

2 Stand des Wissens

Der Boden ist in der landwirtschaftlichen Produktion sowohl Standort der Kulturpflanzen als auch Fahrbahn für Maschinen und Fahrzeuge. Beide Funktionen verlangen vom Boden jedoch unterschiedliche physikalisch-mechanische Eigenschaften (KRAUS & STEINKAMPF, 1986; SCHWIEGER, 1996; SOMMER & PETEKLAU, 1990; WEIßBACH & WINTER, 1996). In den nachstehenden Abschnitten soll deswegen der Wissensstand über die landwirtschaftlichen Fahrwerke und deren Konzeption, den physikalischen Bodenaufbau und seine Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit, die mechanischen Bodeneigenschaften sowie die Wechselwirkungen zwischen dem Fahrwerk und dem Boden als Fahrbahn und daraus resultierende Auswirkungen auf das Bodengefüge beschrieben werden. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Belastungsfaktoren und die wechselwirkenden Kräfte gelegt, welche die mechanische Beanspruchung des Bodengefüges und deren Tiefenwirkung bestimmen.

2.1 Fahrwerke in der Landwirtschaft

2.1.1 Anforderungen an landwirtschaftliche Fahrwerke

Landwirtschaftliche Fahrwerke erfüllen als Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn eine Vielzahl von Funktionen und Anforderungen (Tab. 2-1). Neben dem Abstützen des Fahrzeuges sind diese auch das Verringern der Rollreibung, das Spurhalten des Fahrzeuges, das Bereitstellen von Antriebs-, Brems- und Lenkkräften, die Schonung des Fahrers durch Schwingungsdämpfung und eine hohe Haltbarkeit (REMPFER, 1998; SCHWIEGER, 1996; ZIMA, 2002).

Tab. 2-1: Anforderung an Fahrwerke in der Landwirtschaft (WEIßBACH & WINTER, 1996)

Auf dem Feld:	Auf der Strasse:
• Hohe Haltbarkeit (geringer Verschleiß) • Hoher Laufwerkwirkungsgrad • Hohe Anforderung an die Tragfähigkeit • Gute Brems- und Federungseigenschaften • Hoher Komfort durch Rundlauf • Hohe Zugkraftübertragung	
• Geringer Rollwiderstand bei möglichst geringem Luftdruck <u>Grenze:</u> Tragfähigkeit und Haltbarkeit • Minderung des Druckes auf den Boden • Gute Selbstreinigung • Vermeidung tiefer Fahrspuren	• Geringer Rollwiderstand bei möglichst hohem Luftdruck <u>Grenze:</u> Komfort und Fahrsicherheit

Generell muss zwischen den gegensätzlichen Einsatzgebieten „Feld“ und „Strasse“ unterschieden werden. Während die Straße als weitgehend starre Fahrbahn zur Aufnahme hoher Belastung konzipiert ist, dient auf dem Feld der Ackerboden als stark nachgiebiges und kompressibles Medium vorrangig der Pflanze als Standort. Deshalb richten sich an landwirtschaftliche Fahrwerke während des Feldeinsatzes weitere Anforderungen: die Minderung des Druckes auf den Boden, die gute Selbstreinigung der Stollenzwischenräume und die Vermeidung tiefer Fahrspuren.

2.1.2 Fahrwerkskonzeptionen für den Einsatz in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft eingesetzte Fahrwerkskonzeptionen beschränken sich hauptsächlich auf Rad- und Bandfahrwerke (OLF, 1993).

Radfahrwerke

Radfahrwerke basieren auf einer der ältesten und wahrscheinlich bedeutendsten einzeltechnischen Erfindung der Menschheit: dem **Rad** (SEUFERT, 1986). Es wurde vermutlich um 3500 v. Chr. im Vorderen Orient (Mesopotamien und im Schwarzmeergebiet) aus "Zugschleifen" zur Beförderung schwerer Lasten entwickelt (SEUFERT, 2004). Die Bereifung der Räder entwickelte sich von Stahlreifen über Vollgummireifen zu den luftgefüllten Gummireifen. Für den zuletzt genannten Entwicklungsschritt hatten die Erfindungen zur Vulkanisierung von Thomson 1845 und Dunlop 1888 eine Schlüsselrolle. Bei Radfahrwerken wird die Achsanzahl, Reifenanzahl und Reifengröße durch das Lastaufkommen im Haupteinsatzfall beeinflusst. Die Reifenanzahl ist dabei durch die Verwendung von Doppelbereifung (auch Zwillingsbereifung) oder Tripelbereifung relativ flexibel. Zusätzlich ist bei neueren Entwicklungen durch die Verwendung mehrerer gelenkter Fahrzeugachsen spurversetztes Fahren möglich. Bei gezogenen Einheiten mit Mehrfachachsen sind zudem meist einzelne Achsen/Reifen gelenkt.

Raupenfahrwerke

Das Konzept der Raupenfahrwerke ist von den Erdbewegungsmaschinen (CATERPILLAR) bekannt, da bei diesen die Übertragung von hohen Zugkräften zur Verrichtung schwerer Arbeiten benötigt wird. Der Grundgedanke, der dieser Entwicklung zu Grunde liegt, ist ein Gleis auf dem Boden wie eine eigene Fahrbahn abzulegen, die das Fahrzeug nach der Überfahrt wieder aufnimmt (WEIßBACH, 2003). Bei den Raupenfahrwerken heben sich Ketten-, Halbraupen-, Gummiband- und Loopwheel-Fahrwerk voneinander ab. Am weitesten verbreitet sind heute die Bandfahrwerke. Der Einsatz von Kettenfahrzeugen in der Landwirtschaft hat keine Bedeutung mehr, da diese Fahrzeuge durch konstruktionsbedingte hohe

Gesamtmassen verbunden mit starken Vibrationen sowie auch durch einseitige Abstützung ein hohes Verdichtungspotential aufweisen (OLF, 1993; WEIßBACH, 2003). Halbraupen stellen die Kombination zwischen Rad-Fahrwerk und Raupen-Fahrwerk dar. Dabei wird über das Antriebsrad und ein weiteres Radpaar ein Gummiband gespannt und so die Kontaktfläche zur Fahrbahn deutlich vergrößert. Halbraupen- und Loopwheel-Fahrwerke haben in der Landwirtschaft kaum Bedeutung.

Generell erfolgt die Verbindung zwischen Fahrwerk und Fahrzeug entweder starr, über Gelenke oder über Federsysteme. Die Auswahl und Verwendung des jeweiligen Fahrwerksystems erfolgt abhängig von dem Nutzungskonzept und den zu erwartenden Einsatzbedingungen. Hinsichtlich der Fahrwerkskonzeption ergeben sich Unterschiede, welche im Besonderen zwischen Traktoren verschiedener Größenklassen, selbstfahrender Arbeitsmaschinen sowie Anhängegeräten und Transportanhängern bestehen (VDI, 2006).

In Abhängigkeit von Anzahl und Anordnung der Reifen- oder Bandfahrwerke lassen sich typische Fahrwerksformen an landwirtschaftlichen Fahrzeugen voneinander abgrenzen (HEINE, 1986). Die Abb. 2-1 zeigt eine Auswahl typischer Fahrwerksformen.

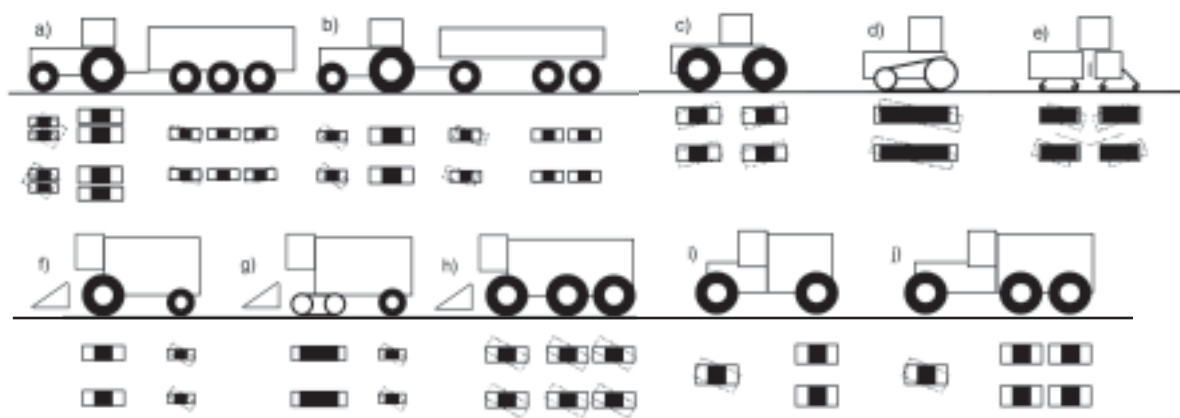


Abb. 2-1: Typische Reifen- und Bandfahrwerke an landwirtschaftlichen Maschinen (verändert nach FRERICH, 2004)

- a) Traktor mit Reifen-Fahrwerk und Doppelbereifung, Starrdeichsel-Anhänger mit drei Achsen, zwei lenkbar
- b) Traktor mit Reifen-Fahrwerk, Gelenkdeichsel-Anhänger mit drei Achsen
- c) Traktor mit gleich großen Reifen, zwei Lenkachsen, versetzte Fahrspuren möglich
- d) Traktor mit zwei Band-Fahrwerken
- e) Traktor mit vier Band-Fahrwerken und Knicklenkung
- f) Arbeitsmaschine (selbstfahrend) mit Reifen-Fahrwerk, Lenkachse hinten
- g) Arbeitsmaschine (selbstfahrend) mit Band-Fahrwerk an der Vorderachse
- h) Arbeitsmaschine (selbstfahrend) mit Reifen-Fahrwerk, drei Lenkachsen, versetzte Fahrspuren möglich (Hundegang)
- i) Trägerfahrzeug mit Drei-Rad-Reifenfahrwerk
- j) Trägerfahrzeug mit Fünf-Rad-Reifenfahrwerk

Da Radfahrwerke in der Landwirtschaft am Häufigsten eingesetzt werden, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit speziell auf diese Fahrwerkskonzeption näher eingegangen.

2.1.3 Konstruktiver Aufbau von Radfahrwerken

Bei Radfahrwerken lassen sich wesentliche konstruktive Bauteile erkennen: die Radaufhängung, eventuell die Antriebswelle, die Radnarbe, das Rad (Radscheibe + Felge) und die Bereifung. Das starre Rad und die flexible Bereifung bilden zusammen den Reifen. In der Abb. 2-2 sind die wichtigsten Reifenabmessungen dargestellt.



Abb. 2-2: Wichtige Reifenabmessungen für die Reifenkennzeichnung (SEUFERT, 2004)

Außendurchmesser:	Reifendurchmesser an der äußersten Stelle der Lauffläche.
Querschnittsbreite:	Abstand zwischen den Außenseiten der Seitenwände eines Reifens, ausschließlich der Erhöhungen durch Beschriftung, Zierrippen und Scheuerleisten.
Querschnittshöhe:	Die halbe Differenz zwischen Außendurchmesser und Felgendurchmesser.
Statischer Halbmesser:	Abstand zwischen Felgenmittelpunkt und Fahrbahnoberfläche.
Felgen-Maulweite:	Der Abstand zwischen den Felgenhörnern.

2.1.3.1 Aufbau des Rades

Ein Rad besteht aus den beiden Bestandteilen **Felge** und **Radscheibe**, die demontierbar oder fest miteinander verbunden sind. Die Felge ist der ringförmige Teil des Rades, auf der

die Bereifung montiert wird, die Radscheibe das Verbindungsteil zwischen Felge und Achsnabe mit der Mittenbohrung und den Bolzenlöchern.

Generell werden in der Landwirtschaft zwei **Felgentypen** verwendet: die Tiefbettfelge (Schulterneigung¹ von 5°) mit einem hohen Felgenhorn für die seitliche Abstützung des Felgenwulstes und die Steilschulter-Tiefbettfelge (Schulterneigung von 15°) mit einem flachen Felgenhorn. Der Vorteil der Steilschulter-Tiefbettfelgen liegt in dem besonders festen Aufpressen des Reifenwulstes auf die Felgenschulter infolge der Schulterneigung, womit eine sichere Abdichtung schlauchloser Reifen gewährleistet und ein Scheuern der Reifenwulste verhindert wird. Auch „Hump-Felgen“ verhindern durch eine auf der Felgenschulter, nahe des Tiefbettes, rundumlaufende gewalzte Erhöhung (Hump), dass starke Seitenkräfte den Reifenwulst schlauchloser Reifensystemen von der Felgenschulter ins Tiefbett drücken. Grundsätzlich kann der Felgenquerschnitt symmetrisch oder unsymmetrisch sein (CONTINENTAL, 2005; VREDESTEIN, 2004). Die Einpresstiefe² nimmt Einfluss auf die Spurweite und wird in Abhängigkeit von der Maschinenverwendung gewählt. Die in der Landwirtschaft verwendeten Felgen unterliegen Normkriterien, wie z. B. das ETRTO-Standard Manual (1996) und die DIN 7827 (1984), welche die Felgenbezeichnungen und -abmessungen regeln.

Die **Radscheibe** als Verbindung zwischen Felge und Achsnabe wird auf dem Flansch der Radnabe mit Muttern oder Schrauben befestigt. Dazu muss die Radscheibe ein Lochbild aufweisen, dass an die Bolzen- und Radnabenkonfiguration angepasst ist (TRELLEBORG, 2007; VREDESTEIN, 2004).

2.1.3.2 Bereifungsaufbau, Konstruktionsarten und Reifenkategorien

Im Allgemein besteht die Bereifung bzw. ein luftgefüllter Gummireifen aus der profilierten Lauffläche (Oberbau), der Seitenwand, der Karkasse (Gewebeunterbau) und dem Wulst (Abb. 2-3, a).

Der **Wulst** dient der Fixierung des Reifens auf der Felge, indem er sich fest gegen das Felgenhorn presst. Der Wulstkern besteht aus gummierten, gewickelten Stahldrahtsträngen, die gegen Beschädigung durch die Montage zusätzlich durch ein Schutzband geschützt sind. Die Abstimmung des Wulstdurchmessers auf den Felgendurchmesser ist für den Sitz des Reifens, die Luftdichtigkeit bei schlauchlosen Varianten und die Sicherheit gegen Wandern des Reifens auf der Felge von Bedeutung.

¹ Felgen-Schulter: Sitzfläche für Reifenwulst

² Abstand der Nabenflanschfläche von der Felgenmitte

Die **Karkasse** ist das aus gummiertem Cordgewebe aufgebaute Gerüst eines Reifens. Dieser Unterbau bestimmt die Reifenfestigkeit. Die Corde oder Cordfäden werden in Lagen übereinander gelegt. Sie sind in Gummi eingebettet, damit die einzelnen Cordfäden fixiert sind und zwischen den Corden keine Berührungspunkte bestehen, die ein Scheuern verursachen könnten. Dabei kann das Gewebe aus Rayon, Nylon, Kunstseide, Polyester, Kevlar oder Stahldraht bestehen (BACHFISCH & HEINZ, 2000).

Das **Profil** besteht aus Vollgummi und bildet die Lauffläche des Reifens. Es differenziert sich in das Profilpositiv (Stollen) und das Profilnegativ (Stollenzwischenräume). Je nachdem für welches Fahrzeug und für welchen Zweck die Reifen gedacht sind, gibt es verschiedene Ausführungen des Profils. Bei landwirtschaftlichen Triebreifen sind die Profilstollen schräg zur Reifenmitte angeordnet (Querrillenprofil). Ziel der Profilierung ist einerseits die verlustarme Übertragung von Antriebskräften und andererseits eine optimale Selbstreinigung des Reifens. Mit dem Reifentyp und der Reifengröße variiert die Anzahl der Stollenpaare und das Profildesign (Profilform, Verhältnis Profilpositiv zu Profilnegativ, Profiltiefe etc.). Aktuell gibt es ca. 50 verwendete Profile für die unterschiedlichen Kategorien der Landwirtschaftsreifen (SCHWANGHART, 2006).

Die **Seitenwand** bzw. **Reifenflanke** besteht wie auch das Profil aus Vollgummi und hat den Zweck, die Karkasse vor mechanischer Beschädigung zu schützen. Zudem trägt sie die Reifenkennzeichnung.

Bezüglich des Karkassenaufbaues lassen sich zwei Konstruktionsarten voneinander unterscheiden (DEMMELE, 1998): der Diagonal- und der Radialreifen (Abb. 2-3, b).

Beim Aufbau von **Diagonalreifen** sind die Cordlagen der Karkasse sich kreuzend übereinander gelegt. Die Gewebefäden bilden so mit der Fahrtrichtung des Reifens einen spitzen Winkel von 30 - 40° (diagonal angeordnet). Die Lagenanzahl in der Lauffläche und Seitenwand ist konstruktionsbedingt gleich. Von dem Winkel und der Anzahl der Cordeinlagen hängt direkt die Karkassensteifigkeit ab: Je kleiner der Winkel ist und je mehr Cordeinlagen verarbeitet sind, desto härter wird die Einfederung der Karkasse (geringerer Fahrkomfort) und desto größer die Seitenstabilität. Aus einer größeren Seitenstabilität resultiert eine höhere Zugkraftbelastbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Verletzungen (WEIßBACH, 2003).

Demgegenüber besteht der Aufbau von **Radialreifen** aus 2 Bauteilen: der Karkasse und einem weiteren Cordgürtel. Die Cordfäden der Karkasse verlaufen in geringer Anzahl ohne sich zu kreuzen radial von Wulst zu Wulst, d. h. in einem Winkel von 90° zur Fahrtrichtung. Zur Erreichung der Umfangsstabilität wird ein Gürtel zwischen der Karkasse und der Lauffläche des Reifens aus mehreren Lagen Textil-, Stahl- oder Aramidgewebe verwendet (BACHFISCH & HEINZ, 2000). Die Fäden in diesem Gürtelgewebe sind in einem Winkel von

etwa 20° zur Fahrtrichtung angeordnet und verlaufen somit sich in einem spitzen Winkel kreuzend zueinander. Diese Konstruktion verleiht dem Gürtel eine hohe Zugfestigkeit und eine sehr geringe Verformungsenergie beim Abrollvorgang. Die Einfederung des Radialreifens beschränkt sich hauptsächlich auf die Reifenflanke (Walkzone³), da dort eine geringe Karkassensteifigkeit vorliegt. Ferner sorgt die Gürtelkonstruktion für eine erhöhte Stabilität der Profilstollen beim Eingriff und erzielt eine höhere Traktion (TRELLEBORG, 2007). Insgesamt ist daher der Rollwiderstand gegenüber vergleichbaren Diagonalreifen auf nachgiebiger Fahrbahn geringer. Allerdings sind die Reifenflanken stärker beansprucht und anfälliger gegen mechanische Verletzungen.

Während in Deutschland bis Anfang der 90er Jahre der Diagonalreifen bevorzugte Verwendung fand, lag im Jahr 2004 der Anteil der Radialreifen bei der Erstausrüstung von Ackerschleppern wegen der vielen Vorteile beim Einsatz auf dem Feld und hinsichtlich der Anteile an Straßenfahrten bei ca. 95 %. Im Ersatzgeschäft beträgt der Anteil hingegen nur 67 % (SCHWANGHART, 2006).

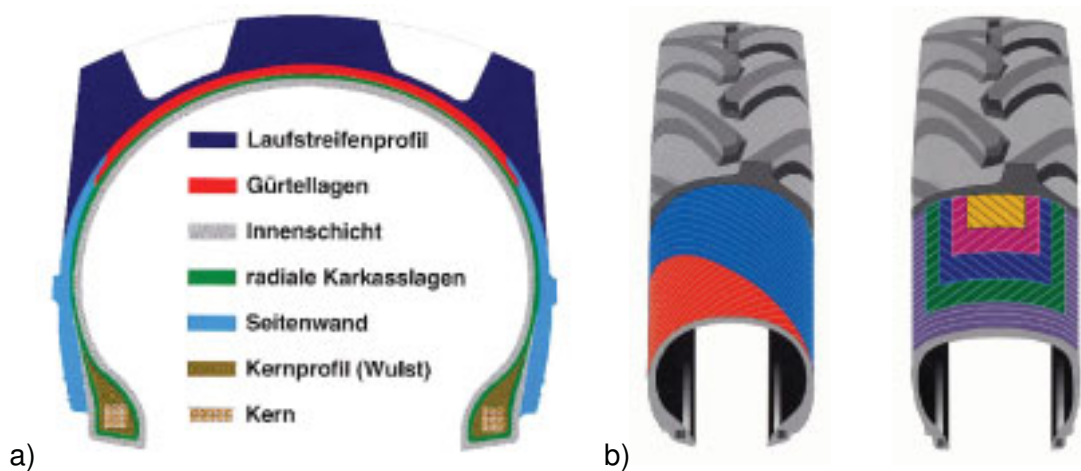


Abb. 2-3: Darstellung eines Luftreifens im Querschnitt (a) und konstruktiver Aufbau von Reifen (b): Diagonalreifen (links), Radialreifen (rechts) (BARUM, 2003)

Zusätzlich werden Reifen für den landwirtschaftlichen Einsatz in die Ausführungsformen Trieb-, Lenk-, Mehrzweck- und Implementreifen eingeteilt (CONTINENTAL, 2005; DISERENS & SPIESS, 2005). Die Konzeption dieser Kategorien basiert auf den unterschiedlichen Anforderungen ihrer Einsatzbedingungen. Die Reifen werden zudem durch das Verhältnis von Reifenbreite zur Flankenhöhe in Pflege-, Standard-, Breit- und Großvolumenreifen (Terrareifen) gruppiert (DISERENS, 2002; ESSER et al., 2000; KTBL, 1998; VDI, 2006).

³ Walken: Verformungsarbeit des Reifens beim Durchlaufen der dynamische Kontaktfläche (Latsch)