Lastverteilungspläne für Forwarder

Günther Weise
Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V., Groß-Umstadt

Die aus dem gewerblichen Güterkraftverkehr bekannten Lastverteilungsdiagramme wurden zur Beurteilung der Ladekapazität eines Forwarders herangezogen. Um die Schwerpunktlage der Holzzuladung in das Diagramm einbeziehen zu können, wurde eine vollständige Beladung des Rungenkorbquerschnitts angenommen und daraus die Belastung linear modelliert. Zur Verbindung der Beladungsrechnung mit der Berechnung der Achstragfähigkeit in einem Diagramm musste bei der Darstellung der zulässigen Achslasten eine Koordinatentransformation vorgenommen werden, damit im Diagramm die dem Nutzer einsichtigere Sortimentslänge der Zuladung verwendet wird. Mit diesem angepassten Lastverteilungsdiagramm können die mögliche Zuladung, Auslastbarkeit, mögliche Sortimente und Ladungsüberstand bestimmt werden. Das Verfahren gibt dem Anwender neben der möglichen Zuladung weitere wesentliche Informationen wie Achslastverteilung, Zuladungsgewicht und Fahrzeuggesamtmasse. Das Verfahren hat Eingang in die Prüfarbeit des KWF gefunden und wird auch in der Entwicklung von Forstmaschinen eingesetzt.

Schlüsselwörter
Lastverteilungsplan, Fahrzeugauslastung, Beladungsrechnung, Simulation

Einleitung

Hintergrund der vorliegenden Arbeit ist die Beurteilung der Auslastbarkeit von Forwardern. Forwarder (**Bild 1**) dienen in der vollmechanisierten Holzernte dem Transport des gefällten und abgelängten Holzes vom Fällort zum Holzsammelplatz, wo die Abschnitte in der Regel vom LKW übernommen werden. Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, welche Zuladung für die jeweiligen Holzlängen mit dem Fahrzeug zulässig ist. Herstellerseitig wird in der Regel nur die Summe der Achs-Nutzlasten angegeben, die allerdings auf die Schwerpunktlage keine Rücksicht nimmt. Mit dem hier vorgestellten Verfahren kann für verschiedene Holzarten abgelesen werden, welche Zuladung für einen Forwarder tatsächlich möglich ist, welche Abschnitte geladen werden können und wie sich eine Maschine im Vergleich zu anderen auslasten lässt.

Lastverteilungspläne

Für die Beurteilung und Optimierung der Zuladung werden für gewerbliche Güterkraftfahrzeuge seit langem Lastverteilungspläne [1, 2] benutzt. Diese Pläne stellen abhängig von der Lage des Schwerpunkts der Ladung dar, welche Masse zugeladen werden darf. Hintergrund dieser Darstellung ist, dass sich die Zuladung je nach Lage des Schwerpunkts mehr auf der Vorderachse oder mehr auf der Hinterachse abstützt und diese beiden Achsen unterschiedlich belastet. Im Interesse einer wirtschaftlichen Maschinennutzung ist es nötig, die Last so anzuordnen, dass die Achsen gleichmäßig entsprechend ihrer Tragfähigkeit belastet werden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Vorderachse als Lenkachse immer ausreichend belastet wird, um die Lenkfähigkeit des Fahrzeugs zu erhalten; dies schreibt auch die StVZO vor. Etwas schärfer kann man diese Aussage in 4 Forderungen formulieren:

1. Die maximal erlaubte Zuladung bzw. das zulässige Gesamtgewicht darf nicht überschritten werden. Diese Begrenzung ergibt sich durch die Festigkeit von Rahmen und Ladeflächen und ggf. auch durch die Grenzen der StVZO
2. Die zulässige Achslast der Vorderachse darf nicht überschritten werden. Diese Grenze ergibt sich aus der technischen Tragfähigkeit der Achse; die Summe der Reifentragfähigkeiten ist zu beachten
3. Die zulässige Achslast der Hinterachse darf nicht überschritten werden. Diese Grenze ergibt sich ebenfalls aus der technischen Tragfähigkeit der Achse; die Summe der Reifentragfähigkeiten ist hier besonders zu beachten
4. Die minimal erforderliche Last auf der gelenkten Achse darf nicht unterschritten werden. Dieser Grenzwert ergibt sich daraus, dass die Lenkfähigkeit nicht mehr gegeben ist, wenn der Anteil des Fahrzeuggewichts auf der Vorderachse zu gering ist. Von den Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften und im Rahmen der Forstlichen Gebrauchswertprüfung des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik wird gefordert, dass mindestens 20 % des Fahrzeuggesamtgewichts auf der Vorderachse lastet. Der Gewichtsanteil der Vorderachse nimmt entweder dadurch ab, dass die Zuladung hauptsächlich auf die Hinterachse wirkt (sehr extrem ist dieser Effekt bei Forwardern, deren Laderaum im wesentlichen auf der Hinterachse aufgebaut ist) oder wenn der Lastschwerpunkt sich hinter der Hinterachse befindet und die Vorderachse durch den damit erzeugten Hebeleffekt entlastet wird.

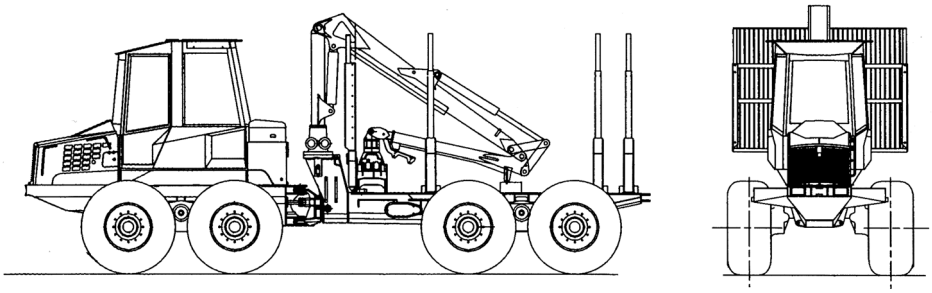

Bild 1: Typischer Forwarder (Werkbild; Bereifungsbeispiel einer Maschine der 10 t Klasse: 700/45-22,5 16 PR)

Diese 4 Forderungen können aufgrund der Hebelverhältnisse am Fahrzeug und nach den Grundsätzen der technischen Mechanik in Ungleichungen umgesetzt werden, die im folgenden dargestellt sind. Die wesentlichsten Variablen für ein vorgegebenes Fahrzeug in der Betrachtung sind die Zuladung (G_x) und der Abstand des Schwerpunkts der Last von der Vorderkante des Laderaums (im Fall eines Forwarders wird die Länge x vom Stirngitter aus gemessen). Ungleichungen ergeben sich deshalb, weil die Belastung G_x der höchsten an der Stelle x zulässigen Last entspricht. Es darf also bei einer Last, deren Schwerpunkt die Länge x von der Vorderkante des Laderaums (ab hier kann geladen werden) entfernt ist, maximal die Zuladung G_x oder weniger zugeladen werden.

$$G_x \leq m_N \tag{1}$$

$$G_x \leq \frac{G_{Vfrei} \cdot l_R}{l_R - l_K - x} \tag{2}$$

$$G_x \leq \frac{G_{Hfrei} \cdot l_R}{l_K + x} \tag{3}$$

$$G_x \leq \frac{G_{Vleer} - 0{,}2 \cdot G_{leer}}{\frac{x + l_K}{l_R} - 0{,}8} \tag{4}$$

m_N - Nutzmasse [kg]
G_x - Zuladung [kg]
G_{Vfrei} - zulässige Vorderachslast durch Zuladung [kg]
G_{Vleer} - Vorderachslast leer [kg]
G_{Hfrei} - zulässige Hinterachslast durch Zuladung [kg]
G_{leer} - Leergewicht des Fahrzeuges [kg]
x - Abstand des Ladungsschwerpunktes von der Vorderkante des Laderaums [mm]
l_R - Radstand [mm]
l_K - Abstand der Laderaumvorderkante von der Vorderachse [mm]

Die entsprechenden Kurven nach den Gleichungen (1) bis (4) sind in **Bild 2** dargestellt. Die gestrichelte Linie zeigt dabei abhängig von der Lage des Lastschwerpunkts die tatsächlich mögliche Zuladung des Fahrzeugs. Ist gewichtsmäßig Vollauslastung angestrebt, so muss sich der Lastschwerpunkt in einem relativ kleinen Bereich kurz vor der Hinterachse befinden.
Man erkennt, dass (1) an jeder Stelle der Ladefläche eine Zuladung bis zum zulässigen Gesamtgewicht erlaubt.
Die Ungleichung (2) beschreibt ein Gebiet mit einer hyperbolischen Kurve als Grenzlinie, die mit dem Abstand des Lastschwerpunkts zur Vorderachse ansteigt und damit eine wachsende Zuladung erlaubt. Dies ergibt sich daraus, dass mit steigendem Abstand des Lastschwerpunkts von der Vorderachse die Belastung der Vorderachse sinkt.
Eine ähnliche Grenzlinie aber mit zunehmender zulässiger Zuladung mit größerem Abstand zur Hinterachse beschreibt Ungleichung (3).
Auch Ungleichung (4) beschreibt eine ähnlich abgegrenztes Gebiet. Je weiter der Lastschwerpunkt von der Vorderachse entfernt liegt, desto stärker ist die Entlastung und desto weniger darf zugeladen werden.

Modellierung der Zuladung

Insgesamt ergibt sich, dass für die optimale Zuladung der Schwerpunkt der Last in einem relativ engen Bereich liegen muss, damit sich die Last auf beide Achsen optimal verteilt und die erlaubte Zuladung ausgenutzt werden kann. Bei einem Forwarder ist der Lastschwerpunkt aufgrund der Art der Zuladung in Form von Rollen und Stämmen festgelegt, man kann im wesentlichen davon ausgehen, dass er sich in der Mitte der zugeladenen Sortimentslängen befindet. Die Veränderungen, die sich aufgrund der Abholzigkeit (d.h. Durchmesserabnahme von Holzstämmen zur Baumkrone hin) ergeben sind dabei vernachlässigbar. Die Zuladung berechnet sich dann in folgender Weise:

$$G_x = A_R \cdot f \cdot \rho \cdot s \tag{5}$$

Darüber hinaus besteht die schon beschriebene Beziehung zwischen der geladenen Sortimentslänge und der Lage des Schwerpunkts:

$$s = 2 \cdot x \tag{6}$$

Die einzelnen Bezeichnungen bedeuten in diesem Fall:

G_x - Zuladung [kg]
A_r - Querschnittsfläche des Rungenkorbs [m²]
f - Füllungsgrad des Rungenkorbquerschnitts
ρ - Holzdichte [kg/m³]
x - Abstand des Ladungsschwerpunkts von der Vorderkante des Laderaums [m]
s - Sortimentslänge [m]

Die Gleichung 5 beschreibt eine Gerade, die vom Querschnitt des Rungenkorbs, der Holzdichte (wir gehen von waldfrischem Holz mit einer Feuchte von ca. 25 % - 30 % aus), dem Füllungsgrad (Umrechnung von Raummetern in Festmeter, d.h. Berücksichtigung der Tatsache, dass die Holzabschnitte den Querschnitt des Laderaums nicht vollständig ausfüllen) und der Sortimentslänge abhängt. Als Querschnitt des Rungenkorbs betrachten wir die von den Rungen umschlossene Fläche bis zur Höhe des Stirngitters (vorderes Abschlussgitter des Laderaums; siehe auch Bild 1). Damit ist beschrieben, welche Zuladung ein Forwarder in Abhängigkeit von der Sortimentslänge aufnimmt, wenn die Maschine bis zur Stirngitteroberkante beladen wird und man dann die Sortimentslänge variiert. Wenn man dies beispielhaft an einer Maschine darstellt ergibt sich **Bild 3**.
An dieser Maschine ergeben sich insgesamt 4 Geraden für das Gewicht der Zuladung in Abhängigkeit von der Sortimentslänge. Die beiden unteren gelten für Nadelholz und die beiden oberen für Laubholz. Die Tatsache, dass für jede Holzart zwei Geraden aufgetragen sind begründet sich dadurch, dass die Rungen in der Breite verstellbar sind und daher

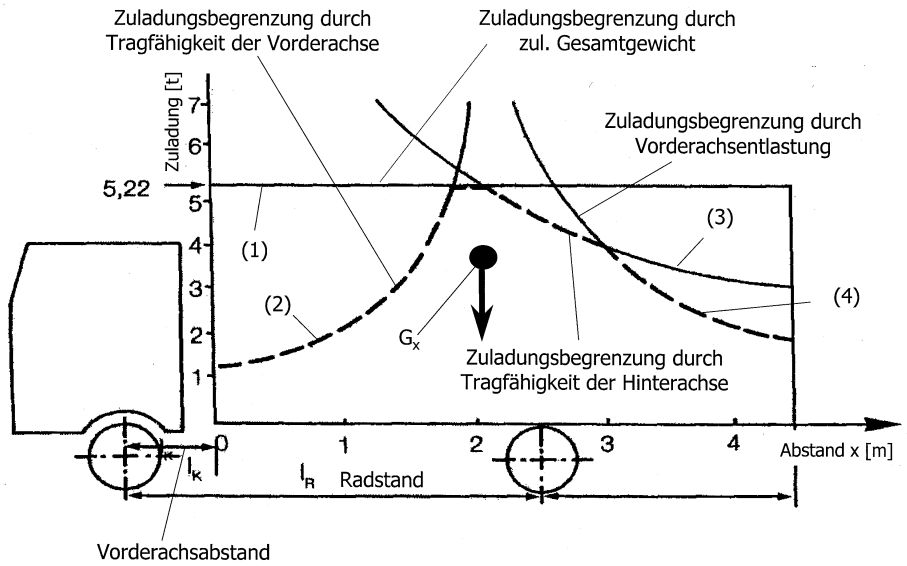

Bild 2: Zulässige Zuladungen in Abhängigkeit von der Lage des Lastschwerpunkts nach Gleichungen (1) – (4) (nach /1/ verändert)

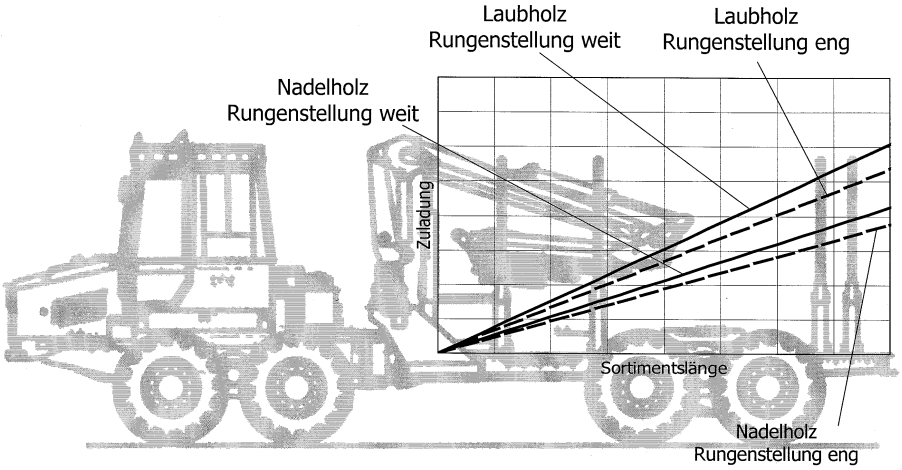

Bild 3: Zuladungsgewicht von Laub und Nadelholz in Abhängigkeit von der Sortimentslänge bei vollständig gefüllten Rungenkorb für einen Forwarder nach Gleichung (5)

der minimale und der maximale Querschnitt des Laderaums zu beachten sind. Für die weitere Betrachtung liegt damit die Beladung der Maschine vor.

Kombiniertes Lastverteilungsdiagramm mit Zuladung

Es liegt nahe, die beiden vorgestellten Diagramme zu vereinigen, um so die Auslastbarkeit eines Forwarders zu beurteilen. Hierbei ergibt sich noch ein Problem, da das Gewicht der Holzzuladung von der Sortimentslänge als Variable abhängt, der Schwerpunkt sich aber näherungsweise auf der halben Sortimentslänge befindet. Damit muss eine der beiden Darstellungen gemäß Gleichung (6) an die andere angepasst werden. Aus Gründen der Verständlichkeit wird die Darstellung der zulässigen Zuladungen angepasst, so dass die Länge x die Sortimentslänge bedeutet. Diese Anpassung bedeutet, dass auf der Längenachse statt des Abstands des Schwerpunkts immer der doppelte Abstand aufgetragen wird, dieser Diagrammteil also verzerrt wird. Werden nun die Geraden der Zuladung (Zuladungsgewicht in Abhängigkeit von der Sortimentslänge) in dieses verzerrte Diagramm eingetragen, ergeben sich an den Schnittpunkten der Geraden mit den Kurven der maximal zulässigen Belastung die maximal erreichbaren Zuladungen und die Sortimentslängen mit denen diese erreicht werden können. Dies ist in **Bild 4** dargestellt. Man erkennt, dass in dem gezeigten Fall eine vollständige Auslastung der Maschine nur mit Laubholz möglich ist. Bei Nadelholz dagegen wird wegen der ungünstigen Schwerpunktlage der längeren Sortimente die Tragfähigkeit der Hinterachse bereits überschritten ehe die zulässige Zuladung überhaupt erreicht wird. Damit verfügen wir nun über ein recht anschauliches Werkzeug zur Beurteilung der Auslegung der Maschinen. Bei dem hier vorgestellten Beispiel ist zu erkennen, dass die Auslegung für Laubholz optimiert wurde. Wird die Maschine dagegen mit Nadelholz beladen (die untere Gerade), so erkennt man, dass für die maximal mögliche Zuladung bereits Sortimente gewählt werden müssen, die länger sind als der Rungenkorb. Darüber hinaus sieht man, dass die Gerade für Nadelholz die Begrenzungslinie schneidet, die durch die maximale Hinterachslast gezogen ist, ehe sie die vom Hersteller erlaubte maximale Zuladung erreichen. Die Maschine kann also mit Nadelholz nicht vollständig ausgelastet werden, zudem ragt das Sortiment bei maximaler Beladung erheblich über den hinteren Rand des Rungenkorbs hinaus. Weiterhin ist klar zu erkennen, dass bei einer korrekten Auslegung des Forwarders der wesentliche begrenzende Faktor die Tragfähigkeit der Hinterachse darstellt. Wenn die Auslegung jedoch weniger günstig erfolgt, insbesondere wenn der Rungenkorb zu weit hinten angeordnet ist, dann ergibt sich einerseits sehr rasch eine Überlastung der Hinterachse, andererseits wird dann die minimal geforderte Vorderachslast (20 % der Fahrzeuggesamtmasse) in der Regel der zuladungsbegrenzende Faktor.

Die entsprechenden Rechenformeln wurden für die Verwendung in Excel aufbereitet und um einige Funktionen für Achslasten und Zuladung ergänzt, so dass nach Eingabe der Maschinendaten ein Lastverteilungsdiagramm für Laub- und Nadelholz abgelesen werden kann und alle wesentlichen Daten in einer Tabelle zusammengefasst sind. Diese Tabelle ist nachfolgend beispielhaft wiedergegeben (**Tabelle 1**), ebenso sind in **Bild 5** und **6** Diagramme für eine günstige und eine weniger günstige Auslegung von Forwardern wiedergegeben.

So lässt sich in Bild 5 erkennen, dass die Gerade der Holzzuladung für Laubholz die maximale Zuladung erreicht, ehe eine Begrenzung der Achslasten erreicht wird. Zudem ragt das Laubholz nicht hinten aus dem Rungenkorb hinaus. Bei Beladung mit Nadelholz kann die zulässige Lademasse nicht ganz ausgeschöpft werden, da vorher die Tragfähigkeit der Hinterachse überschritten wird; das Holz würde bei der maximal möglichen Zuladung auch etwas über den Rungenkorb hinausragen. Jedoch ist der Verlust an Zuladung nur gering und auch die Überlänge birgt noch nicht die Gefahr, dass Ladung verloren geht.

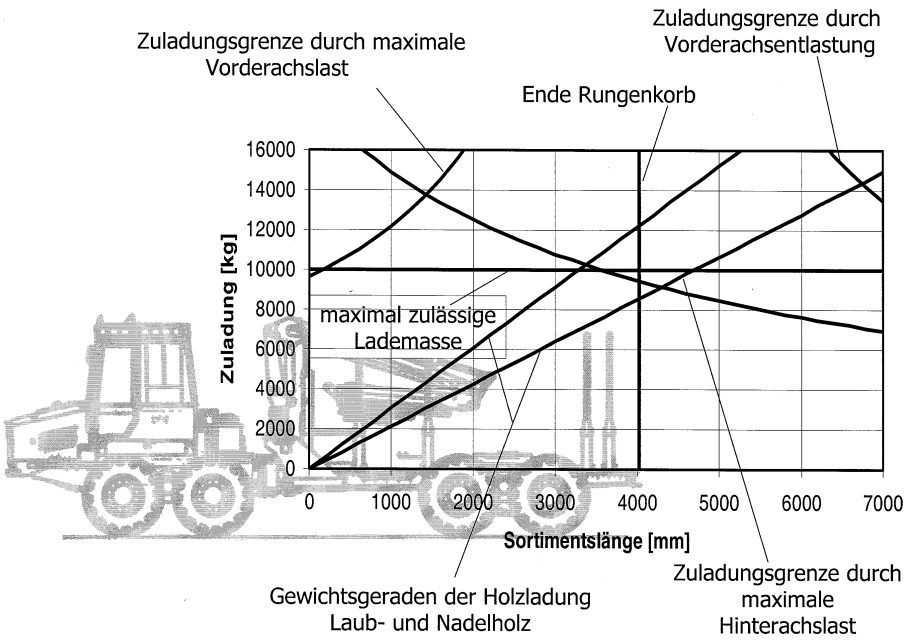

Bild 4: Angepasstes Lastverteilungsdiagramm und Zuladungsgewicht für einen Forwarder; dargestellt ist das Zuladungsgewicht als Funktion der Länge des geladenen Holzes; die Lage des Diagramms gibt den Ort der Holzladung wieder (Beladung ab Laderaumvorderkante)

Tabelle 1: Ausgabetabelle für die Forwarderbewertung aufgrund der Algorithmen der Lastverteilungsdiagramme

Typ		Abstand von der Senkrechten durch die Vorderachsmitte zur laderaumseitigen Stirngitterkante [mm]	2695
Nutzmasse [kg]	14000	Länge des Rungenkorbs längste Stellung [mm]	3885
Leermasse [kg]	16960	Querschnitt des Rungenkorbs eng [m²]	
Vorderachslast leer [kg]	9700	Querschnitt des Rungenkorbs weit [m²]	4,53
Vorderachslast zulässig [kg]	14000	Spezifisches Gewicht von Nadelholz [kg/m³]	700
Hinterachslast leer [kg]	7260	Spezifisches Gewicht von Laubholz [kg/m³]	1000
Hinterachslast zulässig [kg]	21000	Füllungsgrad Rungenquerschnitt	0,7
Radstand [mm]	4970		
Auslastung Nadelholz [%]	88,8	Auslastung Laubholz [%]	99,7
Sortimentslänge bei Maximalauslastung Nadelholz [mm]	5599	Sortimentslänge bei Maximalauslastung Laubholz [mm]	4400
Gesamtmasse bei Maximalauslastung Nadelholz [kg]	29388	Gesamtmasse bei Maximalauslastung Laubholz [kg]	30911
Lademasse Nadelholz [kg]	12428	Lademasse Laubholz [kg]	13951
Ladevolumen Nadelholz [Fm]	18	Ladevolumen Laubholz [Fm]	14
Achslast vorne Nadelholz [kg]	8388	Achslast vorne Laubholz [kg]	9911
Achslast vorne Nadelholz [%]	29	Achslast vorne Laubholz [%]	32
Achslast hinten Nadelholz [kg]	21000	Achslast hinten Laubholz [kg]	21000
Achslast hinten Nadelholz [%]	71	Achslast hinten Laubholz [%]	68

Im Bild 6 dagegen kann die maximal zulässige Zuladung nur erreicht werden, wenn man die Vorderachse unzulässig entlastet, ein Hinweis darauf, dass der Rungenkorb zu weit hinten am Fahrzeug angebracht ist und der Schwerpunkt des Fahrzeugs weiter nach vorne verlagert werden müsste (eine denkbare Lösung wäre das Anbringen von Ballastgewichten). Aufgrund des geringeren Querschnitts des Rungenkorbs verlaufen auch die Geraden der Zuladung in diesem Fall flacher, so dass Holz bei Ausnutzung der maximal möglichen Zuladung weiter über den Rungenkorb hinausragt als im vorigen Fall. Darüber hinaus wird sowohl bei Laub- als auch bei Nadelholz, ehe die maximal zulässige Beladung erreicht werden kann, die Hinterachse überlastet. Sie kann daher in keinem Fall genutzt werden und ist somit als technische Angabe wertlos.

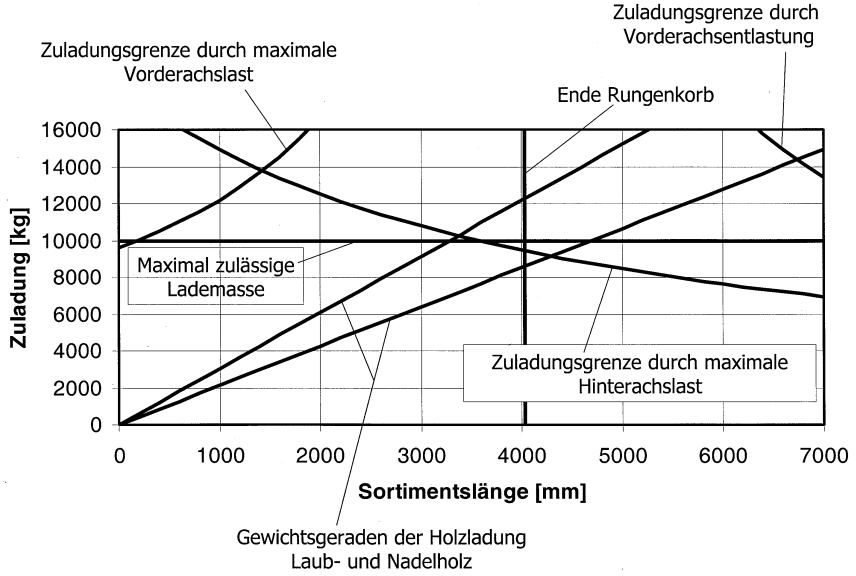

Bild 5: Günstige Forwarderauslegung; Nennzuladung mit Laubholz erreichbar und mit Nadelholz beinahe erreichbar; bei Erreichen der Zuladungsgrenze ragt das Holz kaum über das Ende des Rungenkorbs hinaus

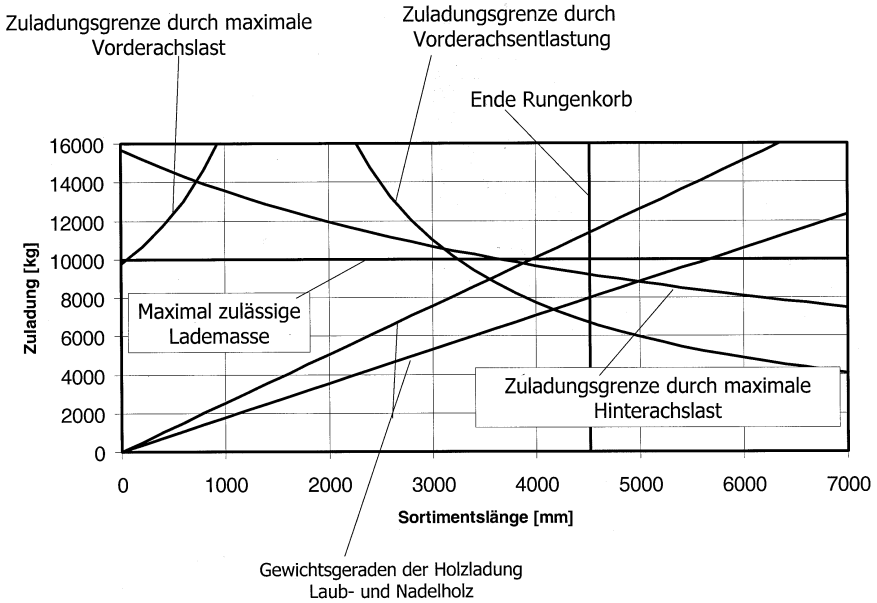

Bild 6: Ungünstige Forwarderauslegung; Nennzuladung mit Laubholz und mit Nadelholz nicht erreichbar, da die zulässige Hinterachslast aufgrund ungünstiger Schwerpunktslage der Ladung überschritten wird

Fazit

Mit der hier vorgestellten Anwendung der aus dem gewerblichen Güterverkehr bekannten Lastverteilungsdiagramme und der Verbindung mit einer Darstellung der sortimentsabhängigen Zuladung liegt ein sehr effektives Werkzeug vor, um die Auslegung und Auslastbarkeit eines Forwarders beurteilen zu können. Der Anwender erkennt für Laub- und Nadelholz die maximal mögliche Zuladung sowohl in Kilogramm als auch in Gesamtsortimentslänge und kann dann die Beladung entsprechend planen. Darüber hinaus ist ein rascher und aussagekräftiger Vergleich unterschiedlicher Maschinen möglich, der weit über die meist nur angegebene maximale Zuladung hinaus geht.

Literatur

[1] Lieber H.; Woda, A.: Technologie des Straßentransports. München, Vogel 1992

[2] Hoepke, E. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg 2000

Autor

Dr. Günther Weise
Kuratorium f. Waldarbeit und Forsttechnik e. V.
Spremberger Str. 1
64820 Groß-Umstadt
Tel.: +49/(0)6078/785-13(-0)
Fax: +49/(0)6078/785-50
E-mail: weise@kwf-online.de