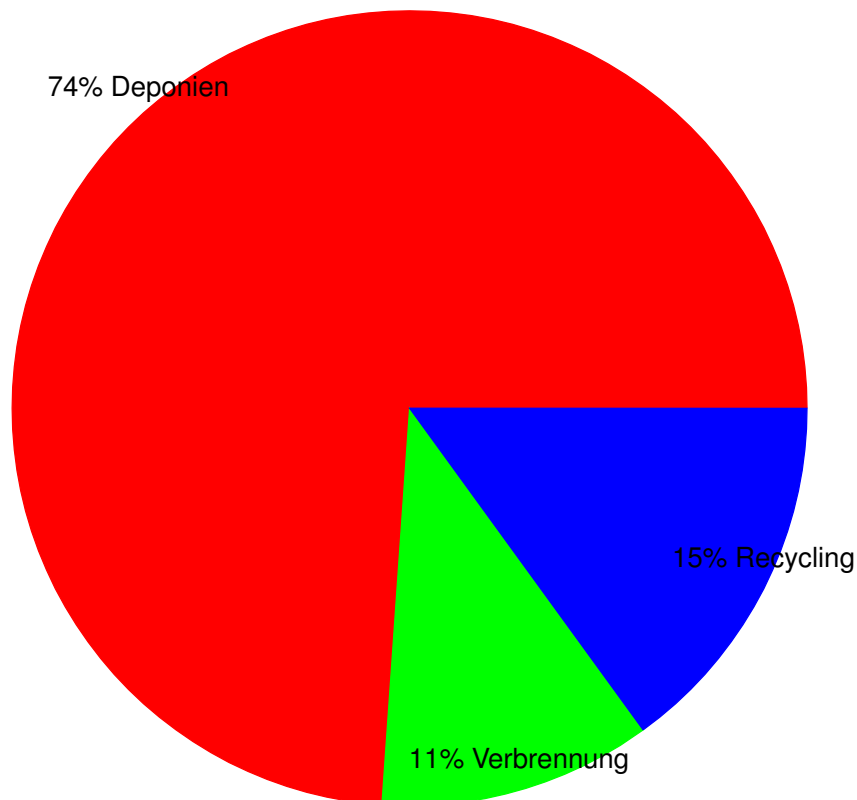


Abb. 5-3: Entsorgung Tweel [Cob09]

5.2.2 Benutzungsphase

Der größte Unterschied ist allerdings, wie auch in den Abbildungen 5-4 und 5-5 dargestellt, in der Benutzungsphase zu erkennen. Außerdem ist zu erkennen, dass bei beiden Reifentypen die Verwendung von Ressourcen den größten Einfluss auf die Benutzungsphase hat. Auch die weiteren großen Einflussfaktoren, nämlich „Respiratory inorganics“, „Climate change“ und „Aciditication/Eutrophication“ sind bei beiden Reifentypen zu erkennen. „Respiratory inorganics“ beschreibt dabei Atemwegserkrankungen, die durch anorganische, also nicht Kohlenstoff basierte, Materialien ausgelöst werden. Die Kategorie „Climate change“ fasst alle negativen Einflüsse auf die Umwelt zusammen, die durch Klima Veränderungen hervorgerufen werden. Die letzte große Einflussbereich, nämlich „Aciditication/Eutrophication“ beschreibt darüberhinaus den negativen Einfluss durch Versauerung und Eutrophierung. Wobei letzteres die schädliche Zunahme von Pflanzennährstoffen in Wasser, also schädliches Wachstum von Pflanzen und damit eine Störung des Ökosystems darstellt.

Auch wenn sowohl beim pneumatischen Reifen als auch beim luftlosen Reifen die gleichen Kategorien von Bedeutung zu sein scheinen, zeichnet sich ab, dass die Benutzungsphase des luftlosen Reifens hauptsächlich durch die geringere Verwendung von Ressourcen eine

bessere Umweltbewertung als der pneumatische Reifen erreichen kann. Dies ist auf die Senkung des Widerstandsbeiwerts im Vergleich zum pneumatischen Reifen zurückzuführen und soll im Folgenden näher betrachtet werden.

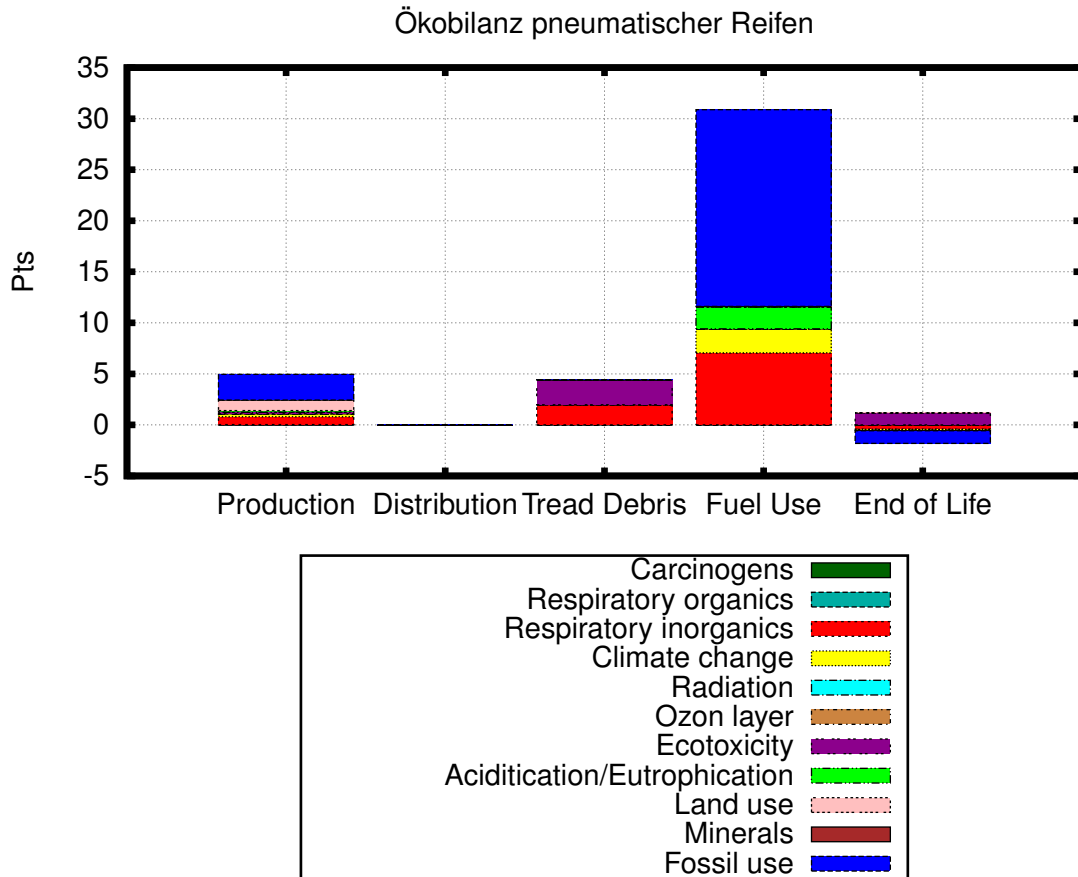


Abb. 5-4: Gesamt Ökobilanz pneumatischer Reifen [Cob09]

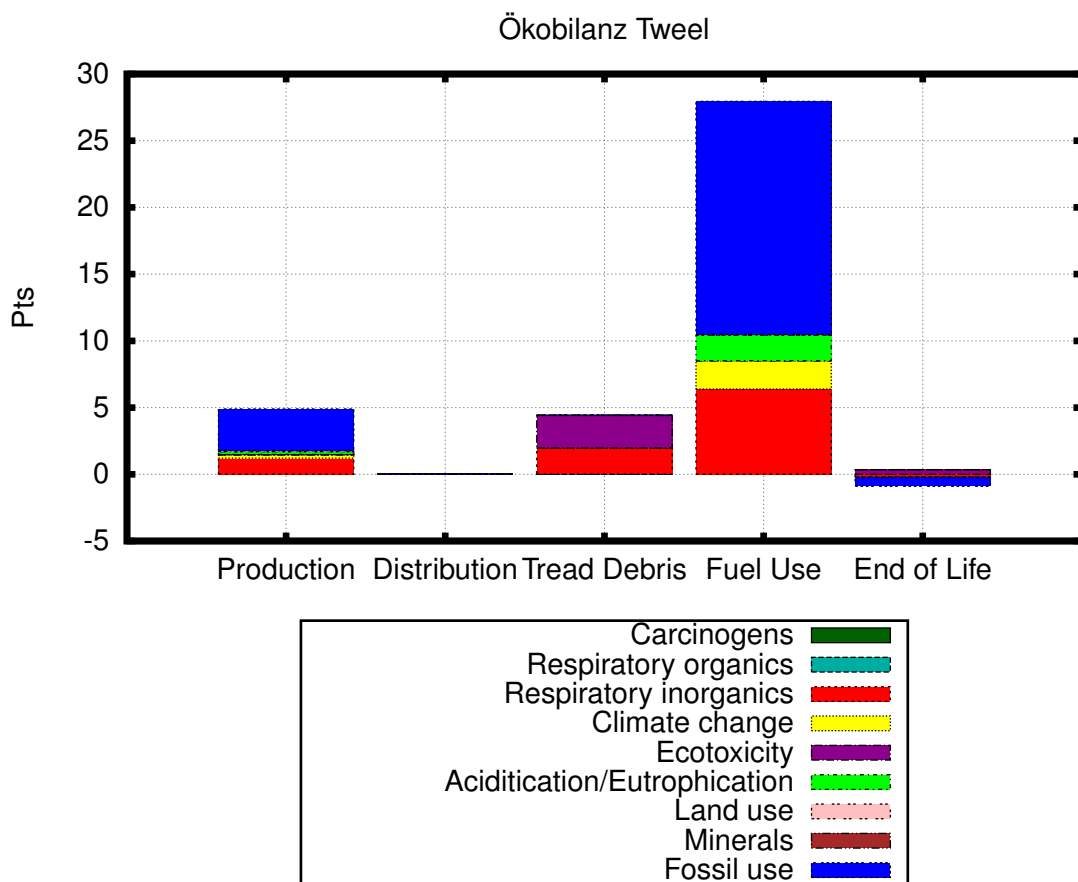


Abb. 5-5: Gesamt Ökobilanz Tweel [Cob09]

5.2.3 Tweel Stages

Der durchschnittliche Widerstandsbeiwert eines pneumatischen Reifens beträgt 0.010 [Cob09]. Um den Vergleich allerdings möglichst fair zu gestalten, wird das Tweel mit einem sehr umweltfreundlichen pneumatischen Reifen verglichen, welcher einen Widerstandsbeiwert von 0.006 erreicht. Das Tweel weist in seinem aktuellen Entwicklungsstadium einen um ca. 10% verringerten Rollwiderstand und einen Widerstandsbeiwert von 0.0055 auf. Für das Tweel sind weitere Entwicklungsstadien geplant. Ein Stage 2 Tweel soll ca. 30% weniger Rollwiderstand und ein Stage 3 Tweel sogar ca. 50% weniger Rollwiderstand aufweisen. Dies entspräche Widerstandsbeiwerten von 0.004 bzw. 0.003. Allerdings befinden sich diese beiden Stadien noch in ihrer frühen Entwicklung und sind deshalb noch hypothetisch [Cob09]. Abbildung 5-6 macht allerdings deutlich welchen großen Einfluss der Rollwiderstand auf die Umweltbilanz eines Reifens in seiner alltäglichen Benutzung hat und somit auch welche Bedeutung diesen Entwicklungen zukommt. Ähnlich wie bei dem oben gezogenen Vergleich zwischen pneumatischen Reifen und Tweel ist zu erkennen, dass eine weitere Absenkung des Widerstandsbeiwerts sich vor allem auf die Verwendung von Ressourcen auswirkt. Dies ist ein logischer Zusammenhang, da durch eine Absenkung des Wi-

derstandsbeiwerts der Rollwiderstand abnimmt und damit die Summe der Fahrwiderstände, die zur Fortbewegung des Fahrzeugs überwunden werden müssen, ebenfalls sinkt. Sinken wiederum die Fahrwiderstände muss auch weniger Energie aufgebracht, also weniger Kraftstoff verbrannt werden. Darüber hinaus ist allerdings auch zu erkennen, dass sich eine Verringerung des Rollwiderstandsbeiwerts auch positiv auf die anderen drei großen Einflussgruppen „Respiratory inorganics“, „Climate change“ und „Acidification/Eutrophication“ auswirkt. Auch hier dürfte die Senkung auf die Verbrennung von weniger Kraftstoff und damit auf geringere Emissionen zurückzuführen sein.

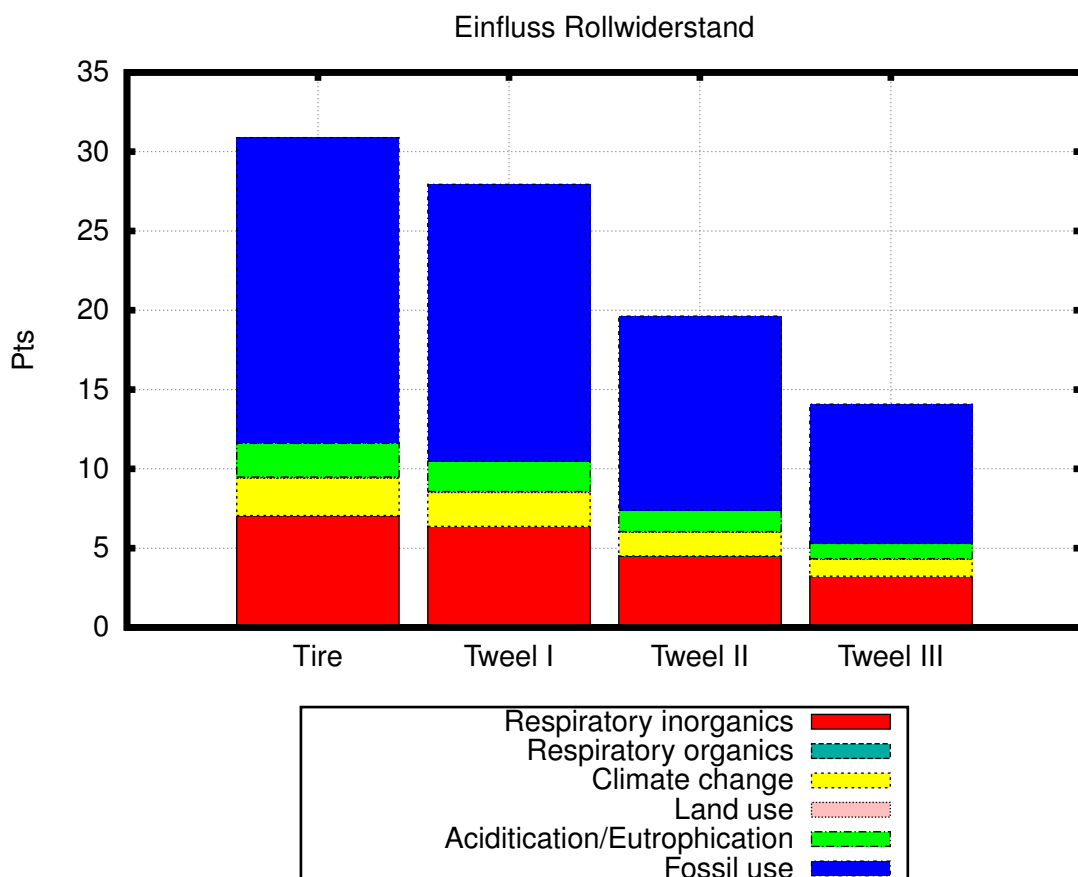


Abb. 5-6: Einfluss Rollwiderstand [Cob09]

Alle weiteren Vergleiche sollen allerdings zwischen einem pneumatischen Reifen und dem schon existierenden Stage 1 Tweel mit einem Widerstandsbeiwert von 0.0055 gezogen werden. Die durchschnittlichen Verbrauchswerte eines pneumatischen Reifens mit einem Widerstandsbeiwert von 0.006 und einem Stage 1 Tweel bei Verwendung an einem durchschnittlichen amerikanischen Personenkraftwagen betragen 8.79 l/100km bzw. 8.73 l/100km. Dies liefert eine Ersparnis von 0.06 Litern auf 100 km bei Verwendung eines Tweels, da bis auf die Reifen keine Veränderungen an Fahrzeug oder Antriebsstrang vorgenommen wurden.

Bei Verwendung des pneumatischen Reifens entfallen 0.6 l/100km des durchschnittlichen Verbrauches auf die Reifen. Dadurch ergibt sich für das Tweel ein Verbrauch ausgelöst durch den Rollwiderstand von 0.54 l/100km.

Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung in den USA liegt bei 12000 Meilen, multipliziert mit der Lebensdauer eines Reifensatzes von 3.5 Jahren, ergibt dies eine Fahrleistung von 42000 Meilen pro Reifensatz. Um die Ersparnis im direkten Vergleich zu berechnen wird diese Zahl noch durch die Anzahl der Reifen an einem Personenkraftwagen geteilt. So ergeben sich für den pneumatischen Reifen und das Tweel folgende Benzinverbräuche im Laufe ihrer Lebensdauer

$$\begin{aligned} (0.006l/km) * (42000mi) * \frac{1.61km}{mi} * \frac{1}{4} &= 101l \\ (0.0054l/km) * (42000mi) * \frac{1.61km}{mi} * \frac{1}{4} &= 91l \end{aligned} \quad \text{Gl. 5-2}$$

D.h. gerechnet auf die Lebensdauer eines Reifens und mit einer durchschnittlichen Verwendung ergibt sich eine Ersparnis von 10 Litern gegenüber des pneumatischen Reifens bei Verwendung eines Tweels [Cob09].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt ergibt sich durch die Ökobilanz ein um 6% verbesserter Wert des Tweels gegenüber des besten momentan auf dem Markt befindlichen pneumatischen Reifens [Cob09]. Klar zu erkennen ist, dass diese Verbesserung in der Benutzungsphase erreicht wird. Dies geschieht durch das visko-elastische Verhalten des pneumatischen Reifens. Dieses Verhalten weißt der luftlose Reifen nicht auf, was zu einem besseren Rollwiderstandsbeiwert führt, welcher merklich den Kraftstoffverbrauch des Personenkraftwagens verringert, da weniger Energie zur Überwindung der reduzierten Fahrwiderstände benötigt wird. Dies wirkt sich natürlich merklich auf die Umweltbilanz des Tweels im Vergleich zum pneumatischen Reifen aus.

Bedacht werden muss allerdings, dass sich das Tweel momentan noch in der Entwicklungsphase befindet. Im Jahre 2014, also nach der Veröffentlichung der Arbeiten zur vergleichenden Ökobilanz, wurde die erste Tweel Fabrik in South Carolina eröffnet [hV15]. Die Daten beziehen sich also noch nicht auf eine mögliche Massenproduktion des Tweels, wie es bei dem pneumatischen Reifen der Fall ist.

Die selben Bedenken sind bei der Entsorgung des Tweels anzuführen. Momentan ist es nicht notwendig große Mengen Polyurethan zu recyceln, deshalb enden die meisten Bauteile des Tweels aus diesem Material auf einer Deponie. Es ist allerdings zu erwarten, dass sich dieser Sachverhalt ändert, sobald große Mengen von Tweels anfallen. Beim pneumatischen Reifen war dieser Entwicklungsprozess hin zu sinnvollen Recyclingmethoden auch zu erkennen, als große Reifenmassen auf Deponien angefallen sind. Dieser Prozess, also eine sinnvolle Recyclingmethode für Polyurethan, wäre dementsprechend wünschenswert und würde die Bilanz wohl weiter verbessern. Probleme könnte die Geräuschentwicklung beim Tweel bereiten. Es wird davon ausgegangen, dass die Be- und Entlastung der Speichen des Tweels mit einer gewissen Lautstärke verbunden ist. Hierzu werden Untersuchungen unter anderem mit Hilfe von FEM-Methoden gemacht, um die optimalen Parameter hinsichtlich Stabilität, Komfort und Geräuschentwicklung zu finden, die aber auch gleichzeitig weiter die oben genannten Vorteile bieten [JVST13, RBP⁺10]. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Akzeptanz des Produkts. Die Gesellschaft hat sich an pneumatische Reifen an Personenkraftwagen gewöhnt. Die Umstellung auf ein Produkt, welches anders aussieht und sich wohl auch anders verhält, könnte dementsprechend problematisch werden. Außerdem existieren Probleme, die über diese gesellschaftliche Akzeptanz hinausgehen. In der deutschen Straßenverkehrsordnung ist in § 36 klar geregelt, dass ein Reifen eines Personenkraftwagens Luft zu führen hat. Diese Regelung müsste angepasst werden, damit ein luftloser Reifen auch über der Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h betrieben werden darf. Für das momentan erhältliche Tweel existiert allerdings auch nur eine Zulassung für maximal 25 km/h. Dies ist wohl einer der Gründe, warum dieser Reifen wohl erstmal vornehmlich an Baustellenfahrzeugen und anderen Arbeitsmaschinen montiert sein wird. Darüberhinaus ist der Kostenfaktor eher problematisch, da sich der momentane Preis für

das Tweel auf 474,50 Dollar pro Stück beläuft [hV15]. Kaum ein Autofahrer wird bereit sein diesen Aufpreis zu zahlen, auch wenn das Tweel oben genannte Umweltvorteile, wie z.B. den niedrigeren Treibstoffverbrauch, sowie eine angeblich um zwei bis drei mal längere Haltbarkeit bietet [hV15]. Allerdings gilt es natürlich zu beachten, dass die Produktpreise sich mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren und schlichtweg mit der produzierten Stückzahl noch ändern können. Die Entwicklung auf diesem Markt, vorallem hinsichtlich der Verwendung am Personenkraftwagen, bleibt also spannend und wird bestimmt in den nächsten Jahren noch interessante Aspekte liefern.

7 Literaturverzeichnis

- [BC11] Bert Bras and Austin Cobert. Life-cycle environmental impact of michelin wheel tire for passenger vehicles, 2011. Georgia Institute of Technology.
- [Cob09] Austin Cobert. Environmental comparison of michelin tweel and pneumatic tire using life cycle analysis. master thesis, Georgia Institute of Technology, 2009.
- [hV15] heise Verlag. *Technology Review*, 10:24, 2015.
- [JVST13] J. Ju, M. Veeramurthy, J.D. Summers, and L. Thompson. Rolling resistance of a nonpneumatic tire havin a porous elastomer composite shear band. *Tire Science and Technology, TSTCA*, 41(3):154–173, 2013.
- [pic] google bildersuche. https://www.google.de/imghp?hl=de&ei=sMAjVsekJ8j_UM0ni_AP&ved=0CAIQqi4oAQ. Accessed: Oktober 2015.
- [RBP⁺10] W. Rutherford, S. Bezgam, A. Proddaturi, L. Thompson, J.C. Ziegert, T. Rhyne, and S.M. Cron. Use of orthogonal arrays for efficient evaluation of geometric designs for reducing vibration of a non-pneumatic wheel during high-speed rolling. *Tire Science and Technology, TSTCA*, 38(4):246–275, 2010.
- [RC06] T.B. Rhyne and S.M. Cron. Development of a non-pneumatic wheel. *Tire Science and Technology, TSTCA*, 34(3):150–169, 2006.
- [She] Don Sherman. Tech dept.: The latest on the airless tire-and-wheel combo. <http://www.caranddriver.com/features/tech-dept-the-latest-on-the-airless-tire-and-wheel-combo-tech-dept>. Accessed: Oktober 2015.
- [VJTS11] M. Veeramurthy, J. Jaehyung, L.L. Thompson, and J.D. Summers. Optimization of a non-pneumatic tire for reduced rolling resistance, 2011. Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.