

**Anpassung der Nutzlasten für
Parkhäuser nach DIN 1055-3 an die
aktuelle Entwicklung gesteigener
Fahrzeuggewichte**

T 3249

T 3249

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8437-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Anpassung der Nutzlasten für Parkhäuser nach DIN 1055-3 an die aktuelle Entwicklung gestiegener Fahrzeuggewichte

Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Forschungsbericht F09-15-2009



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

**Institut für Massivbau
Fachgebiet Massivbau**

Fachbereich 13
Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Petersenstr. 12
64287 Darmstadt
Telefon (06151) 16 2144
Telefax (06151) 16 3044
graubner@massivbau.tu-darmstadt.de

Forschungsbericht

F09-15-2009

Projekt **Anpassung der Nutzlasten für Parkhäuser nach DIN 1055-3 an die
aktuelle Entwicklung gestiegener Fahrzeuggewichte**

Berichtszeitraum 01.06.2009-30.11.2009

beauftragt durch Deutsches Institut für Bautechnik
Dipl.-Ing. Jasch
Kolonnenstr. 30 L
10829 Berlin

ausführende Stelle Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau,
Dr.-Ing. Holger Schmidt, Dipl.-Ing. Martin Heimann

Darmstadt, 10.12.2009

Dr.-Ing. H. Schmidt

Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens war es, die in DIN 1055-3 für Parkhäuser angegebenen Nutzlasten an das in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegene Fahrzeuggewicht anzupassen. In diesem Zusammenhang wurden am Parkhaus Hauptwache in Frankfurt am Main eigene Lastmessungen an Kraftfahrzeugen durchgeführt und die Ergebnisse mit Angaben des Kraftfahrtbundesamtes verglichen. Die durch die Lastmessungen erhaltene Verteilung der aktuellen Fahrzeuggewichte ermöglichte es, die gleichförmig verteilten Parkhauslasten in Abhängigkeit der Bezugsfläche auf der Grundlage numerischer Simulationstechnik zu bestimmen. Aufbauend hierauf wurden die für die normative Umsetzung erforderlichen jährlichen Extremwerte der Parkhauslasten bestimmt. Erwartungsgemäß ergaben sich auf Grundlage der aktuellen Lastmessungen aus dem Jahr 2009 in allen Bereichen höhere Lastwerte, als nach DIN 1055-3 auf Grundlage von Lastmessungen aus den Jahren 1972/73. An die Ergebnisse des aktualisierten Lastmodells wurden abschnittsweise konstant verlaufende Ersatzlasten angepasst und ein entsprechender Vorschlag für eine stützweitenabhängige Lastangabe formuliert.

Abstract

The current load values for traffic loads in car parks given by the German Standard DIN 1055-3 are based on load measurements of the early 1970ies. Because the car weights have increased significantly during the last decades, the respective loads given by the standard have to be modified. Therefore load measurements of vehicle weights have been realised at a multi-storey car park in Frankfurt am Main/Germany. The results have been compared to statistical data given by the Federal Statistical Office of Germany. With the information given by the cumulative distribution function of the measured vehicle weights, it was possible to calculate the uniformly distributed traffic loads as well as the annual extreme values for multi-storey car parks with the help of numerical simulations. As expected, the updated load values are higher than the load values given by the German Standard DIN 1055-3, based on out of date measurements in the years 1972/1973. On the basis of the updated load model, equivalent uniformly distributed loads have been adapted and a proposal for traffic loads dependent on the distance between the supports of the structural system has been presented.

Résumé

L'augmentation continue du poids propre des voitures neuves au cours des années nécessita la vérification des modèles normatives de chargement des parkings couverts. Ainsi, l'objectif du projet de recherche fut l'adaptation des charges d'exploitation définies pour les parkings à étages dans la norme allemande DIN1055-3 ("poids propres et charges d'exploitation", chapitre 6.3). Dans le cadre de cette démarche l'Université de Darmstadt effectua des relevés des charges des véhicules dans le parking couvert du „Hauptwache” à Francfort/Main en 2009. Les valeurs trouvées lors de ces sondages furent comparées avec des données correspondantes du Kraftfahrzeugbundesamt, KBA (l'office fédérale pour la circulation des véhicules à moteur). Une fois que la distribution typique du poids des voitures modernes fut connue sur la base des valeurs mesurées, l'application des méthodes numériques de simulation permit la définition des charges uniformément réparties relatives à la surface concernée. Ensuite, les valeurs annuelles extrêmes des charges purent être déterminées correspondant à la procédure de la normalisation. Conforme aux attentes, les valeurs obtenues sur la base des sondages de 2009 dépassent tous les efforts normatifs de l'ancien DIN 1055-3 datant des essais des années 1972/73. Pour la standardisation, les résultats du modèle de chargement servirent à l'ajustement des charges équivalentes sectoriellement constantes. Finalement, une proposition correspondante pour définir les efforts par rapport à la portée des structures concernées fut formulée.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Stand der Normung.....	5
3	Entwicklung der Fahrzeuggewichte	7
4	Lastmodell nach Marten	10
4.1	Vorbemerkungen.....	10
4.2	Stochastisches Modell.....	10
5	Lastmessungen an Kraftfahrzeugen	15
5.1	Vorbemerkungen.....	15
5.2	Ergebnisse der Lastmessungen	16
5.3	Ergebnisse der Parkhausbelegung	20
6	Simulation von Parkhausbelegungen	21
7	Datenanwendung am Lastmodell	24
7.1	Verteilung der gleichförmig verteilten Parkhauslast.....	24
7.2	Extrema der gleichförmig verteilten Parkhauslast	27
8	Datenanwendung am Stützweitenmodell	30
8.1	Vorbemerkungen.....	30
8.2	Zuordnung der Bezugsfläche zu Stützweiten	31
8.3	Ermittlung der stützweitenabhängigen Berechnungslasten.....	33
9	Empfehlungen zur Anwendung in DIN 1055-3.....	35
10	Zusammenfassung.....	37
11	Literaturverzeichnis	38

1 Einleitung

Bauwerke müssen derart errichtet werden, dass die Herstellungskosten möglichst gering bleiben und gleichzeitig die an das Bauwerk gestellten Anforderungen sowohl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als auch im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit ausreichender Zuverlässigkeit erfüllt werden. Diese anspruchsvolle Aufgabe kann allerdings nur dann erreicht werden, wenn die während der gesamten Nutzungsphase auf ein Bauwerk einwirkenden Lasten mit geeigneten stochastischen Modellen wirklichkeitsnah in der Berechnung erfasst und in einfach handhabbare, normative Lastwerte umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist die Prognose zukünftiger Entwicklungen der zeitvarianten Lastgeschichte eine sehr schwierige und mit großen Unsicherheiten behaftete Aufgabe, die in Abhängigkeit von der verursachenden Einwirkungsart eine kritische Überprüfung der normativen Lastwerte in regelmäßigen Zeitabständen erforderlich macht.

Die in der Baupraxis derzeit mit den normativen Regelungen in DIN 1055-3 [2] zur Verfügung stehenden Lastangaben für Parkhäuser basieren auf Lastmessungen sowie theoretischen Arbeiten, die bereits in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts durchgeführt wurden [1]. Die von dem Kraftfahrtbundesamt erfassten jährlichen Neuzulassungen belegen, dass sowohl die Durchschnitts- als auch die Maximalgewichte der Personenkraftwagen seit diesem Zeitraum deutlich angestiegen sind [9]. Die derzeit in DIN 1055-3 [2] normativ definierten Lastwerte für Parkhäuser können somit in keinem Fall eine ausreichende Zuverlässigkeit der belasteten Bauteile sicherstellen und führen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Sicherheitsdefizit bei der Bemessung. Die deutlich zu erkennende und zweifelsfrei vorhandene Tendenz der zunehmenden Fahrzeuggewichte der Personenkraftwagen macht eine kritische Überprüfung der entsprechenden Lastwerte sowie der normativen Möglichkeit einer zusätzlichen Lastabminderung in Abhängigkeit von der Einzugsfläche des belasteten Bauteils zwingend erforderlich. Die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens ist es dementsprechend, die in DIN 1055-3 [2] für Parkhäuser angegebenen Nutzlasten auf der Grundlage von eigenen Lastmessungen sowie den Informationen des Kraftfahrtbundesamtes zu modifizieren und damit das derzeit vorhandene Sicherheitsdefizit zu beheben. Auf Basis der aktuellen Informationen aus den Lastmessungen kann ein modifiziertes Nutzlastmodell entwickelt und darauf aufbauend Empfehlungen für die normative Umsetzung gegeben werden.

2 Stand der Normung

Die Festlegung von gleichmäßig verteilten Nutzlasten für Parkhäuser und Flächen mit Fahrzeugverkehr ist aktuell in der DIN 1055-3 [2] geregelt. Bis zum Jahr 2002 galten die Regelungen der Ausgabe März 1963 [8]. In dieser Fassung waren die Lastansätze in Parkhäusern für Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 2,5t in Abhängigkeit von der Stützweite geregelt. Die anzusetzende Last bei Stützweiten $l > l_0 = 3\text{m}$ bei Platten bzw. $l > l_0 = 5\text{m}$ bei Balken betrug $3,5\text{kN/m}^2$. Bei kleineren Stützweiten war der Wert der Flächenlast um die Relation von Systemnennstützweite l_0 zu vorhandener Stützweite l bis zu einem Faktor von $l_0/l \leq 1,43$ zu erhöhen. Das Einzelfahrzeug hatte eine maximal zulässige Gesamtlast von 25kN.

Im Rahmen seiner Forschungsarbeit hat Marten [1] im Jahre 1975 auf der Grundlage eines theoretischen Nutzlastmodells sowie von Lastmessungen in den Parkhäusern *Hauptwache* und *Konstablerwache* in Frankfurt am Main einen Vorschlag für eine normative Umsetzung von Parkhauslasten unterbreitet. Die anzusetzende Berechnungslast war dabei erstmals flächenabhängig definiert. In sinnvoller Zuordnung erfolgte durch Marten [1] zur Vereinfachung der Lastangabe eine abschnittsweise Definition von 2 unterschiedlichen Flächenlasten mit jeweils konstanter Lastgröße für Einzugsflächen $A \leq 50\text{m}^2$ mit $3,5\text{kN/m}^2$ bzw. $A > 50\text{m}^2$ mit $2,5\text{kN/m}^2$.

Die normative Umsetzung der flächenabhängigen Parkhauslast nach Marten [1] erfolgte sinngemäß erst in der Ausgabe der DIN 1055-3:2002-10 [7]. Allerdings wurde die flächenabhängige Berechnungslast weiterhin stützweitenbezogen definiert. Unabhängig vom statischen System erfolgte eine Einteilung für Stützweiten $l \leq 3\text{m}$ mit $3,5\text{kN/m}^2$ und $l > 3\text{m}$ mit $2,5\text{kN/m}^2$. Das Einzelfahrzeug hatte nach wie vor eine maximal zulässige Gesamtlast von 25kN. Für lokale Nachweise der direkt belasteten Bauteile wurde eine Achse mit einer Berechnungslast von 20kN formuliert.

Mit der Ausgabe der DIN 1055-3:2006-03 [2] erfolgt die Zuordnung der Berechnungslast erstmals an eine Bezugsfläche. Es gilt dabei als Abstufung der Flächen $A \leq 20\text{m}^2$ ($q=3,5\text{kN/m}^2$), $A \leq 50\text{m}^2$ ($q=2,5\text{kN/m}^2$) und $A > 50\text{m}^2$ ($q=2,0\text{kN/m}^2$). Für lokale Nachweise der direkt belasteten Bauteile ist weiterhin eine Achse mit einer Berechnungslast von 20kN anzusetzen. Die maximal zulässige Gesamtlast eines Einzelfahrzeugs ist weiterhin auf 25kN begrenzt.

Da die flächenabhängige Lastangabe in der Baupraxis kontrovers aufgenommen wurde, veröffentlichte der Normenausschuss Bauwesen im DIN (NABau) im September 2008 erneut eine Auslegung der flächenabhängigen Lastgrößen auf äquivalente Stützweiten [6]. Im Wissen um eine Zunahme der Fahrzeuggewichte wurde darüber hinaus über eine grundlegende Erhöhung der Berechnungslasten für Parkhäuser diskutiert. Eine verbindliche normative Regelung erfolgte bisher allerdings nicht.

3 Entwicklung der Fahrzeuggewichte

Die deutlich zu erkennende und zweifelsfrei vorhandene Tendenz der zunehmenden Fahrzeuggewichte der in Deutschland zugelassenen Personenkraftwagen macht eine kritische Überprüfung der Entwicklung der verschiedenen Gewichtsklassen von Fahrzeugen und des damit verbundenen normativen Lastansatzes erforderlich.

Nach Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes [10] wurden bei der Bestandszählung zum 1.1.2008 insgesamt 49,3 Mio. Kraftfahrzeuge und 5,6 Mio. Anhänger ermittelt. Über 10 Mio. Kraftfahrzeuge waren dabei allein in Nordrhein-Westfalen zugelassen. Die Kompaktklasse, auch Golf-Klasse genannt, ist in Deutschland am häufigsten vertreten (28,0 %). Die angrenzende Mittelklasse, z.B. die Mercedes C-Klasse (20,6 %) und Kleinwagen wie Ford Fiesta (19,5 %), sind ebenfalls stark vertreten. Das Segment der Sport Utility Vehicle (SUV) gewinnt darüber hinaus zunehmend an Bedeutung. Ihr Anteil an den neu zugelassenen Fahrzeugen liegt zusammen mit den Crossover SUV bei mittlerweile über 5%. Die übrigen ca. 26% setzen sich aus oberer Mittelklasse bzw. Oberklasse, Geländewagen und Transporter zusammen.

SUVs ähneln technisch üblicherweise normalen PKW, verfügen aber häufig über einen Allradantrieb. Der karosserietechnische Aufbau des Fahrzeuges ist hinsichtlich der Proportionen an den von Geländewagen angelehnt. Kleinere SUVs werden in der Automobilbranche als Crossover bezeichnet. Vorläufer dieser Modellgattung war in Deutschland in den 1970er Jahren der Range Rover. Moderne SUVs sind zum Beispiel der BMW X5, Porsche Cayenne und der Audi Q7.

In Abbildung 1 ist auf der Grundlage einer Datenbasis des Kraftfahrt-Bundesamtes [11] die Entwicklung der einzelnen Gewichtsklassen aller in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge seit 1989 aufgeführt. Dem Diagramm kann entnommen werden, dass neben der Gewichtszunahme im Bereich der Mittelklasse (von 1.400kg-1.700kg hin zu 1.700kg-2.500kg) auch ein ersichtlicher Zuwachs bei den Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von >2.500kg zu verzeichnen ist. Die Summe aller zugelassenen PKW bleibt im Zeitraum 1989-2007 nahezu konstant bei 33-35 Mio. PKW (mit Ausnahme von 1999 - 38 Mio.).

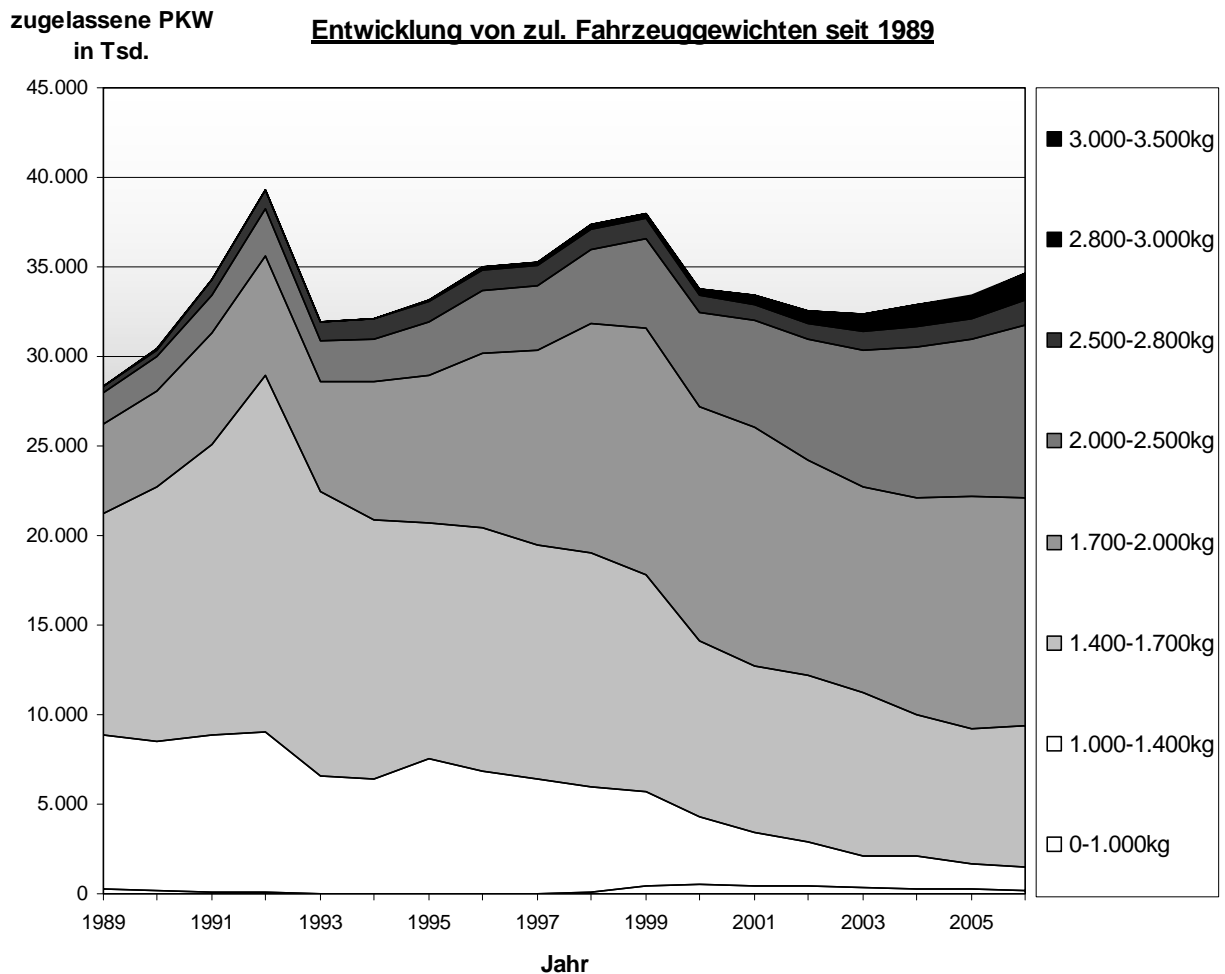


Abbildung 1: Entwicklung der zulässigen Kfz-Gesamtgewichte seit 1989 [11]

Das Kraftfahrt-Bundesamt berichtet regelmäßig über den Bestand der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zu Grunde gelegte Veröffentlichung [9] berücksichtigt die Bestandsdaten von 2007. Es werden Angaben zu den einzelnen Gewichtsklassen mit den zulässigen Fahrzeuggewichten und der Anzahl der Sitzplätze gegeben. Stellt man die in Abbildung 1 vorgenommene Klasseneinteilung der Fahrzeuggewichte für den Bestand des Jahres 2007 in einem Histogramm und einer Summenfunktion entsprechend Abbildung 2 und Abbildung 3 dar, so kann man erkennen, dass bereits ein nicht unerheblicher Anteil der Fahrzeuge (~5%) ein größeres zulässiges Gesamtgewicht aufweist, als das Bemessungsfahrzeug mit 25kN.

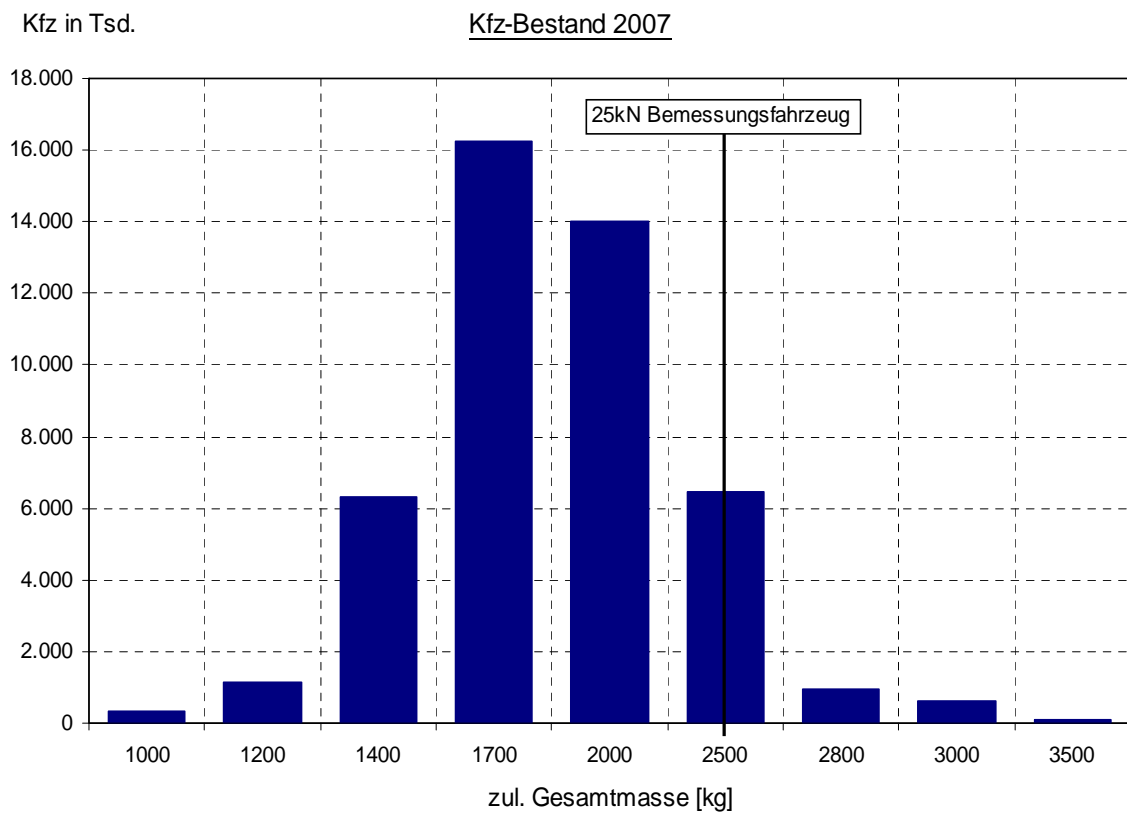


Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung des Kfz-Bestandes 2007 [9]

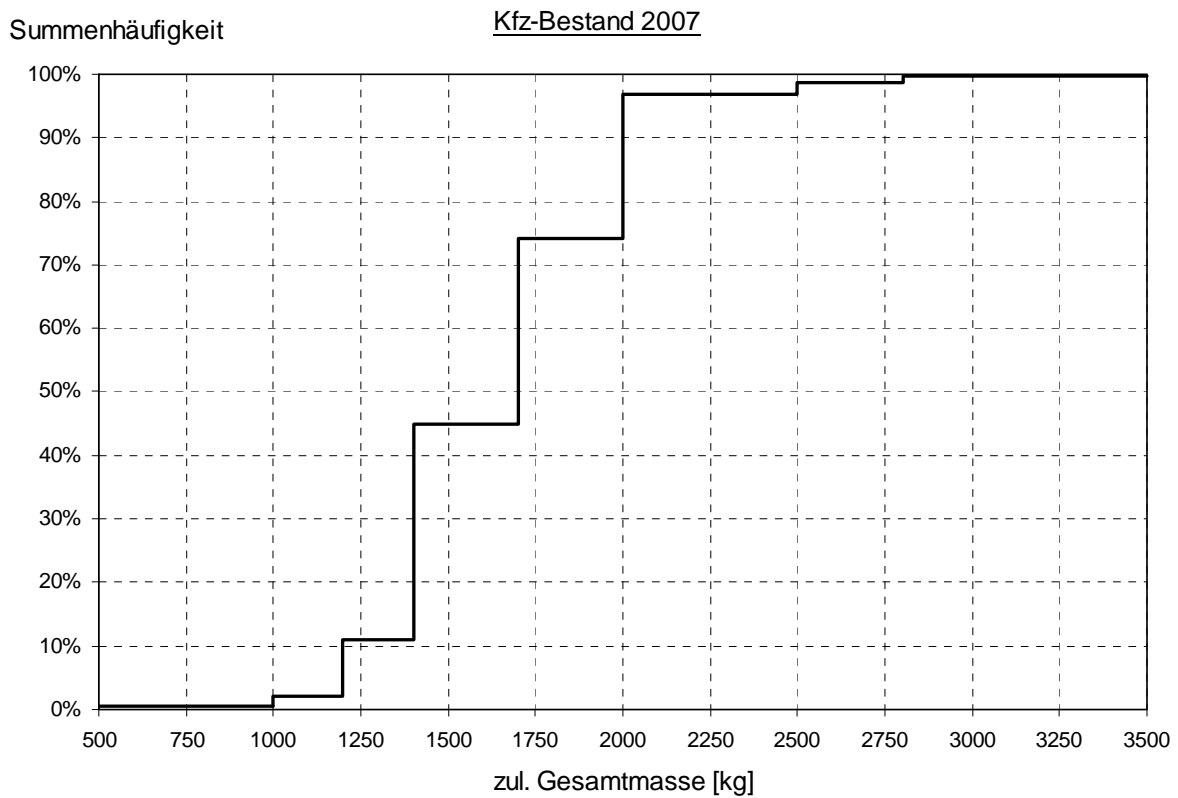


Abbildung 3: Summenfunktion des Kfz-Bestandes 2007 [9]

4 Lastmodell nach Marten

4.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens, seinerzeit gefördert durch das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, wurde von 1970 bis 1973 am Fachbereich Konstruktiver Ingenieurbau der Technischen Hochschule Darmstadt ein Modell zur wirklichkeitsnahen Abbildung von Parkhauslasten formuliert [1]. Das Modell legt dabei den Ansatz gleichförmig verteilter Nutzlasten zu Grunde, wobei die Kennzahlen des Modells an den aus Lastmessungen gewonnenen statistischen Maßzahlen kalibriert wurden. Als Ergebnis wird aufbauend auf Lastmessungen in den Jahren 1972/1973 ein Vorschlag für eine normative Nutzlastangabe der Parkhauslasten unterbreitet.

4.2 Stochastisches Modell

Bei Parkhäusern ist allgemein zwischen Parkflächen und Flächen von Fahrwegen und Rampen zu unterscheiden. Es ist zudem die Anordnung der Stellplätze (schräg oder senkrecht zur Fahrbahn) zu unterscheiden. Nutzlasten werden durch einen quasi-ständigen und einen kurzzeitig wirkenden Lastanteil beschrieben, wobei bei Parkhauslasten im Wesentlichen der kurzzeitig wirkende Nutzlastanteil dominiert. Darüber hinaus beeinflusst die Frequentierung des Parkhauses als Lastwechselrate die Häufigkeit bestimmter Grenzbelastungen.

Die zeitlichen und räumlichen Änderungen der Parkhauslasten werden als stationäre ergodische Prozesse idealisiert. Das Modell unterstellt dabei eine in jedem Punkt der betrachteten Fläche stetig verlaufende Nutzlast. Diese ist durch die Nutzlastordinate $H(x,y)$ mit zufälligen Realisierungen beschrieben. Die Funktion $H(x,y)$ ist charakterisiert durch die statistischen Kennwerte:

$$\text{Mittelwert:} \quad E(H(x,y)) = \mu_0 \quad (4-1)$$

$$\text{Varianz:} \quad \text{Var}(H(x,y)) = \sigma_0^2 \quad (4-2)$$

Die Kovarianz, als Maß der linearen Abhängigkeit zweier Lastordinaten, ist abhängig von dem Abstand der beiden Lastpunkte und wird beschrieben zu:

$$\text{Kovarianz: } \text{Cov}(H(x_1, y_1), H(x_2, y_2)) = \sigma_0^2 \cdot \rho(r) \quad (4-3)$$

Hierin entspricht r dem Abstand zwischen den beiden Ordinaten. Für die Korrelationsfunktion $\rho(r)$ gelten dabei folgende Grenzzustände:

- 1) Für den minimalen Abstand $r=0$ entspricht die Kovarianz der Varianz und es gilt somit:

$$\rho(0) = 1 \quad (4-4)$$

- 2) Für den unendlich großen Abstand $r=\infty$ gibt es dagegen keine Abhängigkeit zwischen den Ordinaten und es gilt somit:

$$\rho(\infty) = 0 \quad (4-5)$$

Da unterstellt werden kann, dass die Korrelation zwischen den Nutzlastordinaten mit zunehmender Entfernung zueinander stetig abnimmt, kann die Korrelationsfunktion durch einen Exponentialansatz beschrieben werden:

$$\rho(r) = \exp(-a_0 \cdot r) \quad (4-6)$$

Da mit diesem Ansatz eine geschlossene analytische Lösung nicht möglich ist, werden in [1] verschiedene Idealisierungen vorgenommen und die Korrelationsfunktion zur Berücksichtigung nichtlinearer Abhängigkeiten durch eine um einen konstanten Wert angehobene Exponentialfunktion angenähert:

$$\rho(r) \approx \rho(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|) = \rho_\infty + \rho_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot (|x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|)) \quad (4-7)$$

Die Parameter ρ_∞ , σ_0^2 und ε lassen sich aus empirisch gewonnenen Messwerten herleiten. Der Parameter ρ_0 kann aus der Bedingung $\rho_0 + \rho_\infty = 1$ berechnet werden. Für die betrachtete Einzugsfläche kann die einwirkende Gesamtlast durch Integration der Lastfunktion $H(x,y)$ bestimmt werden.

Unter Beachtung der betrachteten Flächengröße F mit den Flächengrenzen a und b folgt dann für die gleichförmig verteilte Nutzlast:

$$\bar{P} = \frac{1}{F} \cdot \int_0^a \int_0^b H(x,y) \cdot dx \cdot dy \quad (4-8)$$

Die gleichförmig verteilte Nutzlast \bar{P} ist dabei wie die Nutzlastordinate $H(x,y)$ eine streuende Größe mit den folgenden statistischen Parametern:

Mittelwert: $E(\bar{P}) = \mu_0 \quad (4-9)$

Varianz:
$$VAR(\bar{P}) = \sigma_0^2 \left\{ \rho_\infty + \rho_0 \cdot \frac{4}{\varepsilon^4 \cdot a^2 \cdot b^2}, \dots \right. \\ \left. \dots \cdot (\varepsilon \cdot a + \exp(-\varepsilon \cdot a) - 1) \cdot (\varepsilon \cdot b + \exp(-\varepsilon \cdot b) - 1) \right\} \quad (4-10)$$

Es ist ersichtlich, dass neben dem Ansatz der Korrelationsfunktion die Varianz durch die Form der Einzugsfläche bestimmt wird. In einer gesonderten Betrachtung zeigt Marten [1], dass dabei die ungünstigsten Werte bei Annahme einer quadratischen Einzugsfläche erreicht werden. Die Varianz kann dann durch folgende Funktion beschrieben werden:

$$VAR(\bar{P}) = \sigma_p^2 = \sigma_0^2 \cdot \left\{ \rho_\infty + \rho_0 \cdot \frac{4}{\varepsilon^4 \cdot F^2} \cdot (\varepsilon \sqrt{F} + \exp(-\varepsilon \sqrt{F}) - 1)^2 \right\} \quad (4-11)$$

Durch Gegenüberstellung mit den statistischen Kennwerten der empirisch gewonnenen Daten können die Parameter ρ_∞ , σ_0^2 und ε festgelegt werden. Es muss dabei gelten:

$$E(\bar{P}_{Messung}) = E(\bar{P}) = \mu_p \quad (4-12)$$

$$Var(\bar{P}_{Messung}) = Var(\bar{P}) = \sigma_p^2 \quad (4-13)$$

Die Verteilungsfunktion der gleichförmig verteilten Nutzlast kann dann bestimmt werden zu:

$$F_{\bar{p}}(\bar{p}) = w_{\bar{p}}(0) + (1 - w_{\bar{p}}(0)) \cdot \bar{F}_{\bar{p}}(\bar{p}) \quad (4-14)$$

mit:

$$\bar{F}_{\bar{p}}(\bar{p}) = \Phi\left(\frac{\bar{p} - \mu_{\bar{p}}}{\sigma_{\bar{p}}}\right) \quad (4-15)$$

und:

$$\mu_{\bar{p}} = \frac{\mu_{\bar{p}}}{1 - w_{\bar{p}}(0)} \quad (4-16)$$

$$\sigma_{\bar{p}}^2 = \frac{1}{1 - w_{\bar{p}}(0)} \cdot \left(\sigma_{\bar{p}}^2 - \mu_{\bar{p}}^2 \cdot \frac{w_{\bar{p}}(0)}{1 - w_{\bar{p}}(0)} \right) \quad (4-17)$$

$$w_{\bar{p}}(0) = \exp(-\alpha \cdot F) \quad (4-18)$$

Die gleichförmig verteilte Nutzlast ist nur bedingt geeignet, um die Schnitt- und Verformungsgrößen eines Tagwerks wirklichkeitsnah wiederzugeben. Insbesondere bei kleineren Einzugsflächen ist hier in Abhängigkeit des Tragwerks eine Lastkonzentration zu berücksichtigen. Hierzu überführt Marten [1] die gleichförmig verteilte Nutzlast durch Multiplikation mit einem Lastkonzentrationsfaktor f_s in eine gleichförmig verteilte Ersatzlast. Die Formulierung des Lastkonzentrationsfaktors erfolgt dabei auf Grundlage theoretischer Überlegungen zu:

$$f_s = 1 + \beta \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{F}} + \frac{1}{\sqrt[3]{F}} \right) \quad (4-19)$$

Der Beiwert β ist ein schnittgrößen- und systemabhängiger Faktor. Marten [1] untersucht verschiedene Grundsysteme und identifiziert einen oberen Beiwert $\beta=0,45$ für das Biegemoment des unendlich langen Plattenstreifens.

Zur Ermittlung der Verteilung der Nutzlastextrema für den Zeitabschnitt T wird im Weiteren unterstellt, dass bei der Bestimmung der Extremwerte der gleichförmig verteilten Nutzlast allein die Fluktuation der aufgebrachten Nutzlast zu berücksichtigen ist. Aus der bekannten Grundgesamtheit der gleichförmig verteilten Nutzlast wird dann die gleichförmig verteilte Ersatzlast aus der Verteilung der Extremwerte P^* für

einen vorgegebenen Zeitabschnitt T bestimmt. Die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb eines definierten Zeitraums ein Extremwert der Nutzlast n -Mal überschritten wird, kann durch einen stationären Poisson-Prozess beschrieben werden.

Für die Parkhauslasten ist zur Bestimmung der Extremwerte die Kenntnis der Lastwechselrate λ_s [Kfz/Tag] innerhalb des betrachteten Zeitraums notwendig. Die tägliche Extremwertverteilung der Parkhauslast kann dann bestimmt werden zu:

$$F_{\bar{p}_{\text{Tag}}}^*(\bar{p}^*) = F_{\bar{p}}(\bar{p}^*) \cdot \exp(-\lambda_s \cdot F_{\bar{p}}(\bar{p}^*) \cdot (1 - F_{\bar{p}}(\bar{p}^*))) \quad (4-20)$$

Auf Basis der Tagesextremwerte kann dann die Verteilungsfunktion der jährlichen Extremwerte unter Annahme einer mittleren Betriebsdauer n [Tage/Jahr] bestimmt werden:

$$F_{\bar{p}_{\text{Jahr}}}^*(\bar{p}^*) = \left(F_{\bar{p}_{\text{Tag}}}^*(\bar{p}^*) \right)^n \quad (4-21)$$

5 Lastmessungen an Kraftfahrzeugen

5.1 Vorbemerkungen

Die Parameter des in Kapitel 4 dargestellten Modells wurden von Marten [1] auf der Grundlage von Untersuchungen in den Jahren 1972-1973 zu den Fahrzeuggewichten an den beiden Parkhäusern *Konstablerwache* und *Hauptwache* in Frankfurt am Main bestimmt. Die beiden innerstädtischen Parkhäuser unterscheiden sich insbesondere durch die Anordnung der Stellplätze zur Fahrbahn. In der *Konstablerwache* sind die Stellplätze schräg und in der *Hauptwache* senkrecht zur Fahrbahn angeordnet. Mangels einer Wiegeeinrichtung wurden seinerzeit die Fahrzeugtypen lediglich in der Parkstellung dokumentiert und im Nachgang die Fahrzeuggewichte auf der Grundlage von Herstellerangaben unter Ergänzung eines permanenten Zuladungsanteils ausgewertet. Es wurden somit Untersuchungen hinsichtlich der räumlichen Anordnung der Fahrzeuge, dem Gewicht und den Abmessungen der Fahrzeuge sowie zur Fluktuation der Fahrzeuge durchgeführt.

Marten [1] identifizierte bei dem Parkhaus *Hauptwache* aufgrund der senkrechten Anordnung der Parkflächen die ungünstigen Auswirkungen auf das Tragwerk. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden ebenfalls am Parkhaus *Hauptwache* die aktuellen Fahrzeuggewichte mit einer dynamischen Radlastwaage ermittelt. Gemessen wurden dabei das Gewicht der Vorder- und der Hinterachse, die Anzahl der Personen in einem Fahrzeug sowie die Fluktuation der Fahrzeuge.

Bei der verwendeten Wiegeeinrichtung handelte es sich um das Modell „IT8000 - TRUCK Online“ der Firma Systec Systemtechnik und Industrieautomation GmbH. Das System ist ein Wiegeterminal mit kalibrier- und eichfähiger Registrierung. Das Unterwerk ist mit analogen Wiegezellen mit 4 Auffahrkeilen für dynamisches Wiegen bei Überfahrt ausgestattet. Bei einer maximalen Tragkraft von 20t beträgt der zulässige Wiegebereich 15t bei einer Genauigkeit von 10kg. Die Radlastwaage wurde vor dem Einsatz am Institut für Massivbau der TU Darmstadt kalibriert.

Die Messungen wurden in den Monaten Juli bis Oktober 2009 durchgeführt. Die Fahrzeuge wurden einschließlich Zuladung und Personengewicht bei der Ausfahrt aus dem Parkhaus gewogen. Die Wiegung erfolgte jeweils zunächst an der Vorder-, dann an der Hinterachse eines stehenden Fahrzeugs. Die Datendokumentation erfolgte durch Protokollierung der Vorderachslast, der Hinterachslast, der Achslastsumme sowie der Anzahl der Personen in einem Fahrzeug.

5.2 Ergebnisse der Lastmessungen

In Abbildung 4 sind die relativen Häufigkeiten sowie die Summenfunktion der gemessenen Fahrzeuggewichte am Parkhaus *Hauptwache* in Frankfurt am Main dargestellt. Tabelle 1 enthält die wesentlichen statistischen Kennwerte der gemessenen Fahrzeuggewichte.

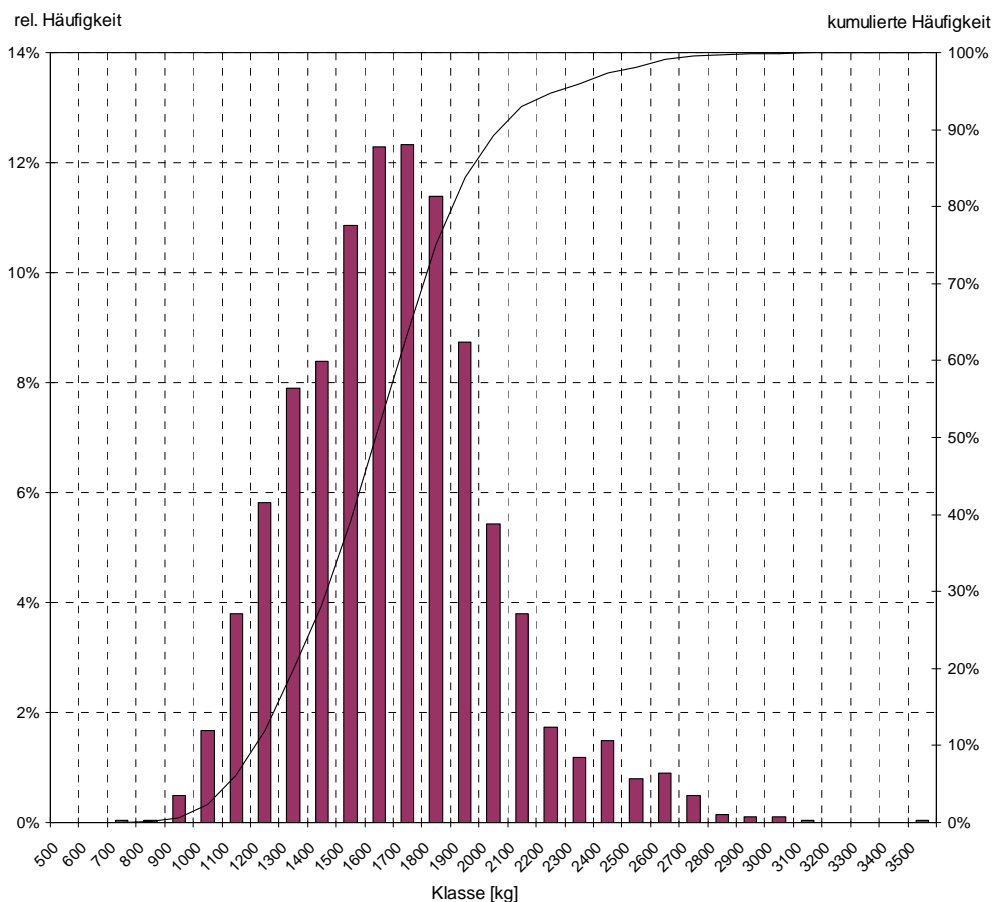


Abbildung 4: Relative Häufigkeit und Summenfunktion der Fahrzeuggewichte

<i>Statistische Kennwerte der Lastmessungen</i>		
Mittelwert	1607,64	kg
Median	1600	kg
Modus	1700	kg
Standardabweichung	345,05	kg
Kurtosis	1,04	-
Schiefe	0,61	-
Wertebereich	2790	kg
Minimum	690	kg
Maximum	3480	kg

Tabelle 1: Statistische Kennwerte der gemessenen Fahrzeuggewichte

Das geringste gemessene Gesamtgewicht eines ausfahrenden Fahrzeugs betrug 690kg und das größte gemessene Gesamtgewicht betrug 3480kg. Das mittlere Gesamtgewicht konnte zu ~1610kg bestimmt werden. Die Verteilungsdichte der Fahrzeuggewichte weist eine gewisse Rechtsschiefe, also eine Tendenz zu höheren Lastwerten auf. Die mittlere Achslastverteilung von Vorder- zu Hinterachse konnte zu etwa 0,58:0,42 bestimmt werden. Eine Auswertung der beobachteten Personenzahlen in einem Fahrzeug lieferte einen durchschnittlichen PKW-Besetzungsgrad von ~1,5 Pers./PKW.

Um die Aussagekraft der am Parkhaus *Hauptwache* gemessenen Daten zu bewerten, wird durch einen statistischen Anpassungstest überprüft, in wie weit die Daten repräsentativ für den Bestand aller inländisch zugelassenen PKW sind. In Abbildung 5 sind hierzu zunächst die relativen Häufigkeiten sowie die Summenfunktionen der Fahrzeuggewichte auf Basis der eigenen Messungen sowie auf Basis der Angaben des Kraftfahrt-Bundesamtes (KfzBA) dargestellt. Anhand dieser Darstellung ist bereits zu erkennen, dass die Verteilung der Fahrzeuggewichte auf Basis der Messungen im Parkhaus *Hauptwache* einen qualitativ ähnlichen Verlauf aufweist, wie die Verteilung des Kfz-Bestandes nach Angabe des KfzBA [9]. Die gegenseitige Verschiebung der beiden Verteilungen stellt den Abstand zwischen dem zulässigen Gesamtgewicht der Fahrzeuge (Angabe KfzBA) und dem tatsächlich gemessenen Fahrzeuggewicht inkl. Zuladung (eigene Lastmessungen) dar. Da die Zuladung in Form von Betankung, Gepäck und Personen in den Daten der Messungen bereits enthalten ist, kann die Differenz der Verteilungen als Zuladungskapazität interpretiert werden.

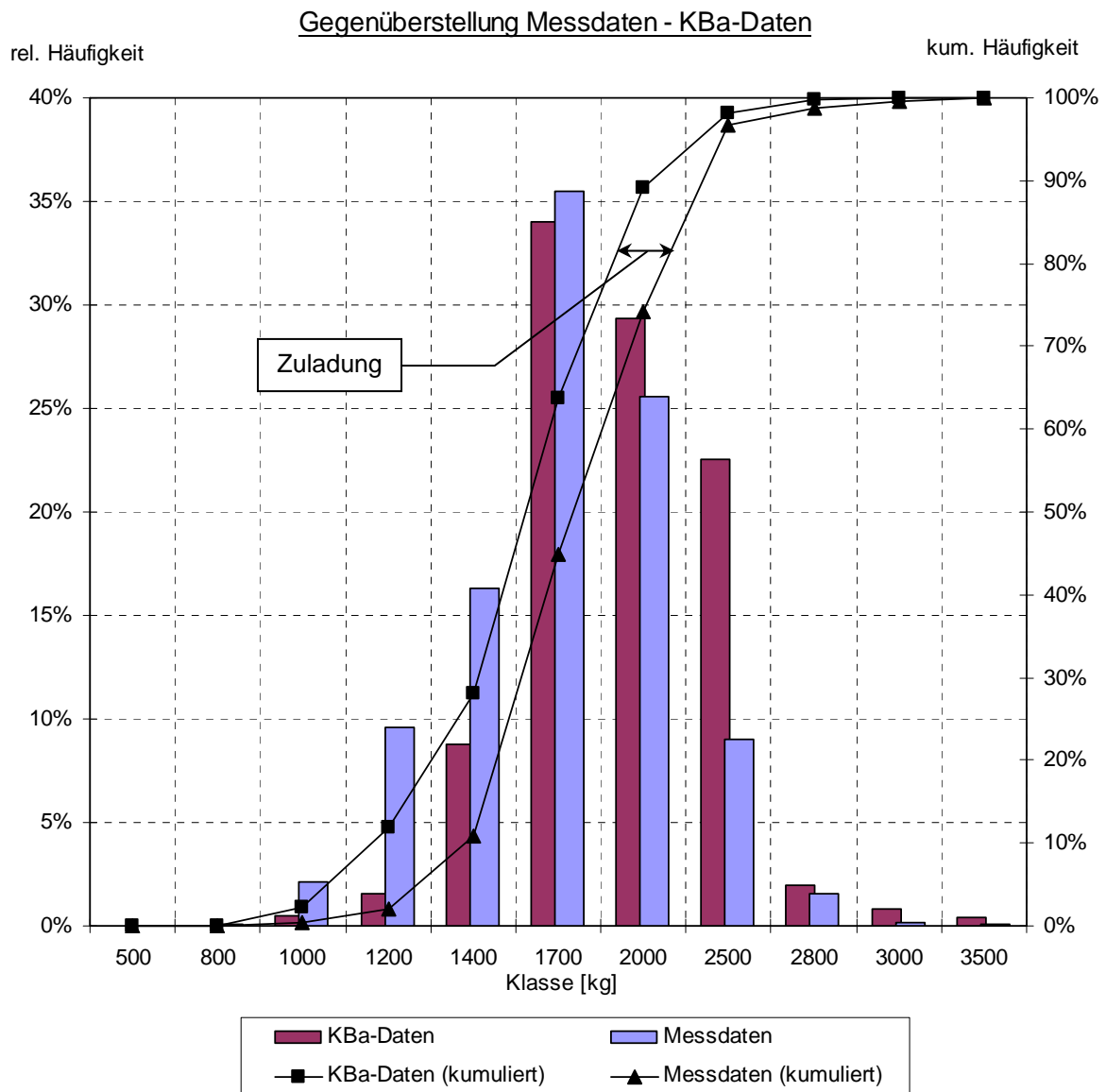


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Messdaten zu den in [9] angegebenen Daten des Kraftfahrtbundesamtes (KBa)

Mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests soll im Folgenden geprüft werden, ob die Verteilung der gemessenen Fahrzeuggewichte der Verteilung der Daten des KBa folgt. Es wird für die Verteilung der Daten des KBa [9] dabei unterstellt, dass die Werte zwischen den einzelnen Klassen durch lineare Interpolation hinreichend genau die tatsächliche Verteilungsfunktion aller Fahrzeuge beschreiben. Das Signifikanzniveau des Tests wird zu $\alpha = 5\%$ gewählt. Bei einer Aufteilung in insgesamt 11 Gewichtsklassen kann dann die absolut größtzulässige Differenz zu $d_{\max} = 0,391$ festgesetzt werden.

Auf Grundlage der in Tabelle 2 und Abbildung 6 dargestellten Auswertungsergebnisse kann die Hypothese der zutreffenden Wiedergabe der Verteilung der Daten des KBa durch die Verteilung der Messdaten bestätigt werden. Im Folgenden wurden die weiteren Betrachtungen daher ausschließlich auf Grundlage der Messdaten vorgenommen.

	1	2	3	3	4	5	6	7	8	9	10
1	X_i [Kfz]	rel.Häufigkeit	SUM rel.H	$S(x_i)$	$F_0(x_i)$	$S(x_{i-1})-F_0(x_i)$	$S(x_i)-F_0(x_i)$	Betrag von (5)	Betrag von (6)	$d_{\alpha=0,05;n=12}$	Hypothese erfüllt
2	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,391	erfüllt
3	2	0,001	0,001	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,001	0,000	0,391	erfüllt
4	44	0,022	0,023	0,023	0,023	-0,022	0,000	0,022	0,000	0,391	erfüllt
5	195	0,096	0,119	0,119	0,119	-0,096	0,000	0,096	0,000	0,391	erfüllt
6	330	0,163	0,282	0,282	0,282	-0,163	0,000	0,163	0,000	0,391	erfüllt
7	719	0,355	0,636	0,636	0,636	-0,355	0,000	0,355	0,000	0,391	erfüllt
8	518	0,256	0,892	0,892	0,892	-0,256	0,000	0,256	0,000	0,391	erfüllt
9	182	0,090	0,982	0,982	0,982	-0,090	0,000	0,090	0,000	0,391	erfüllt
10	31	0,015	0,997	0,997	0,997	-0,015	0,000	0,015	0,000	0,391	erfüllt
11	4	0,002	0,999	0,999	0,999	-0,002	0,000	0,002	0,000	0,391	erfüllt
12	2	0,001	1,000	1,000	1,000	-0,001	0,000	0,001	0,000	0,391	erfüllt

Tabelle 2: KS-Anpassungstest mit $\alpha = 5\%$

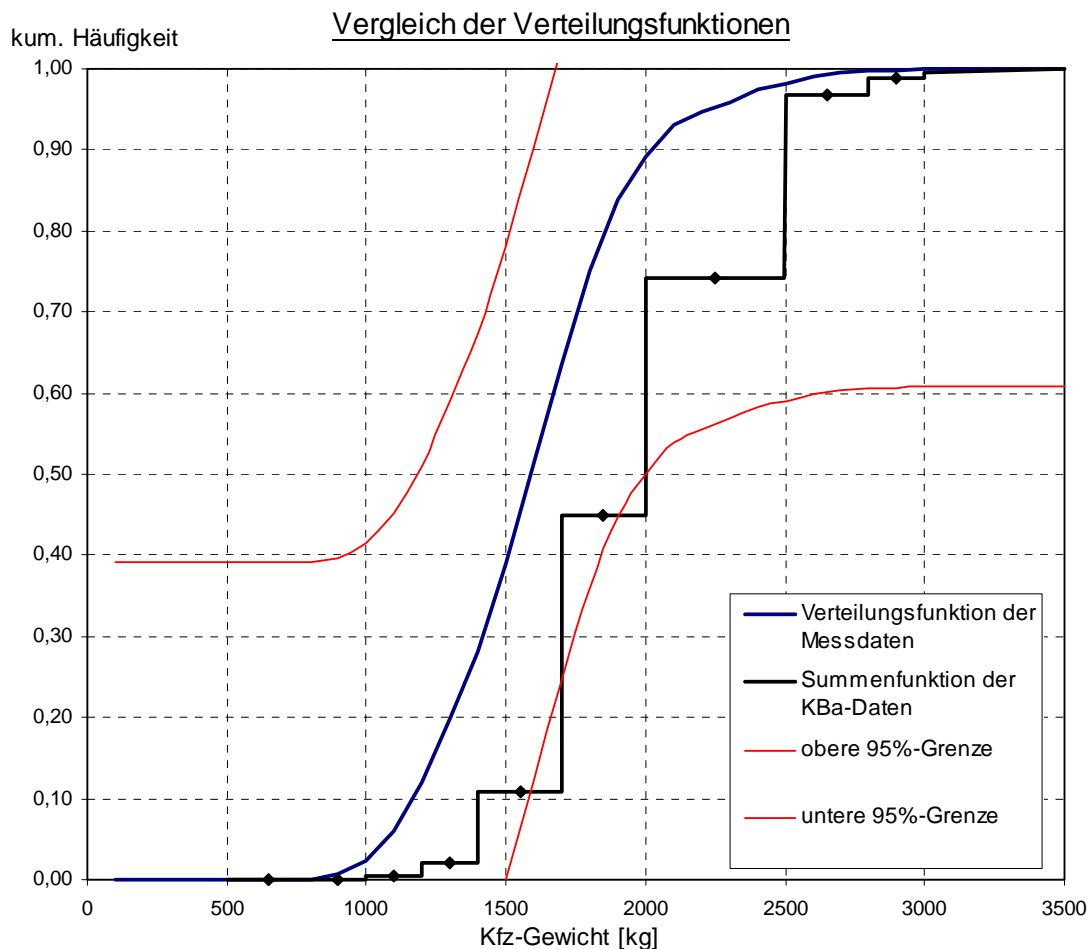


Abbildung 6: Vergleich der Verteilungen

5.3 Ergebnisse der Parkhausbelegung

Zur Bestimmung der Frequentierung des Parkhauses *Hauptwache* können die statistischen Daten des Parkhausbetreibers [3] verwendet werden. Eine aktuelle Auswertung der Tagesgangkurve über das gesamte Jahr ist in Abbildung 7 und eine Übersicht über die Jahresbilanz der Belegung in Tabelle 3 gegeben.

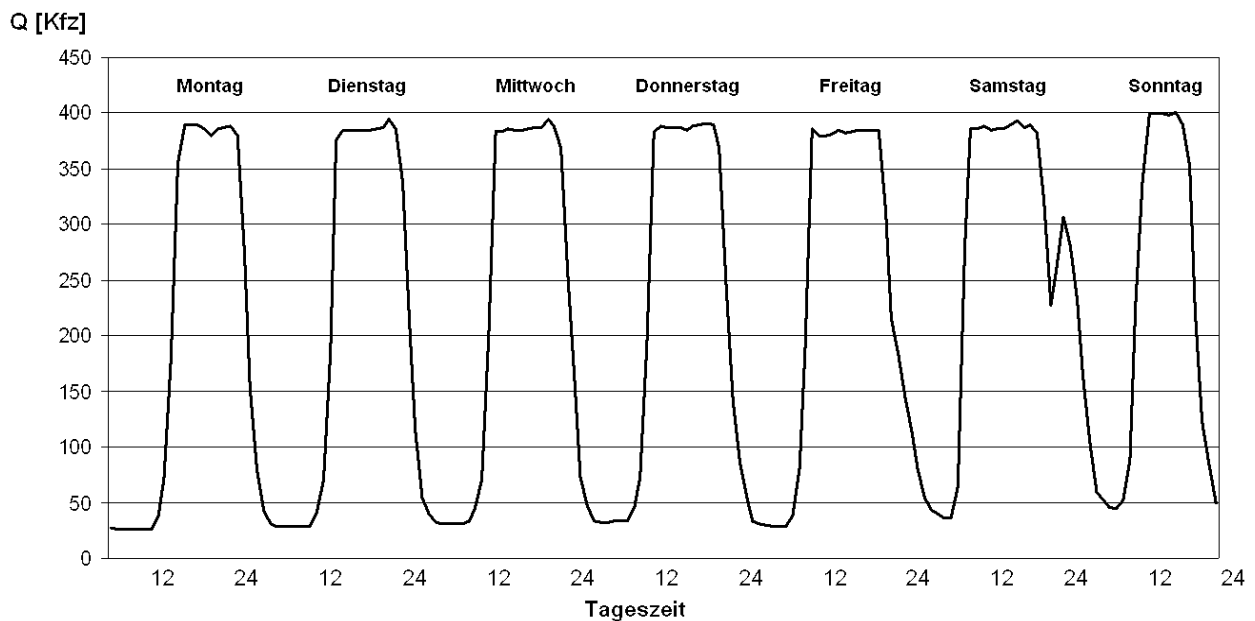


Abbildung 7: Tagesgangkurve des Parkhauses *Hauptwache*

Zeit	Montag		Dienstag		Mittwoch		Donnerstag		Freitag		Samstag		Sonntag		Summe	
	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt
0:00	317	758	101	736	34	800	124	1379	39	1382	1156	2726	3940	3613	5711	11394
1:00	137	457	33	233	13	341	36	579	19	557	348	1987	1621	3326	2207	7480
2:00	35	252	10	118	7	105	12	245	12	273	102	1433	424	3128	602	5554
3:00	6	164	4	64	3	132	4	144	1	87	29	1126	119	3215	166	4932
4:00	6	166	1	86	2	21	6	72	5	36	11	817	29	3001	60	4199
5:00	12	137	8	53	7	4	7	35	10	12	14	429	16	1608	74	2278
6:00	58	53	93	18	88	12	86	17	79	20	29	254	11	398	444	772
7:00	500	55	592	44	712	47	516	50	599	62	139	136	13	219	3071	613
8:00	1564	204	1653	252	1905	311	1615	228	1901	277	1484	157	47	83	10169	1512
9:00	4651	632	5014	702	5455	744	4983	683	5964	853	7017	558	284	71	33368	4243
10:00	7709	2095	7816	2145	8138	2391	7873	2159	8882	2674	10802	2462	1145	109	52365	14035
11:00	7300	4525	7550	4578	7722	4883	7467	4563	7919	5432	7111	5208	2438	370	47507	29559
12:00	7351	5962	7512	6300	7844	6455	7800	6265	7811	6790	6307	6302	2647	1294	47272	39368
13:00	6843	6811	6935	6931	7161	7353	7022	7000	7374	7429	6794	6840	2962	1706	45091	44070
14:00	6963	6761	6949	7048	7076	7360	7241	7117	7622	7551	6918	6815	3833	2293	46602	44945
15:00	7018	7233	7116	7172	7363	7257	7547	7321	7694	7361	7052	7107	4144	2863	47934	46314
16:00	6964	7359	7048	7337	7295	7430	7543	7753	7864	7781	7230	7283	4461	3528	48405	48471
17:00	7206	7844	7243	7822	7789	8028	7860	8233	7739	8396	7403	8047	3442	4406	48682	52776
18:00	6823	7792	7313	7692	8233	7992	7953	7860	7251	8183	6276	8311	2380	4406	46229	52236
19:00	3767	7192	4969	7151	6215	7568	6144	7439	5415	7657	5239	7539	2006	3163	33755	47709
20:00	1305	5105	1924	5201	2613	6046	2867	5979	3110	5606	3575	5261	1488	2551	16882	35749
21:00	652	2687	603	3394	1005	3789	1128	3923	2528	3252	3136	2900	715	1763	9767	21708
22:00	374	2362	187	3355	317	4268	398	4351	2216	3992	3448	3983	509	1602	7449	23913
23:00	187	1402	74	2120	177	2862	150	2941	2064	3304	4425	3520	330	1096	7407	17245
Summe	77748	78008	80748	80552	87174	86199	86382	86336	94118	88967	96045	91201	39004	49812	561219	561075

Tabelle 3: Jahresbilanz der Belegung des Parkhauses *Hauptwache*

6 Simulation von Parkhausbelegungen

Auf der Grundlage der in Kapitel 5 dargestellten Lastmessungen ist die Verteilung der Fahrzeuggewichte nach heutigem Stand des Kfz-Bestandes bekannt. Zur Verwendung des Modells nach Marten [1] sind darüber hinaus die Kenntnisse der Fahrzeugstellungen innerhalb eines Stellplatzes sowie der gleichförmig verteilten Parkhauslast in Abhängigkeit der Einzugsfläche erforderlich.

Bei den Untersuchungen von Marten [1] wurde zunächst die Parkfläche mit einem rechtwinkligen Koordinatensystem überzogen, in dem die Fahrzeugräder als Lastangriffspunkte verzeichnet wurden. Darüber hinaus wurde die Parkfläche in ein gleichmäßiges Grundraster mit einer Unterteilungsgröße von 0,5m x 0,5m aufgeteilt. Zur Ermittlung der gleichförmig verteilten Parkhauslast wurde die Summe der Lasten aller Grundrasterelemente innerhalb einer betrachteten Bezugsfläche durch die Bezugsflächengröße geteilt. Größere Bezugsflächen wurden dabei jeweils durch ganze Vielfache des Grundrasters gebildet. Die so erhaltenen Bezugsflächen wurden parallel zu den Koordinatenachsen über die Parkfläche belegt. Der Vorschub betrug dabei jeweils ein Rasterfeld.

Die Radlasten wurden bei Marten [1] aus dem Leergewicht nach Herstellerangaben und einer geschätzten Zuladung ermittelt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden bei den Lastmessungen keine PKW und Radstände dokumentiert. Die Stellung der Fahrzeuge wurde zweckmäßigerweise durch eine Computersimulation in MATLAB abgebildet. Hierzu wurde ein fiktives Parkdeck analog zu dem Konzept von Marten [1] modelliert. Das Parkdeck wurde dabei als vollständig belegt angesetzt und die Massen der Einzelfahrzeuge gemäß der Verteilung der Messdaten zufällig generiert. Der mittlere Personenanteil in einem Fahrzeug (1,5 Personen) wurde unter Ansatz eines durchschnittlichen Personengewichts (75kg) von der gemessenen Fahrzeugmasse abgezogen.

Die Achslastverteilung wurde in zufälliger Gewichtung von Vorderachse:Hinterachse im Bereich von 0,525-0,625:0,475-0,375 gemäß den Ergebnissen der Lastmessungen gewichtet. Zudem wurde die Fahrzeuganordnung innerhalb eines Stellplatzes bei konstantem Radstand mit einer gleichverteilten Zufallsfunktion modelliert.

Die Anordnung innerhalb des Stellplatzes erfolgte im Rahmen der geometrisch möglichen Positionen des Standardfahrzeugs. Für das Standardfahrzeug wurden dabei entsprechend der Größe des Grundrasters ein Radstand von 3,00m bis 3,50m und eine Spurweite von 1,50m bis 2,00m angesetzt. Abbildung 8 zeigt das Simulationsmodell exemplarisch an einem Ausschnitt mit einer Bezugsfläche von 30,25m². Die Stellplatzgröße beträgt analog zu [1] 2,5m x 5,0m. Die Bezeichnung *V* bedeutet Vorderachse und *H* entsprechend Hinterachse.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	V			V																					
2							V			V						V			V						
3																									
4											V		V							V				V	
5																									
6																									
7	H			H																					
8	Fläche 30,25m ²	Fläche 30,25m ²	Fläche 30,25m ²	Fläche 30,25m ²			H			H							H			H					
9																									
10											H		H								H			H	
11							H			H							H			H					
12											H		H								H			H	
13	Rastervorschub																								
14		H			H																				
15																									
16																									
17							V			V							V			V					
18											V		V								V			V	
19																									
20		V			V																				

Abbildung 8: Prinzipskizze zur Darstellung der Parkdecksimulation

Entsprechend der Grundrastergröße erfolgte die Auswertung analog zu [1] für Flächengrößen von 1m², 2.25m², 6.25m², 9m², 25m², 49m², 100m² und 225m². Die einzelnen Realisierungen der gleichförmig verteilten Parkhauslast wurden als Grundgesamtheit je Bezugsfläche gespeichert. Zur Auswertung eines Simulationslaufs wurden dann der Mittelwert aus allen Bezugsflächenlasten in kg/m² sowie die Standardabweichung je Bezugsfläche in kg/m² bestimmt.

Da die Parkhausbelegung als stationärer ergodischer Prozess modelliert wird, kann auf die Generierung einer fiktiven, extrem großen Parkfläche verzichtet werden und stattdessen die Simulation in mehreren Durchgängen wiederholt werden. Diese Wiederholung wurde dabei so häufig durchgeführt, bis die interessierenden statistischen Parameter der Parkhauslasten mit hinreichender Genauigkeit konvergierten.

Die derart bestimmten statistischen Parameter der Parkhauslasten sind in Tabelle 4 dargestellt und können als Datenbasis für das Modell nach Marten [1] verwendet werden. Insgesamt wurde die Parkhausbelegung an Hand von 86.592 Fahrzeugen simuliert. Es ist zu erkennen, dass der Mittelwert der gleichförmig verteilten Flächenlast nahezu unabhängig von der Flächengröße ist und die Standardabweichung mit zunehmender Flächengröße abnimmt. Der gewichtete Mittelwert für die gleichförmig verteilte Nutzlast beträgt $\mu_p = 117,3\text{kg/m}^2$.

Lauf-Nr.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMME
sim. Kfz	7.488	10.432	5.632	8.768	6.208	6.912	7.872	9.792	9.408	5.504	8.576	5.760	86.592
Fläche μ [kg/m ²]													
1	118,05	118,08	117,96	118,06	116,96	117,68	118,07	117,83	117,51	117,64	117,57	117,33	117,79
2,25	116,61	116,46	116,36	116,59	115,35	116,17	116,40	116,22	115,97	116,18	116,00	115,79	116,23
4	117,00	116,80	116,74	116,96	115,66	116,51	116,79	116,55	116,30	116,58	116,37	116,11	116,58
9	116,57	116,42	116,39	116,53	115,18	116,05	116,33	116,18	115,80	116,11	116,01	115,69	116,16
16	116,51	116,36	116,36	116,49	115,12	115,96	116,28	116,14	115,74	116,08	115,95	115,65	116,11
25	117,63	117,53	117,45	117,61	116,12	117,07	117,40	117,39	116,90	117,34	117,14	116,79	117,26
49	117,94	117,93	117,90	117,93	116,44	117,37	117,71	117,86	117,19	117,55	117,63	117,00	117,61
100	119,57	119,57	119,61	119,63	118,17	119,08	119,33	119,66	118,81	119,20	119,38	118,58	119,30
225	118,54	118,59	118,66	118,50	117,15	118,06	118,31	118,61	117,92	118,39	118,40	117,61	118,31
													117,26
σ [kg/m ²]													
1	195,69	195,78	195,47	195,83	193,95	194,93	195,86	195,53	194,22	195,09	194,90	194,54	195,24
2,25	115,37	115,21	115,18	115,40	114,16	114,66	115,17	115,21	114,26	114,72	114,52	114,23	114,92
4	89,36	89,07	89,29	89,43	88,34	88,81	89,14	89,15	88,29	88,85	88,78	88,25	88,96
9	66,43	66,32	66,77	66,64	65,75	66,12	66,39	66,44	65,72	66,15	66,59	65,39	66,30
16	51,32	51,07	51,59	51,41	50,70	51,06	51,04	51,31	50,62	51,10	51,21	50,44	51,12
25	32,22	32,04	32,51	32,20	31,74	31,90	31,92	32,24	31,76	32,00	32,14	31,35	32,06
49	23,84	23,65	24,15	23,62	23,44	23,58	23,47	23,86	23,52	23,57	23,64	23,18	23,66
100	12,70	12,47	12,71	12,10	12,25	12,20	12,25	12,43	12,25	12,07	12,08	12,23	12,32
225	9,87	9,52	9,90	9,37	9,30	9,49	9,21	9,56	9,31	9,36	9,44	8,99	9,48

Tabelle 4: Übersicht über die Kennzahlen der Simulationsläufe

7 Datenanwendung am Lastmodell

7.1 Verteilung der gleichförmig verteilten Parkhauslast

Das in Kapitel 4 dargestellte Nutzlastmodell kann auf Basis der in Kapitel 6 gewonnenen statistischen Daten an die Entwicklung der gestiegenen Fahrzeuggewichte angepasst werden. Dabei ist die Varianz der Messungen je Bezugsfläche durch Gleichung (4-10) als Näherung wiederzugeben. Die relevanten Eingangsparameter der Funktion konnten durch eine Parameterstudie bestimmt werden zu:

$$\sigma_0 = 1400 \quad \varepsilon = 17,0 \quad \rho_0 = 1 \quad \rho_\infty = 0$$

Die Güte dieser Funktionsannäherung ist in Abbildung 9 durch einen Vergleich der gemessenen mit der modellierten Standardabweichung der gleichförmig verteilten Parkhauslast in Abhängigkeit von der Bezugsfläche dargestellt.

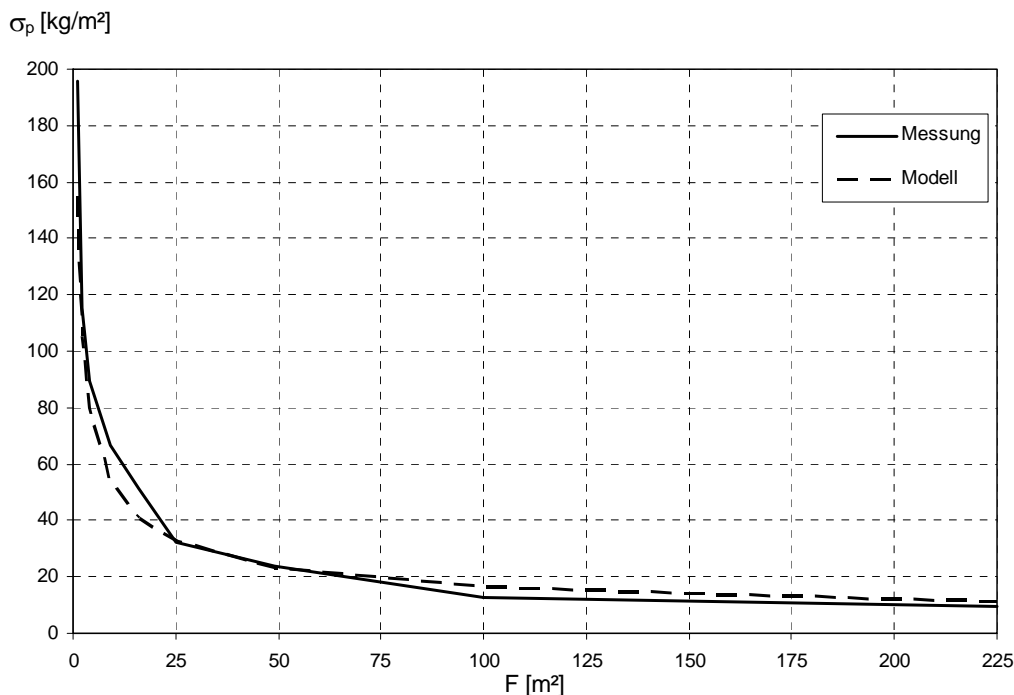


Abbildung 9: Gegenüberstellung von Messwerten und Rechenwerten des Modells

Die Verteilungsdichten und Verteilungsfunktionen der gleichförmig verteilten Nutzlasten können entsprechend [1] in Abhängigkeit von der Bezugsfläche ermittelt und als gemischte Verteilungen beschrieben werden. In den nachstehenden Abbildungen sind jeweils die Verteilungsfunktion und die Verteilungsdichte der Momentanverteilung der Parkhauslasten für ausgewählte Bezugsflächen dargestellt.

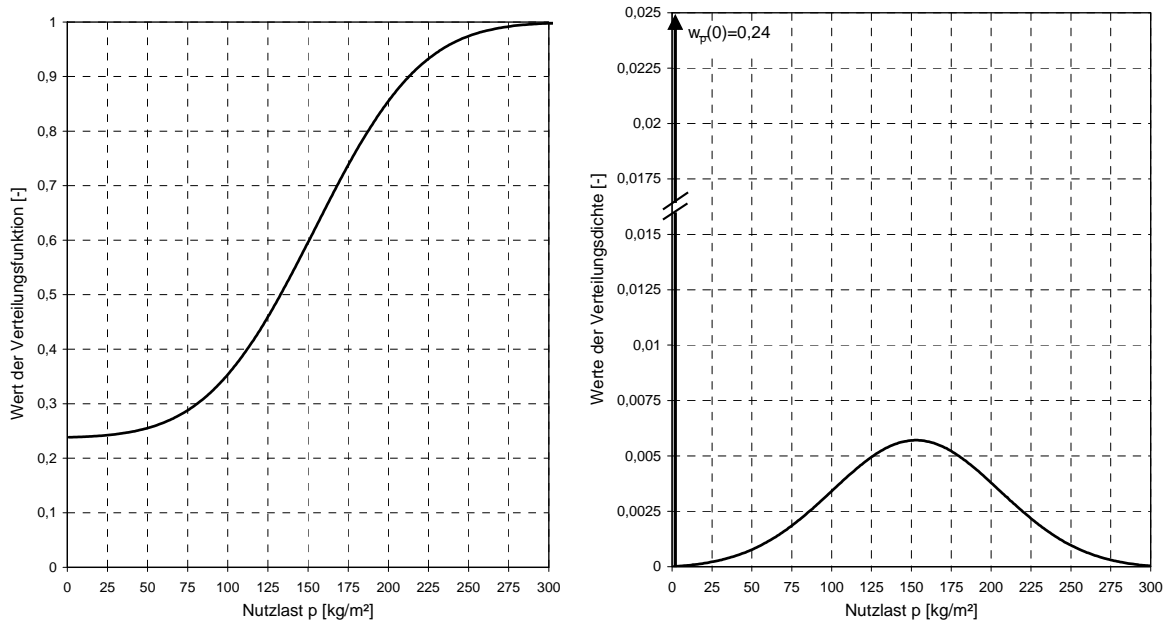


Abbildung 10: Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte der gleichförmig verteilten Parkhauslast für eine Bezugsfläche von 4m²

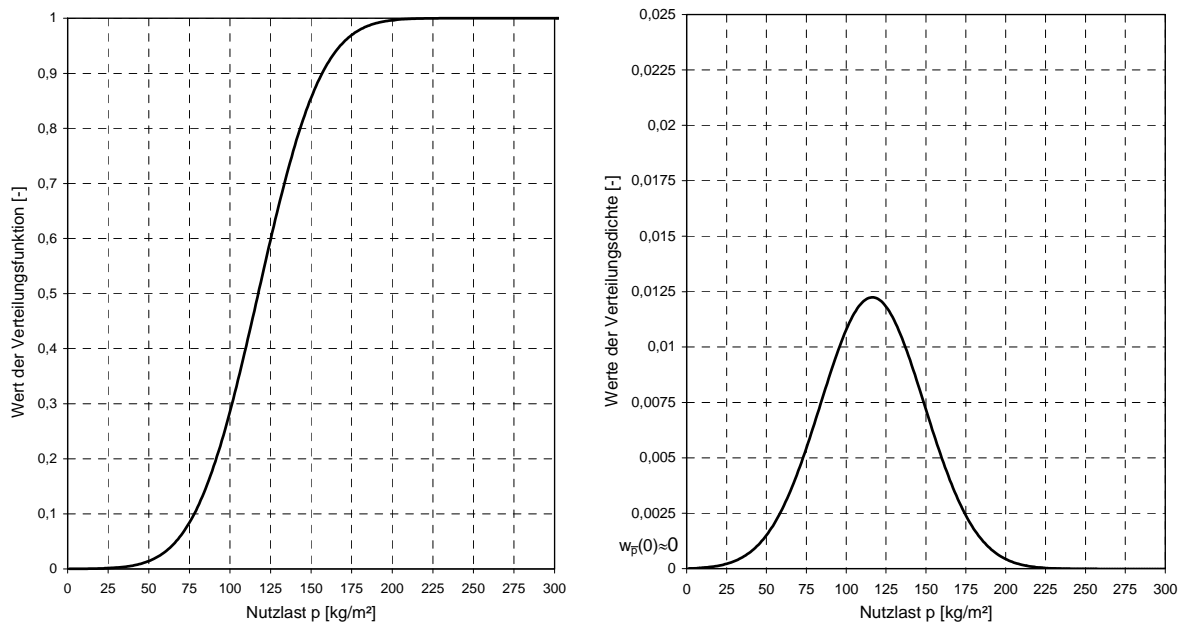


Abbildung 11: Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte der gleichförmig verteilten Parkhauslast für eine Bezugsfläche von 25m²

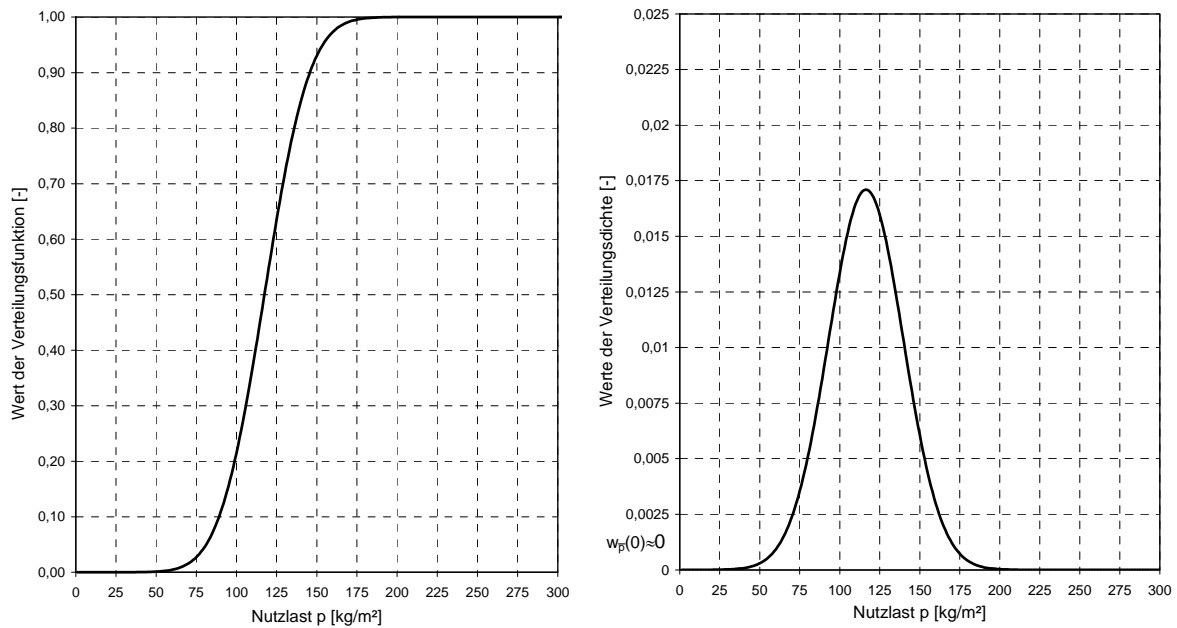


Abbildung 12: Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte der gleichförmig verteilten Parkhauslast für eine Bezugsfläche von 50m²

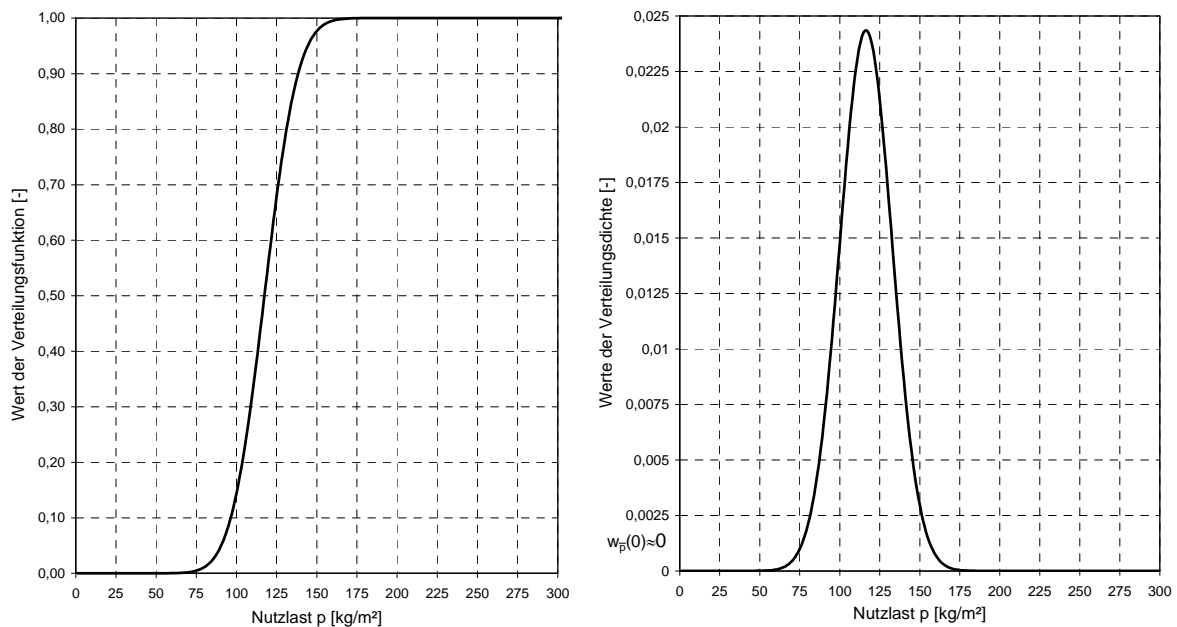


Abbildung 13: Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte der gleichförmig verteilten Parkhauslast für eine Bezugsfläche von 100m²

7.2 Extrema der gleichförmig verteilten Parkhauslast

Aus der Fluktuation der Fahrzeuge lässt sich die Extremwertverteilung für vorgegebene Zeitabschnitte berechnen. Hierzu wurde zunächst die Lastwechselrate λ_s auf der Grundlage der Angaben aus [3] bestimmt:

$$\begin{array}{l} \text{jährliche Betriebstage:} \\ n_{\text{Mo-Fr}} = 250 \text{ d} \\ n_{\text{Sa}} = 50 \text{ d} \\ n_{\text{So}} = 50 \text{ d} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} n_{\text{Mo-Fr}} \\ n_{\text{Sa}} \\ n_{\text{So}} \end{array}} \right\} n = 350 \text{ d}$$

$$\begin{array}{l} \text{tägliche Einfahrten:} \\ Q_{e,W} = 1890 \text{ Kfz} \\ Q_{e,Sa} = 1920 \text{ Kfz} \\ Q_{e,So} = 780 \text{ Kfz} \end{array}$$

jährliche Einstellzahl:

$$Q_{e,a} = 250 \cdot 1890 + 50 \cdot (1920 + 780) = 607.500 \text{ Kfz/a}$$

Gemessen nach [3]: 562.000 Kfz/a

durchschnittlicher täglicher Besetzungsgrad:

$$Q_{e,d} = \frac{562.000}{(250 + 2 \cdot 50)} \cdot \frac{1}{5} = 321 \frac{\text{Kfz}}{\text{Tag} \cdot \text{Geschoss}}$$

Bei 80 Stellplätzen je Geschoss folgt somit für die Fahrzeugwechselzahl:

$$\lambda_s = \frac{321}{80} = 4 \frac{\text{Kfz}}{\text{Stellplatz} \cdot \text{Tag}} \quad (\square \text{ Lastwechselrate})$$

Die tägliche Lastwechselrate bleibt gegenüber [1] damit unverändert. Durch Anwendung der Gleichungen (4-18) und (4-19) können mit Hilfe des Multiplikationssatzes der Wahrscheinlichkeitstheorie die Verteilungen der Tages- und der Jahresextrema formuliert werden. Für die gleichförmig verteilte Nutzlast sind in den nachstehenden Abbildungen jeweils die Verteilungsfunktion und die Verteilungsdichte der Jahresextrema ausgewählter Bezugsflächen dargestellt.

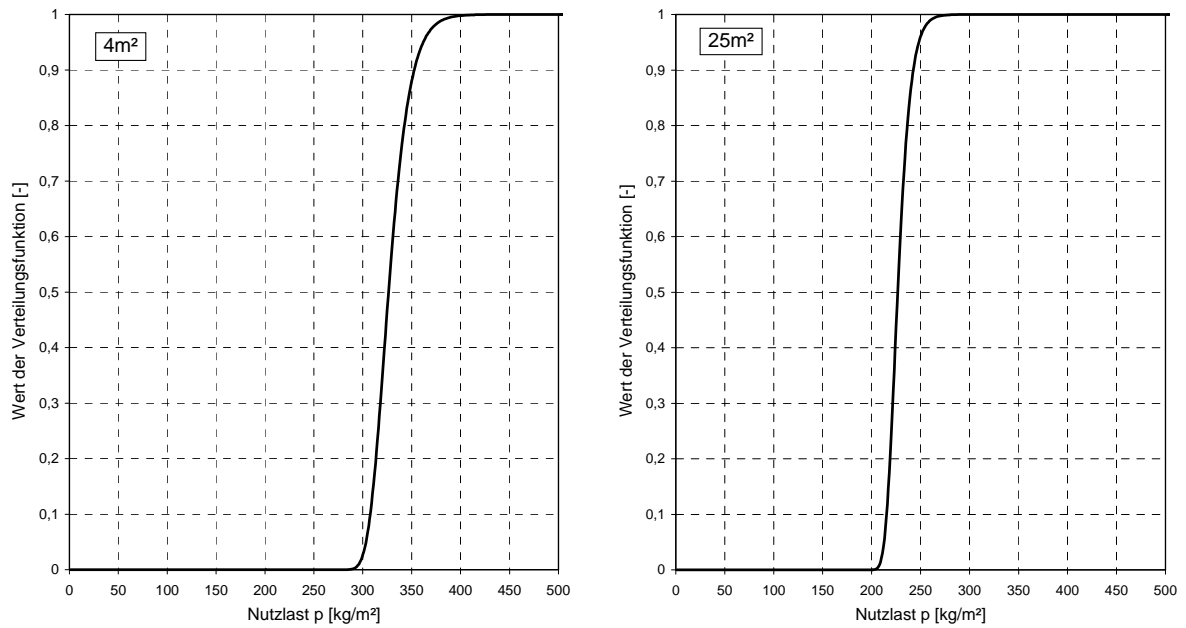


Abbildung 14: Verteilungsfunktion der Jahresextrema für 4m² und 25m²

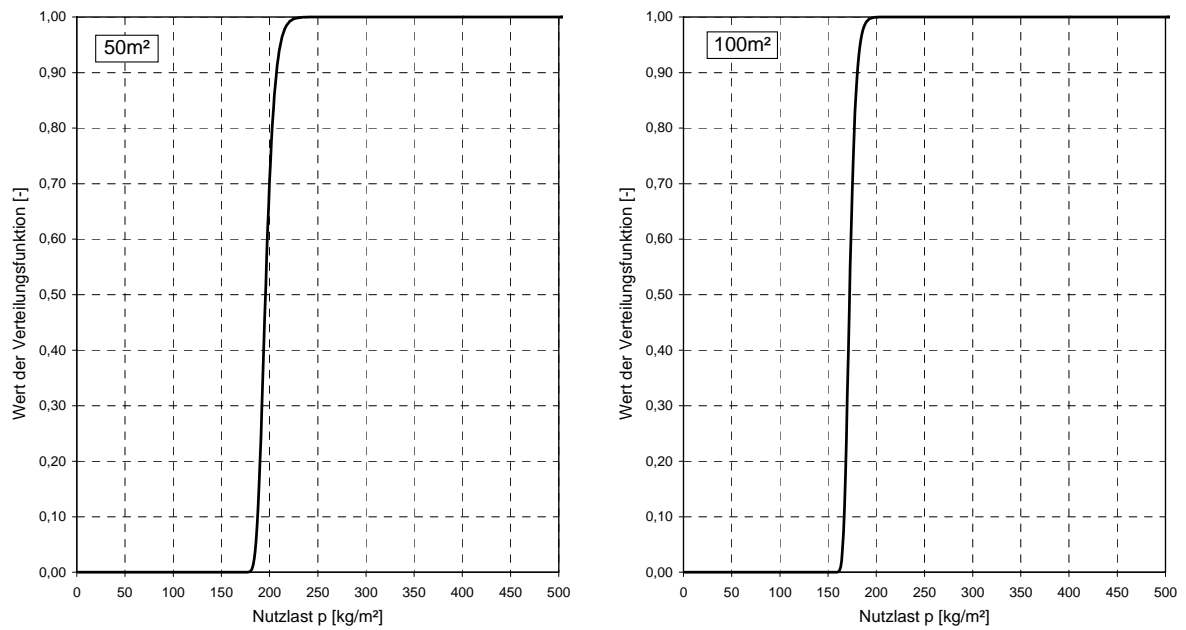


Abbildung 15: Verteilungsfunktion der Jahresextrema für 50m² und 100m²

Zur Bestimmung der Bemessungslast p^* wird analog zu Marten [1] sowie in Anlehnung an die CEB-Empfehlung der 95%-Fraktilewert der Extremwertverteilung bei einem Bezugszeitraum von einem Jahr unter Berücksichtigung des Lastkonzentrationsfaktors nach Gleichung (4-20) mit $\beta = 0,5$ angesetzt. Der Ansatz des 98%-Fraktilewertes würde aufgrund der geringen Variationskoeffizienten der Extremwertverteilung nur zu unwesentlich höheren Lasten führen. Die entsprechenden Lastgrößen in Abhängigkeit der Bezugsfläche können Abbildung 16 entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass die Lastgrößen aus [1] (p^* mit Lastwerten 1975) aufgrund der in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegenen Fahrzeuggewichte erwartungsgemäß geringer sind, als die Lastgrößen auf Grundlage der aktuellen Lastmessungen (p^* mit Lastwerten 2009).

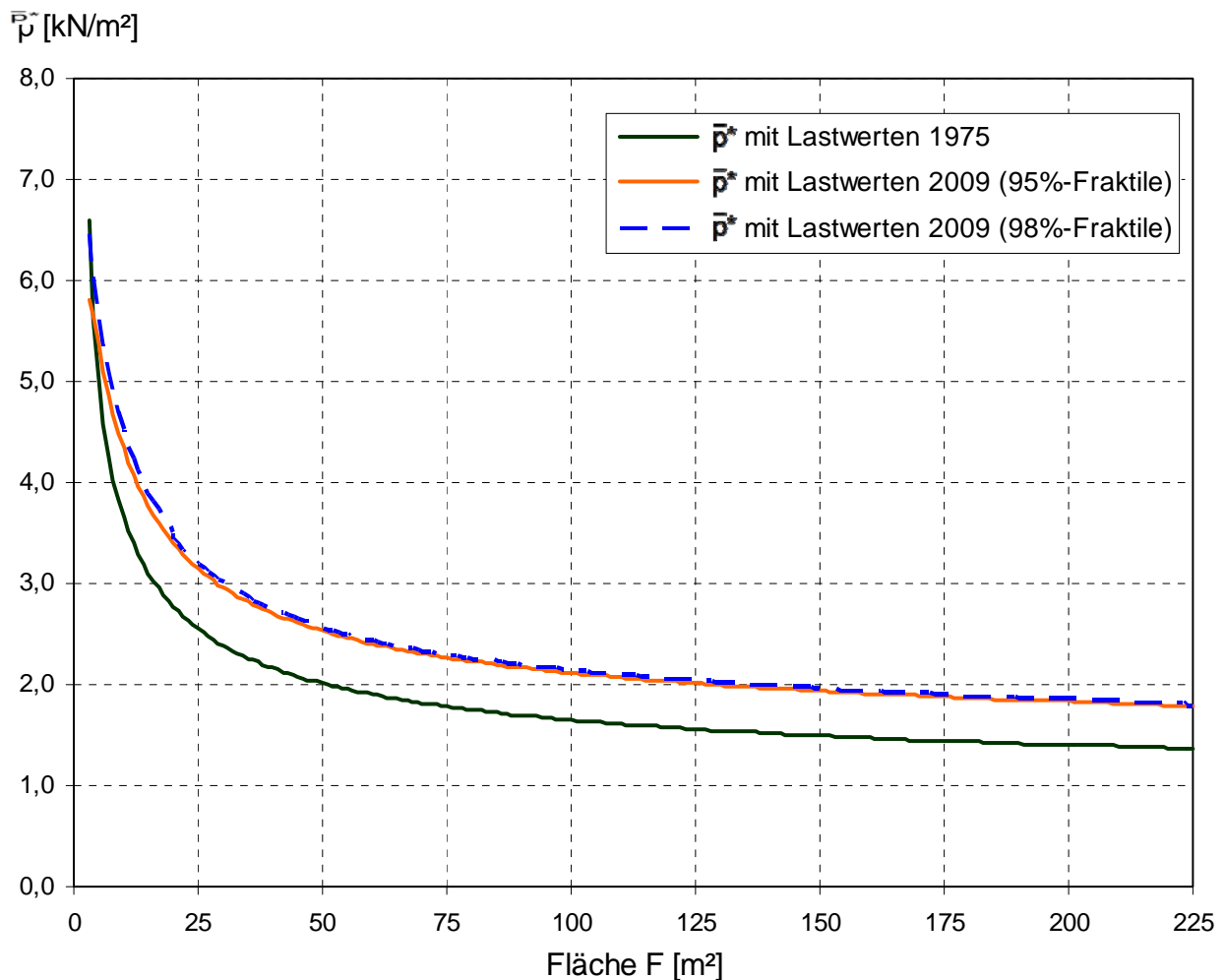


Abbildung 16: Vergleich der Lastgrößen nach Marten [1] mit den aktuellen Daten der Lastmessungen

8 Datenanwendung am Stützweitenmodell

8.1 Vorbemerkungen

Die in Kapitel 7 dargestellten Ergebnisse beziehen sich entsprechend den Ansätzen aus [1] auf eine zugehörige Bezugsfläche. Der in Kapitel 2 dargestellte Stand der Normung verwendet zweckmäßigerweise die Stützweite der Parkhausdecken als Bezugsgröße. Die Ausführungen des Normenausschuss Bauwesen im DIN [6] zur Umrechnung der Bezugsflächen in äquivalente Stützweiten basieren dabei auf den Veröffentlichungen von Fingerloos/Grünberg [4] und Grünberg/Hansen [5]. Zur Wiedergabe wirklichkeitsnaher Deckenlastgrößen wurden in [4] Schnittgrößenberechnungen an verschiedenen statischen Systemen unter Ansatz tatsächlicher Radlasten und Fahrzeugabmessungen durchgeführt. Die nachstehende Tabelle 5 zeigt exemplarisch eine Übersicht über schwere Fahrzeuge aus den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Lastmessungen. Es ist zu erkennen, dass das Gewicht des Bemessungsfahrzeugs mit 25 kN von den modernen SUV's planmäßig überschritten wird und somit eine Anpassung der Untersuchungen an die Ergebnisse der aktuellen Lastmessungen erforderlich macht. In Kapitel 8.2 erfolgt für einachsige gespannte Plattenstreifen zunächst eine aktualisierte Zuordnung der Bezugsflächen zu äquivalenten Stützweiten. In Kapitel 8.3 werden dann die stützweitenabhängigen Schnittgrößen auf Basis realitätsnaher Laststellungen und angepasster Lastgrößen mit den Ergebnissen auf Basis der vorgeschlagenen gleichförmig verteilten Bemessungslasten verglichen.

1	2	3	4	5	6	7	8
Fahrzeug	Leergewicht* [kg]	Zul. Gesamtgewicht [kg]	gemessen [kg]	Zul. Achslast v/h [kg]	Länge/Breite [m]	Radstand/Spurweite [m]	Reifengröße
Porsche Cayenne	2430	3080	2560	1490/1700	4,80/1,93	2,68/1,65	275/45 R19
Audi Q7	2635	3405	2700	k.A.	5,06/2,00	3,02/1,67	295/40 R20
Range Rover	2858	3200	2740	1530/1850	4,97/2,03	2,99/1,62	245/55 R19
VW Touareg	2785	3200	2630	1600/1650	4,75/1,93	2,86/1,65	235/65 R17
BMW X-5	2185	2790	2650	1345/1555	4,85/1,93	2,93/1,65	255/55 R18
VW T5 (aufgelastet)	1824	3500	3480	1850/1850	4,89/1,90	3,00/1,63	235/55 R17
Referenz		2500		1250/1250	5,00/2,50	3,00/1,70	200mm/200mm

*) Fahrzeugtyp mit höchstem zu. Gesamtgewicht

Tabelle 5: Übersicht über schwere Fahrzeuge aus den Lastmessungen

8.2 Zuordnung der Bezugsfläche zu Stützweiten

Die Zuordnung der Bezugsflächen der Lastangabe zu Stützweiten mit äquivalenter Lastauswirkung erfolgt in Anlehnung an die in [4] dargestellten Untersuchungen. Als statische Systeme werden dabei der gelenkig gelagerte Einfeldträger sowie der beidseitig biegesteif eingespannte Einfeldträger betrachtet. In einem ersten Schritt werden den in Kapitel 7.2 dargestellten Lastgrößen auf Grundlage der aktuellen Lastmessungen (p^* mit Lastwerten 2009) abschnittsweise konstant verlaufende, gleichförmig verteilte Ersatzlasten angepasst ($q=4,5 \text{ kN/m}^2$ bei $F \leq 20 \text{ m}^2$, $q=3,5 \text{ kN/m}^2$ bei $20 < F \leq 50 \text{ m}^2$, $q=2,5 \text{ kN/m}^2$ bei $50 \text{ m}^2 < F$). In einem zweiten Schritt werden an beiden statischen Systemen die Feld- und Biegemomente für die Ersatzlasten sowie für den 95%-Fraktilwert des Lastmodells nach Marten [1] auf der Grundlage der neuen Lastmessungen (p^* mit Lastwerten 2009) bestimmt. Die bei dem Lastmodell erforderliche Bezugsfläche wird dabei entsprechend [4] aus dem Produkt aus der Stützweite und der mitwirkenden Breite zweier in Feldmitte konzentriert angeordneter Radlasten nach DAfStb-Heft 240 [12] bestimmt. Der Achsabstand der Radlasten wurde zu 1,80 m und die Aufstandsfläche eines Rades zu jeweils 0,2 m festgelegt.

In Abbildung 17 sind für die jeweiligen Lastgrößen die Feldmomente und in Abbildung 18 die entsprechenden Stützmomente in Abhängigkeit von der Systemstützweite dargestellt. Die Zuordnung der Bezugsflächen zu Stützweiten erfolgt durch einen Vergleich der stützweitenabhängigen Feld- bzw. Stützmomente. Die flächenabhängige, gleichförmig verteilte Ersatzlast ($q=4,5 \text{ kN/m}^2$ bei $F \leq 20 \text{ m}^2$, $q=3,5 \text{ kN/m}^2$ bei $20 < F \leq 50 \text{ m}^2$, $q=2,5 \text{ kN/m}^2$ bei $50 \text{ m}^2 < F$) darf dabei bis zu Stützweiten angesetzt werden, bei denen die resultierende Momentenbeanspruchung gleich bzw. größer ist, wie die bei Ansatz des 95%-Fraktilwerts des Lastmodells auf der Grundlage der neuen Lastmessungen (p^* mit Lastwerten 2009). Bei einachsig gespannten Plattenstreifen wird entsprechend Abbildung 17 und Abbildung 18 die Zuordnung $F=10 \text{ m}^2 \approx L=3 \text{ m}$; $F=20 \text{ m}^2 \approx L=5 \text{ m}$ und $F=50 \text{ m}^2 \approx L=9 \text{ m}$ vorgeschlagen.

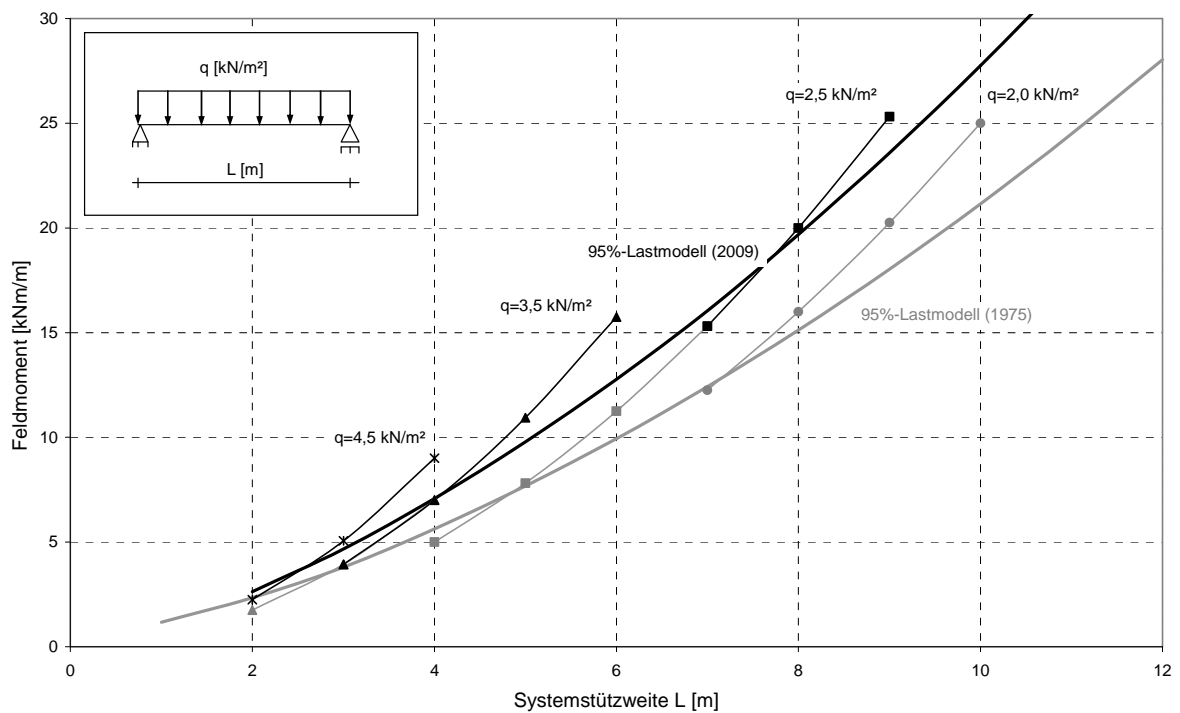


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Feldmoment und Stützweite am gelenkig gelagerten Einfeldträger in Abhängigkeit der Belastung

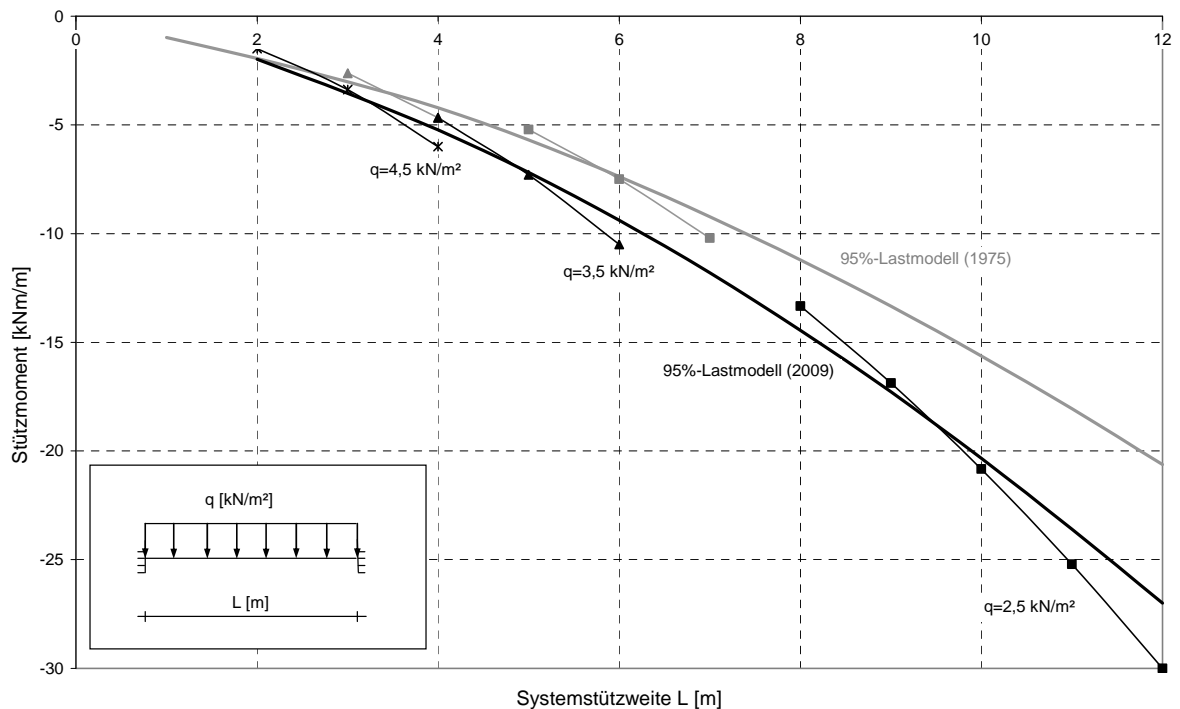


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Stützmoment und Stützweite am beidseitig eingespannten Einfeldträger in Abhängigkeit der Belastung

8.3 Ermittlung der stützweitenabhängigen Berechnungslasten

Aufbauend auf den Ergebnissen der Lastmessungen wird im Folgenden der 95%-Fraktilwert des Fahrzeuggewichtes von ~2.300kg bei einer Achslastverteilung von 60:40 als Bemessungsfahrzeug definiert. Die maßgebende Einzelradlast kann dann bestimmt werden zu:

$$R = \frac{1}{2} \cdot 0,6 \cdot 2.300\text{kg} = 690\text{kg} \approx 6,9\text{kN}$$

Die Geometrie der Radlaststellungen des Referenzfahrzeugs sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Annahmen hinsichtlich der Radanordnungen innerhalb eines Stellplatzes sowie die Modellannahmen zur Lasteinleitung und zur mitwirkenden Deckenbreite wurden aus [4] übernommen. Das prinzipielle Vorgehen ist auf den folgenden Seiten exemplarisch für eine Deckenspannweite von 9 m dargestellt. In Tabelle 6 sind die entsprechenden Schnittgrößen für die relevanten Stützweiten von 3m, 5m und 9m zusammenfassend dargestellt.

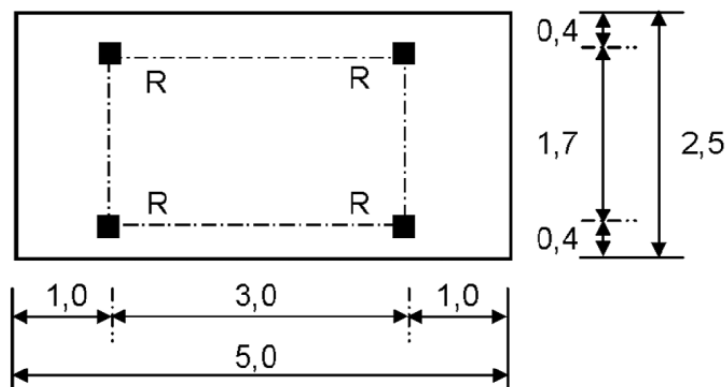


Abbildung 19: Geometrie des Referenzfahrzeugs im Stellplatz [4]

	Stützweite [m]		
	3	5	9
Einzugsfläche [m ²]	>10	>20	>50
Ersatzlastgröße $p_{\text{äqu}}$	13,8kN / 3,9kN/m ²	3,3kN/m ²	2,5kN/m ²
$V_{R,l}$ [kN/m]	9,6	17,7	24,7
M_F [kNm/m]	4,4	7,7	23,4
M_{St} [kNm/m]	-2,5	-6,8	-16,7

Tabelle 6: Stützweitenabhängige Schnittgrößen der Systeme

Deckenspannweite 9m – Ermittlung des Feldmoments:

- Fahrzeuganordnung:

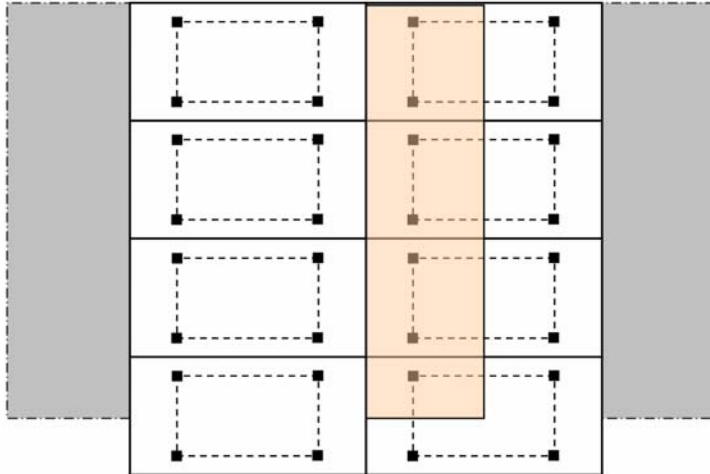


Abbildung 20: Anordnung der Fahrzeuge analog zu [4]

- statisches System:

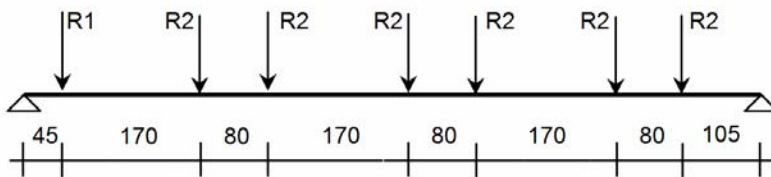


Abbildung 21: Statisches System zur Ermittlung des Feldmomentes

- mitwirkende Breiten:

Die mitwirkende Deckenbreite errechnet sich gemäß [12] nach:

$$b_{mv} = t_y + 2,5 \cdot x \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) \text{ mit } t_y = 0,5\text{m}$$

Für R1 ergibt sich eine mitwirkende Breite von 1,57 m. Die Radlast beträgt somit $6,9\text{kN}/1,57\text{m} = 5,63\text{kN/m}$. Für alle weiteren Radlasten (R2) beträgt die mitwirkende Deckenbreite 2,5m (halbe Stellplatzbreite). Die Radlast ergibt sich somit zu $2,76\text{kN/m}$.

- Feldmoment und äquivalente Flächenlast:

Das maximale Feldmoment ergibt sich für das dargestellte statische System sowie die entsprechenden mitwirkenden Plattenbreiten zu $M_F = 23,4 \text{ kNm/m}$. Die äquivalente Flächenlast für das Feldmoment ist dann $p_{F,\text{äqu}} = 23,4\text{kNm/m} \cdot 8 / (9 \cdot \text{m})^2 = 2,3\text{kN/m}^2$.

9 Empfehlungen zur Anwendung in DIN 1055-3

Nachfolgend sollen zunächst die Ergebnisse des Forschungsvorhabens mit dem derzeit gültigen Lastansatz nach DIN 1055-3 [2] verglichen werden. Bei der Berechnung nach aktueller DIN 1055-3 [2] wurden die entsprechenden Empfehlungen des NABau [6] berücksichtigt. Der eigene Ansatz berücksichtigt die in Kapitel 8.2 festgesetzten gleichförmig verteilten Ersatzlasten ($q=4,5 \text{ kN/m}^2$ bei $F \leq 20 \text{ m}^2$, $q=3,5 \text{ kN/m}^2$ bei $20 < F \leq 50 \text{ m}^2$, $q=2,5 \text{ kN/m}^2$ bei $50 \text{ m}^2 < F$) sowie die Zuordnung der Bezugsflächen zu äquivalenten Stützweiten ($10 \text{ m}^2/3 \text{ m}$; $20 \text{ m}^2/5 \text{ m}$; $50 \text{ m}^2/9 \text{ m}$).

Abbildung 22 beinhaltet die flächenabhängige Gegenüberstellung der verschiedenen Ansätze. Es ist zu erkennen, dass die derzeit gültige normative Regelung [2] aufgrund der gestiegenen Fahrzeuggewichte in weiten Teilen erwartungsgemäß geringere Lastwerte liefert, als auf Grundlage der aktuellen Forschungsergebnisse erforderlich wären. Es wird daher empfohlen, die in DIN 1055-3 [2] festgesetzten Parkhauslasten entsprechend dem in Tabelle 7 dargestellten Vorschlag anzupassen. Dabei gilt die Stützweitzuordnung nur für die Bemessung einachsig gespannter Plattenstreifen. Bei zweiachsig gespannten Decken ist die Ersatzlast in Abhängigkeit von der Größe des einzelnen Deckenfeldes und bei der Lastweiterleitung in Abhängigkeit von der Größe der Lasteinzugsfläche des sekundären Traggliedes zu bestimmen.

Entsprechend Tabelle 8 sind bei dem Ansatz der Achslast nach DIN 1055-3 [2] 6.3 (3) die berechneten Querkräfte größer als die bei dem Ansatz einer Flächenlast bzw. des Bemessungsfahrzeugs nach Kapitel 8.3 (13,8 kN-Achse). Aufgrund des schwersten gemessenen Fahrzeuges entsprechend Tabelle 1 (3480kg) sowie der Achslastverteilung (60:40) wird allerdings empfohlen, den Nachweis örtlicher Beanspruchungen (z. B. Querkraft am Auflager) weiterhin entsprechend DIN 1055-3 [2] mit $2 \cdot Q_k = 20 \text{ kN}$ zu führen ($0,6 \cdot 34,8 \text{ kN} = 20,9 \text{ kN} \approx 20 \text{ kN}$).

Fläche [m ²]	Stützweite [m]	Ersatzlast [kN/m ²]
$10 \leq F < 20$	$3 \leq L < 5$	4,5
$20 \leq F < 50$	$5 \leq L < 9$	3,5
$50 \leq F$	$9 \leq L$	2,5

Tabelle 7: Zuordnung der Ersatzlasten zu Flächengrößen und Stützweiten

Stützweite [m]		3	5	9
Einzugsfläche [m ²]		>10	>20	>50
$V_{R,I}$ [kN/m]	DIN 1055-3 [2] (20kN-Achse)	17,2	25,7	35,8
	TU Darmstadt 2009 (13,8kN-Achse)	11,9	17,7	24,7
	TU Darmstadt 2009 (Flächenlast)	6,6	8,3	9,9
M_F [kNm/m]	DIN 1055-3 [2]	3,9	7,8	20,0
	TU Darmstadt 2009 (13,8kN-Achse)	4,4	7,7	23,4
	TU Darmstadt 2009 (Flächenlast)	5,0	10,6	25,3
M_{St} [kNm/m]	DIN 1055-3 [2]	-2,6	-5,2	-13,5
	TU Darmstadt (13,8kN-Achse)	-2,5	-6,8	-16,7
	TU Darmstadt 2009 (Flächenlast)	-3,3	-7,1	-16,9
für Momente maßgebende gleichförmig verteilte Berechnungslast p [kN/m ²]	DIN 1055-3 [2]	3,5kN/m ²	2,5kN/m ²	2,0kN/m ²
	TU Darmstadt 2009 (13,8kN-Achse)	3,9kN/m ²	3,3kN/m ²	2,5kN/m ²
	TU Darmstadt 2009 (Flächenlast)	4,4kN/m ²	3,4kN/m ²	2,5kN/m ²

Tabelle 8: Stützweitenabhängige Gegenüberstellung der Schnittgrößen

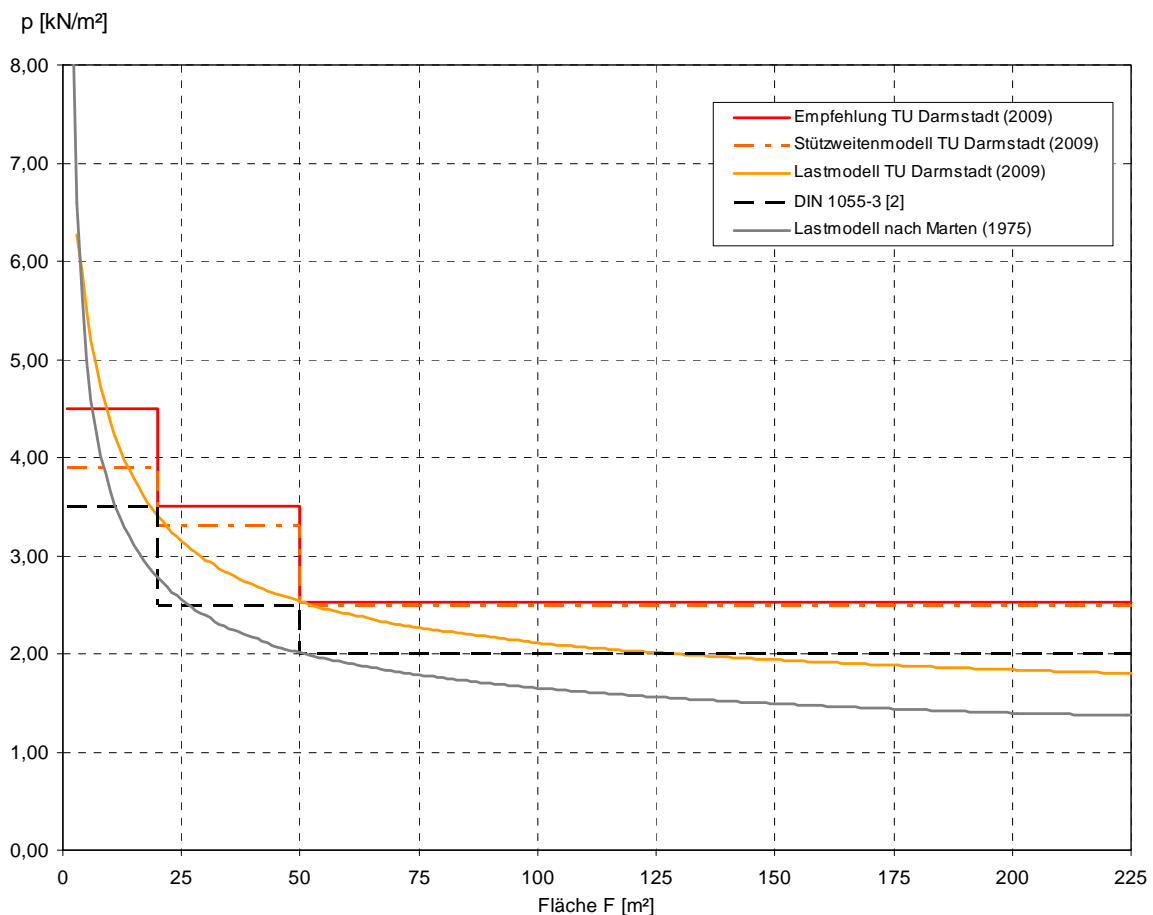


Abbildung 22: Flächenabhängige Gegenüberstellung der Berechnungslasten

10 Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens war es, die in DIN 1055-3 [2] für Parkhäuser angegebenen Nutzlasten an das in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegene Fahrzeuggewicht anzupassen.

In diesem Zusammenhang wurden am Parkhaus *Hauptwache* in Frankfurt am Main eigene Lastmessungen an Kraftfahrzeugen durchgeführt und die Ergebnisse mit den Angaben des Kraftfahrtbundesamtes [9] verglichen. Auf der Grundlage eines statistischen Anpassungstests konnte die Hypothese bestätigt werden, dass die gemessenen Daten die Grundgesamtheit aller in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge zutreffend abbilden.

Die durch die Lastmessungen erhaltene Verteilung der aktuellen Fahrzeuggewichte ermöglichte es, die gleichförmig verteilten Parkhauslasten in Abhängigkeit der Bezugsfläche auf der Grundlage numerischer Simulationstechnik zu bestimmen. Aufbauend hierauf wurden die für die normative Umsetzung erforderlichen jährlichen Extremwerte der Parkhauslasten auf Basis des Lastmodells nach Marten [1] bestimmt. Die erforderlichen Modellparameter wurden dabei an die Ergebnisse der aktuellen Lastmessungen angepasst. Erwartungsgemäß ergaben sich auf Grundlage der aktuellen Lastmessungen aus dem Jahr 2009 in allen Bereichen höhere Lastwerte, als auf Grundlage der bisher verwendeten Lastmessungen aus den Jahren 1972/73 [1].

An die Ergebnisse des aktualisierten Lastmodells wurden abschnittsweise konstant verlaufende Ersatzlasten angepasst, die in allen Bereichen höher sind, als die bei Parkhäusern derzeit anzusetzenden Lasten nach DIN 1055-3 [2]. Der derzeitige normative Ansatz ist somit nicht mehr geeignet, das in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegene Fahrzeuggewicht abzubilden und sollte an die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens angepasst werden. Ein entsprechender Vorschlag für die flächen- und stützweitenabhängigen Lastgrößen kann Kapitel 9 entnommen werden.

Der Ansatz zukünftiger Entwicklungen von Fahrzeuggewichten war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens und findet somit in den Ergebnissen keine Berücksichtigung. Darüber hinaus wurden alle Untersuchungen auf Basis einer Parkstandsbreite von 2,50m geführt. Dies sollte bei der Bewertung und weiteren Verwendung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens beachtet werden.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Marten,K: „Zur Festlegung wirklichkeitsnaher Nutzlasten und Lastabminderungsfaktoren“, Dissertation, Darmstadt 1975.
- [2] DIN 1055-3:2006-03: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten, März 2006, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [3] Parkhaus Betriebs GmbH: „Jahresbilanz der Belegung des Parkhauses Hauptwache in Frankfurt am Main“, nicht öffentliches Dokument.
- [4] Fingerloos, F.; Grünberg, J.: „Die Parkhauslasten in DIN 1055-3“, Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008) Heft 3
- [5] Grünberg, J.; Hansen, M.: „Vergleichende Untersuchungen der Auswirkung der Parkhauslasten nach DIN 1055-3(3/2000)“, Bericht Nr. 0157-2 vom 25.10.2006, Institut für Massivbau der Universität Hannover
- [6] Normenausschuss Bauwesen im DIN (NABau): Auslegungen aktueller Normungen, Stand der Auslegungen 2008-09-15
- [7] DIN 1055-3:2002-10: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten, Oktober 2002, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [8] DIN 1055 Blatt 3:1963-03: Lastannahmen für Bauten – Blatt 3: Verkehrslasten, März 1963, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [9] Kraftfahrt-Bundesamt: „Fahrzeugzulassungen - Bestand, Gewichtsklassen, Sitzplätze 01.01.2007“, Statistische Mitteilungen, September 2007
- [10] Kraftfahrt-Bundesamt: „Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2008“, Pressemitteilung 4/2008, Januar 2008
- [11] Kraftfahrt-Bundesamt: „Jährliche Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach zulässigem Gesamtgewicht 1989-2006“, Januar 2007
- [12] DAfStb Heft 240: „Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken, Beuth-Verlag, Berlin 1991