

Ein gemeinsames Verkehrsmittel- und Losgrößenwahlmodell basierend auf Copula-Funktionen

Vortrag zur Konferenz "Verkehrsökonomik und -politik"
Berlin, 23. und 24. Mai 2019

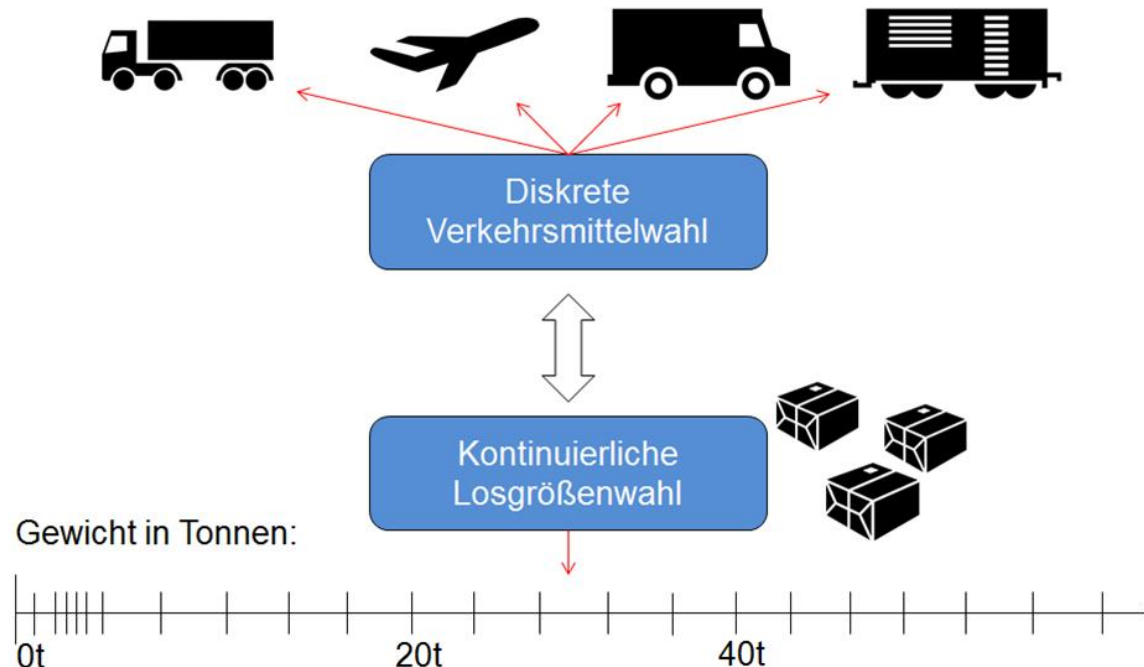
Jan Blechschmidt



Wissen für Morgen

Motivation

- Trend hin zu höherem Anteil an kleineren Sendungen und mehr LKW-Transporten (u.a. aufgrund des wachsenden Onlinehandels)
- Wie kann man dem Zusammenhang zwischen der **Verkehrsmittelwahl** und der **Losgrößenwahl** in der Modellierung gerecht werden?



Agenda

- Zielstellung
- Theorie – Minimierung der Gesamtlogistikkosten
- Gemeinsames Verkehrsmittel- und Losgrößenwahlmodell basierend auf Copula-Funktionen
- Datengrundlage
- Modellergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

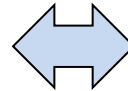


Zielstellung

Gemeinsame Modellierung von Verkehrsmittel- und Losgrößenwahl

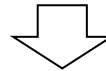
Theorie: Minimierung der Gesamtlogistikkosten

Welches Verkehrsmittel Y soll für Losgröße X gewählt werden?



Welche Losgröße X soll für Verkehrsmittel Y gewählt werden?

1. **Variablen sind nicht exogen**
→ Missachtung führt zu „Endogeneity-Bias“!
2. **Variablen sind zwei Dimensionen einer übergeordneten Wahlentscheidung**
→ Beachtung gemeinsamer unbeobachteter Heterogenität notwendig!



Modellierung (vgl. auch Spissu et al. 2009)

1. **Multinomiales Logit-Modell** für die Verkehrsmittelwahl
2. **Log-lineare Regressionen** für die Losgrößenwahl, gegeben das Verkehrsmittel
3. **Copula-Funktionen** zur Verknüpfung der Modelle (vgl. Pourabdollahi et al. 2013, Irannezhad et al. 2017, Keja et al. 2019)



Theorie – Minimierung der Gesamtlogistikkosten

Total Logistics Costs als Erweiterung der generalisierten Kostenfunktion in der Verkehrsmittelwahl <small>(vgl. Combes and Tavasszy 2016)</small>	
$C_m(q) = \frac{Q}{q} F_m + Q(at_m + c_m) + aq$	
<p> C_m: Gesamtlogistikkosten für Verkehrsmittel m pro Jahr q: Losgröße pro Transport Q: Bekannter und konstanter Güterfluss pro Jahr F_m: Fixkosten des Transports mit Verkehrsmittel m (Bereitstellung und Bearbeitung) a: Sendungs-“Value of time“ c_m: Multiplikative Konstante der variablen Transportkosten von m (Annahme: Variable Kosten proportional steigend zur Losgröße) t_m: Reisezeit mit Verkehrsmittel m </p>	
Minimierung	Optimale Losgröße: $q^{opt} = \sqrt{\frac{F_m Q}{a}}$
Rückeinsetzen	Kosten für Verkehrsmittel m , gegeben die optimale Losgröße: $C_m(q^{opt}) = 2\sqrt{aF_m Q} + (at_m + c_m)Q$
„Pro Tonne“	"Generalisierte Kostenfunktion": $\frac{C(m)}{Q} = \frac{C_m(q^{opt})}{Q} = 2\sqrt{\frac{aF_m}{Q}} + at_m + c_m$



Gemeinsames Verkehrsmittel- und Losgrößenwahlmodell basierend auf Copula-Funktionen

1. Multinomiales Logit-Modell für Verkehrsmittelwahl

- Entscheider n wählt Verkehrsmittel m (abgekürzt: $R_{nm} = 1$), wenn m den höchsten Nutzen unter den Alternativen generiert.
- Nutzenfunktion: $U_{nm}^* = \beta'_m z_{nm} + v_{nm}$
- Entscheidungsregel: $R_{nm} = 1 \Leftrightarrow \beta'_m z_{nm} > v_{nm}$ mit $v_{nm} := \max_{k \neq m} U_{nk}^* - \eta_{nm}$.

2. Log-lineare Regressionen für die Losgrößenwahl, gegeben das Verkehrsmittel

- Die Losgröße ist nur beobachtet, wenn Entscheider n Verkehrsmittel m gewählt hat.
- Regression: $\log(q_{nm}^*) = \alpha'_m x_{nm} + \epsilon_{nm}$

Mit: α', β' Parametervektoren, x_{nm}, z_{nm} erklärende Variablen. Störterme η_{nm} und ϵ_{nm} genügen den üblichen Annahmen.



Gemeinsames Verkehrsmittel- und Losgrößenwahlmodell basierend auf Copula-Funktionen

3. Copula-Funktionen zur Verknüpfung der Modelle

- Eine Copula-Funktion C_θ ist eine spezielle Verteilungsfunktion.
- Modellierung der gemeinsamen Verteilung der (transformierten) Störterme mittels Copula-Funktionen $C_{\theta m}$, wobei θ die Stärke und Richtung des Zusammenhangs definiert.

$$R_{nm} = 1 \Leftrightarrow \beta'_n z_{nm} > \nu_{nm}$$

$$\log(q_{nm}^*) = \alpha'_m x_{nm} + \epsilon_{nm}$$

1. Transformiere ν_{nm} und ϵ_{nm} mittels ihrer inversen Verteilungsfunktionen $F_{\nu m}^{-1}, F_{\epsilon m}^{-1}$
 2. Modelliere die gemeinsame Verteilungsfunktion $F_{\nu m, \epsilon m}$ mittels Copula-Funktion

$$F_{\nu m, \epsilon m} = C_\theta(F_{\nu m}, F_{\epsilon m})$$
- Verwendete Copula: Frank-Copula (impliziert symmetrische Zusammenhangsstruktur – andere Spezifikationen möglich, aber Frank-Copula ist bewährt).

Mit: α', β' Parametervektoren, x_{nm}, z_{nm} erklärende Variablen. Störterme η_{nm} und ϵ_{nm} genügen den üblichen Annahmen.



Gemeinsames Verkehrsmittel- und Losgrößenwahlmodell basierend auf Copula-Funktionen

- Likelihood-Funktion des gemeinsamen Modells:

$$L(\vartheta) = \prod_{n=1}^N \prod_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{\sigma_{\epsilon m}} \frac{\partial C_{\theta m}(u_{n1}^m, u_{n2}^m)}{\partial u_{n2}^m} f_{\epsilon m} \left(\frac{\log(q_{nm}) - \alpha'_m x_{nm}}{\sigma_{\epsilon m}} \right) \right\}^{R_{nm}}$$

- Hierbei gilt: $f_{\epsilon m}$ ist die Dichte von ϵ_{nm} , $\sigma_{\epsilon m}$ der Skalierungsparameter und $u_{n1}^m = F_{vm}(\beta'_m z_{nm})$, $u_{n2}^m = F_{\epsilon m} \left(\frac{\log(q_{nm}) - \alpha'_m x_{nm}}{\sigma_{\epsilon m}} \right)$.
- Parameterschätzung erfolgt mittels Quasi-Newton-Verfahren (L-BFGS-B – Algorithmus).



Datengrundlage

- US Commodity Flow Survey 2012 (www.census.gov/econ/cfs/pums.html)
- 4.547.661 Transportfälle von ca. 60.000 befragten Betrieben aus den USA.
- **Datensatzgenerierung**
 - Ziehe ein gewichtetes Sample mit 15.000 Beobachtungen.
 - Gruppier die Verkehrsmittel in 5 Kategorien:
 - Gewerblicher Straßengüterverkehr (16.69%)
 - Werkverkehr (27.21%)
 - Luftfracht (1.60%)
 - KEP (54.20%)
 - Sonstiges (0.29%)
 - Entferne unplausible Beobachtungen und Verkehrsmittel unter "Sonstiges"
 - Schätze das Modell mit 2/3 der Beobachtungen (Trainingsdatensatz, N=9968)



Datengrundlage

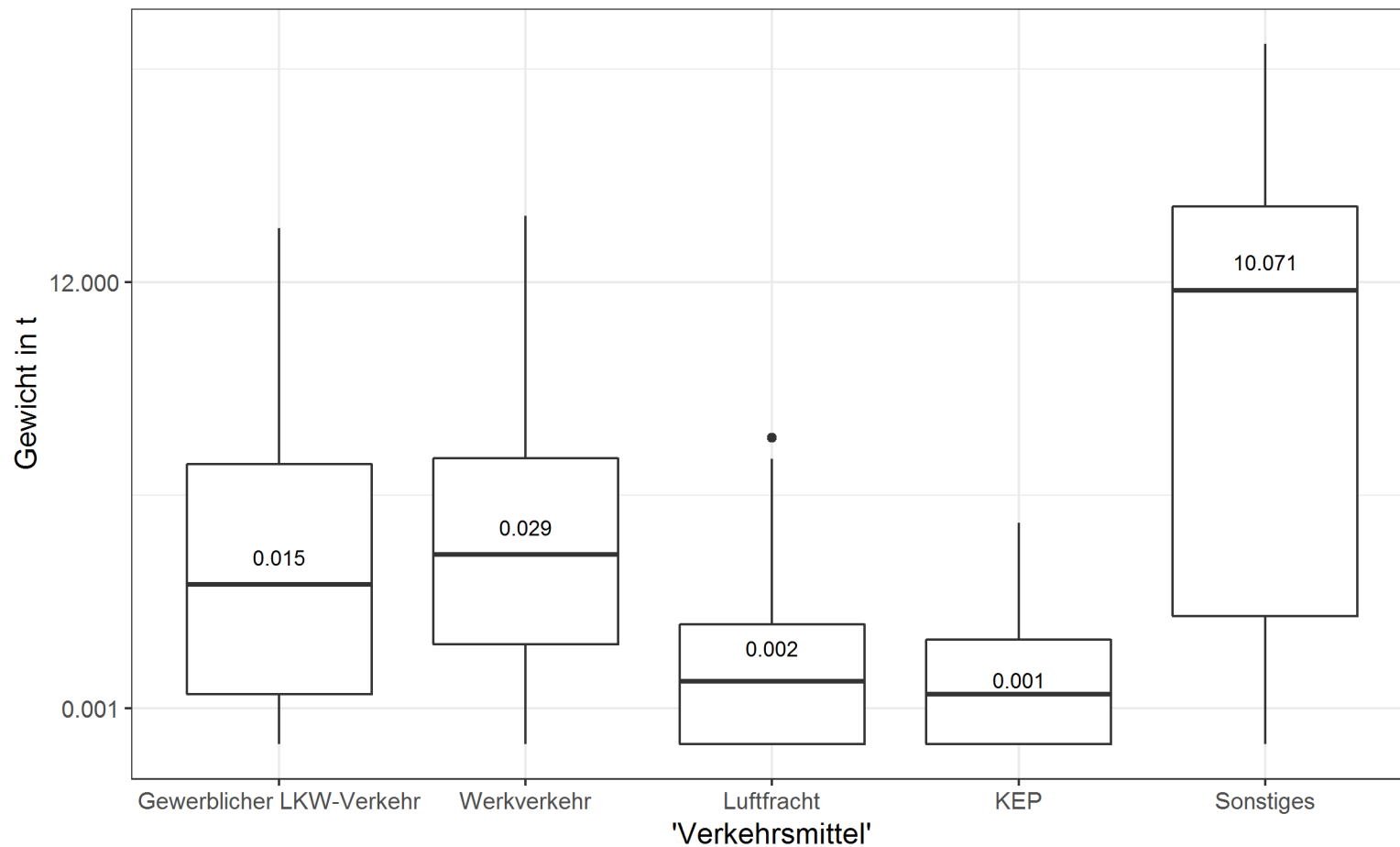
Erklärende Variablen

- Keine Informationen zur Sender-Empfänger-Beziehung (keine Variable Q)
- Keine Zeit- und Kostenvariablen:
 - Approximation der Kosten c durch Entfernungvariable
 - Approximation des Sendungs-“Value of time“ a durch die Warenwertdichte
 - Approximation der Kosten für gebundenes Kapital während des Transports durch Warenwertdichte*Entfernung
 - Integration zusätzlicher Dummy-Variablen



Datengrundlage

Boxplot: Losgröße in t nach 'Verkehrsmittel'



Modellergebnisse

Variable	„Verkehrsmittel“			
	Gewerblicher LKW-Verkehr	LKW-Werkverkehr	Luftfracht	KEP
Verkehrsmittelwahlmodell (Logit)				
ASC	-	2.971***	-12.816***	-4.768***
LN Entfernung	-	-0.566***	0.301***	-0.123***
LN Entfernung*Warenwertdichte	-	-	0.502***	0.426***
Dummy Export	-	-2.727***	1.755***	-
Dummy Gefährlich	-	0.658***	-	-1.305***
Dummy Temperaturgeführt	-	1.772***	-	-0.824***
Losgrößenwahlmodelle (Log-Lineare Regressionen)				
Konstante	4.559***	4.388***	-	-3.155***
LN Warenwertdichte	-0.913***	-0.962***	-0.212***	-0.284***
LN Entfernung	0.231***	0.305***	-	-
SCTG Gütergruppe				
Elektronik	-0.697***	-1.067***	-	-0.095**
Metall und Maschinen	-	-0.409***	-	0.331***
Holz, Papier, Textilien	-1.855***	-2.093***	-	-0.412***
Chemische Produkte	-	-0.786***	-	-0.23***
Dummy Export	-	3.999***	0.886***	0.325***
Dummy Gefährlich	3.296***	0.594***	-	0.984***
Dummy Temperaturgeführt	1.800***	-	1.244*	1.097***
Skalierungsparameter	2.466***	1.892***	1.464***	1.214***
Frank-Copula-Parameter	1.54***	-	2.047**	1.097***
Kendall's Tau	0.167	-	0.219	0.120

Modellselektion	Log-Likelihood-Wert	BIC
Unabhängigkeits-Copula	-25685.65	51941.97
Frank-Copula	-25662.86	51933.19



Modellergebnisse

Variable	„Verkehrsmittel“			
	Gewerblicher LKW-Verkehr	LKW-Werkverkehr	Luftfracht	KEP
	Verkehrsmittelwahlmodell (Logit)			
ASC	-	2.971***	-12.816***	-4.768***
LN Entfernung	-	-0.566***	0.301***	-0.123***
LN Entfernung*Warenwertdichte	-	-	0.502***	0.426***
Dummy Export	-	-2.727***	1.755***	-
Dummy Gefährlich	-	0.658***	-	-1.305***
Dummy Temperaturgeführt	-	1.772***	-	-0.824***
	Losgrößenwahlmodelle (Log-Lineare Regressionen)			
Konstante	4.559***	4.388***	-	-3.155***
LN Warenwertdichte	-0.913***	-0.962***	-0.212***	-0.284***
LN Entfernung	0.231***	0.305***	-	-
SCTG Gütergruppe				
Elektronik	-0.697***	-1.067***	-	-0.095**
Metall und Maschinen	-	-0.409***	-	0.331***
Holz, Papier, Textilien	-1.855***	-2.093***	-	-0.412***
Chemische Produkte	-	-0.786***	-	-0.23***
Dummy Export	-	3.999***	0.886***	0.325***
Dummy Gefährlich	3.296***	0.594***	-	0.984***
Dummy Temperaturgeführt	1.800***	-	1.244*	1.097***
Skalierungsparameter	2.466***	1.892***	1.464***	1.214***
Frank-Copula-Parameter	1.54***	-	2.047**	1.097***
Kendall's Tau	0.167	-	0.219	0.120

- Frank-Copula-Parameter zumeist signifikant und positiv
- Kendall's Tau positiv

→ Zusammenhang zwischen den Entscheidungen negativ!



Modellergebnisse

- Werkverkehr und KEP haben korrekten negativen Entfernungskoeffizient.
- Relative Effizienz von KEP und Luftfahrt (hohe Geschwindigkeit) für Waren von höherer Warenwertdichte ist korrekt.

Variable	„Verkehrsmittel“			
	Gewerblicher LKW-Verkehr	LKW-Werkverkehr	Luftfracht	KEP
	Verkehrsmittelwahlmodell (Logit)			
ASC	-	2.971***	-12.816***	-4.768***
LN Entfernung	-	-0.566***	0.301***	-0.123***
LN Entfernung*Warenwertdichte	-	-	0.502***	0.426***
Dummy Export	-	-2.727***	1.755***	-
Dummy Gefährlich	-	0.658***	-	-1.305***
Dummy Temperaturgeführt	-	1.772***	-	-0.824***
	Losgrößenwahlmodelle (Log-Lineare Regressionen)			
Konstante	4.559***	4.388***	-	-3.155***
LN Warenwertdichte	-0.913***	-0.962***	-0.212***	-0.284***
LN Entfernung	0.231***	0.305***	-	-
SCTG Gütergruppe				
Elektronik	-0.697***	-1.067***	-	-0.095**
Metall und Maschinen	-	-0.409***	-	0.331***
Holz, Papier, Textilien	-1.855***	-2.093***	-	-0.412***
Chemische Produkte	-	-0.786***	-	-0.23***
Dummy Export	-	3.999***	0.886***	0.325***
Dummy Gefährlich	3.296***	0.594***	-	0.984***
Dummy Temperaturgeführt	1.800***	-	1.244*	1.097***
Skalierungsparameter	2.466***	1.892***	1.464***	1.214***
Frank-Copula-Parameter	1.54***	-	2.047**	1.097***
Kendall's Tau	0.167	-	0.219	0.120



Modellergebnisse

Variable	„Verkehrsmittel“			
	Gewerblicher LKW-Verkehr	LKW-Werkverkehr	Luftfracht	KEP
	Verkehrsmittelwahlmodell (Logit)			
ASC	-	2.971***	-12.816***	-4.768***
LN Entfernung	-	-0.566***	0.301***	-0.123***
LN Entfernung*Warenwertdichte	-	-	0.502***	0.426***
Dummy Export	-	-2.727***	1.755***	-
Dummy Gefährlich	-	0.658***	-	-1.305***
Dummy Temperaturgeführt	-	1.772***	-	-0.824***
	Losgrößenwahlmodelle (Log-Lineare Regressionen)			
Konstante	4.559***	4.388***	-	-3.155***
LN Warenwertdichte	-0.913***	-0.962***	-0.212***	-0.284***
LN Entfernung	0.231***	0.305***	-	-
SCTG Gütergruppe				
Elektronik	-0.697***	-1.067***	-	-0.095**
Metall und Maschinen	-	-0.409***	-	0.331***
Holz, Papier, Textilien	-1.855***	-2.093***	-	-0.412***
Chemische Produkte	-	-0.786***	-	-0.23***
Dummy Export	-	3.999***	0.886***	0.325***
Dummy Gefährlich	3.296***	0.594***	-	0.984***
Dummy Temperaturgeführt	1.800***	-	1.244*	1.097***
Skalierungsparameter	2.466***	1.892***	1.464***	1.214***
Frank-Copula-Parameter	1.54***	-	2.047**	1.097***
Kendall's Tau	0.167	-	0.219	0.120

- Losgröße sinkt korrekt mit Warenwertdichte
- Losgröße steigt korrekt mit Entfernung



Modellergebnisse

- Gefährliche oder temperaturgeführte Güter werden eher im Werkverkehr versendet (spezielles Handling).
- Luftfahrt ist präferiert für Exporte. Werkverkehr ist mit kürzeren Entfernungen assoziiert.

- Vorzeichen größtenteils plausibel.
- Gefährliche Güter werden eher in größeren Einheiten versendet (spezielles Handling).
- Temperaturgeführte Güter auch?

Variable	„Verkehrsmittel“			
	Gewerblicher LKW-Verkehr	LKW-Werkverkehr	Luftfracht	KEP
	Verkehrsmittelwahlmodell (Logit)			
ASC	-	2.971***	-12.816***	-4.768***
LN Entfernung	-	-0.566***	0.301***	-0.123***
LN Entfernung*Warenwertdichte	-	-	0.502***	0.426***
Dummy Export	-	-2.727***	1.755***	-
Dummy Gefährlich	-	0.658***	-	-1.305***
Dummy Temperaturgeführt	-	1.772***	-	-0.824***
	Losgrößenwahlmodelle (Log-Lineare Regressionen)			
Konstante	4.559***	4.388***	-	-3.155***
LN Warenwertdichte	-0.913***	-0.962***	-0.212***	-0.284***
LN Entfernung	0.231***	0.305***	-	-
SCTG Gütergruppe				
Elektronik	-0.697***	-1.067***	-	-0.095**
Metall und Maschinen	-	-0.409***	-	0.331***
Holz, Papier, Textilien	-1.855***	-2.093***	-	-0.412***
Chemische Produkte	-	-0.786***	-	-0.23***
Dummy Export	-	3.999***	0.886***	0.325***
Dummy Gefährlich	3.296***	0.594***	-	0.984***
Dummy Temperaturgeführt	1.800***	-	1.244*	1.097***
Skalierungsparameter	2.466***	1.892***	1.464***	1.214***
Frank-Copula-Parameter	1.54***	-	2.047**	1.097***
Kendall's Tau	0.167	-	0.219	0.120



Zusammenfassung und Ausblick

- **Verknüpfung von Verkehrsmittel- und Losgrößenwahlmodellen mittels Frank-Copula-Funktionen:**
 1. Genauere Parameterschätzungen
 2. Verbesserte, modellgestützte Maßnahmenevaluationen möglich
 3. Verbesserte Einsichten über den Zusammenhang von Verkehrsmittel- und Losgrößenwahl
 - Es gibt unbeobachtete Faktoren, die beide Entscheidungen simultan treiben (bei Werkverkehr nicht signifikant)
 - Zusammenhang ist symmetrisch und negativ (positives Kendall's Tau)
- Imputierung von Informationen zur Sender-Empfänger-Beziehung (Variable Q)?
- Imputierung von Zeit- und Kostenvariablen?
- Verwendung anderer Copula-Funktionen?



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Jan Blechschmidt, M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Verkehrsforschung
Abteilung: Wirtschaftsverkehr

Mail: Jan.Blechschmidt@dlr.de
Telefon: +49 (0)30 67055 9656

