

## Entwicklung von Prognosefunktionen für den Straßenzustand kommunaler Straßen

FA 77.502

Forschungsstellen: RWTH Aachen, Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB) (Prof. Dr.-Ing. D. Vallée) /

RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (isac) (Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser)

Bearbeiter: Wang, D. / Schneider, M. / Kemper, D. / Vallée, D. / Oeser, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Januar 2014

Vorteil aus der Erfassungskampagne und wird z. T. dazu ange-regt, diese auch regelmäßig durchzuführen.

### 2 Untersuchungsmethodik

Das Vorgehen der Methodik ist in Bild 1 schematisch darge-stellt.

Für die Zustandsprognose ist eine Vielzahl von Daten notwen-dig. Hierfür ist deren Qualität von entscheidender Bedeutung, womit deren Auswertbarkeit und ein Vergleich über mehrere Zustandserfassungskampagnen aus verschiedenen Jahren ermöglicht werden sollte. Die aufbereiteten Daten (Schritt I) unterscheiden sich in ihrer Art in nominal oder metrisch skalie-ter Größen. Erstere werden mithilfe einer Varianzanalyse (Schritt II) in einzelne Gruppen eingeteilt, für die ein signifikan-ter Zusammenhang mit den Zustandsgrößen der Deckschicht nachzuweisen ist. Die metrisch skalierten Parameter dienen der Korrelationsanalyse (Schritt III), in welcher die maßgebliche Laufvariable oder Laufvariablen ermittelt werden. Hier stellte sich heraus, dass das Deckschichtalter bzw. die Anzahl der Jahre nach der ersten Zustandserfassungskampagne als maß-gebender Einflussparameter zu betrachten ist. Für das zweidi-mensionale Modell fließt als zweite Variable die Anzahl der Schächte oder Aufgrabungen in die Funktion mit ein. Die Vor-gehensweise der Regressionsanalyse (Schritt IV) ist identisch zum eindimensionalen Modell. Um die prognostizierten, stra-ßennetzbezogenen Verhaltenskurven besser der Realität anzu-passen und somit die Güte zu steigern, findet in einem letzten Schritt eine abschnittsbezogene Kalibrierung (Schritt V) statt.

### 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist die Entwicklung von Prognosefunktionen für innerörtliche Straßenzustände. Das Vorgehen lässt sich in die Literaturanalyse, die Datenanforde-rung, -aufbereitung und -auswertung sowie die Modellierung und Validierung aufteilen. Im Gegensatz zur bisherigen Vor-gehensweise bei Außerortsstraßen wurden im Rahmen dieses Vorhabens mathematische Modelle generiert, die für einen definierten Abschnitt auf Basis der erfassten Zustandsdaten und der typisierten Untergrundsituation ermittelt wurden. Vortei-le des Systems liegen darin, dass jede Kommune Prognose-funktionen für das eigene Straßennetz erhält und diese Funkti-onen mit jeder weiteren Erfassungskampagne verfeinern bzw. verbessern kann. Somit hat jede Kommune einen direkten

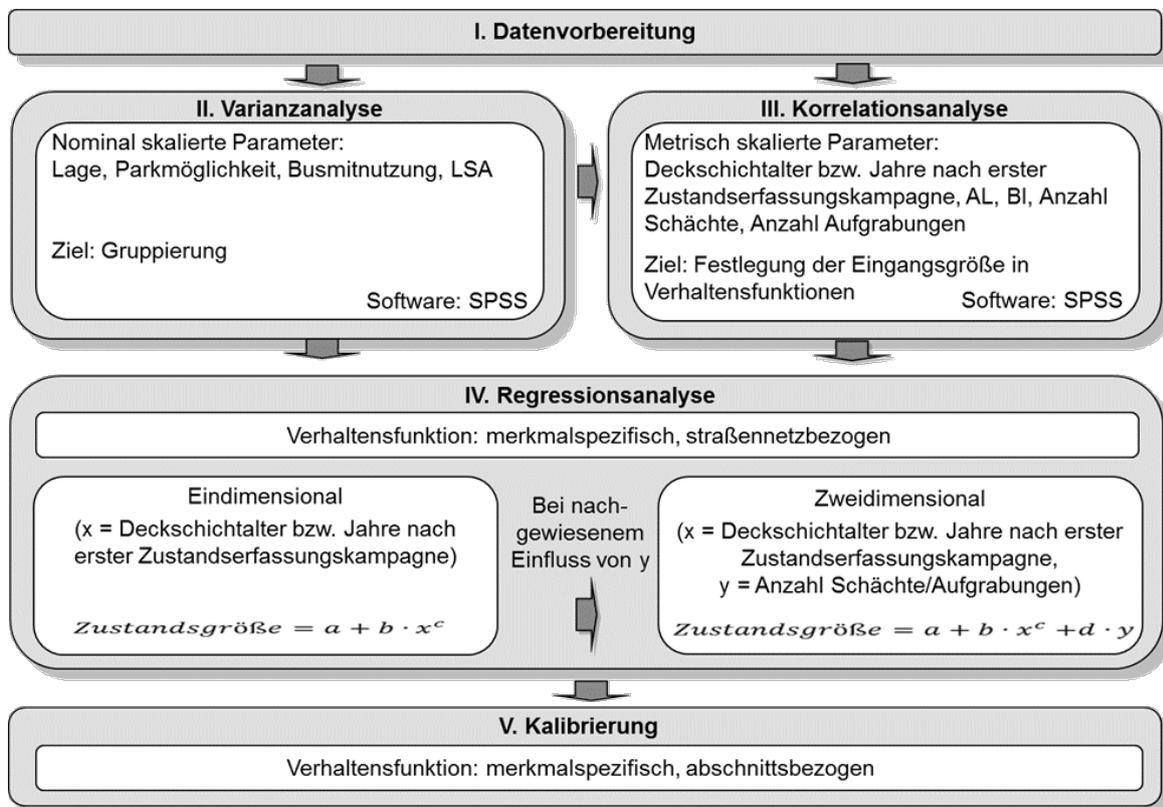


Bild 1: Ablaufdiagramm zum Aufstellen von Prognosefunktionen

### 3 Anforderungen und Aufbereitung der Eingangsdaten

Die Grundlage bildet eine ausgeprägte Datenbasis, welche sich in Aufbau-, Verkehrs-, Bestands- und Zustandsdaten gliedert. Verschiedene Städte und Kommunen wurden hierfür angefragt, wobei eine regelmäßig wiederholte, messtechnische Zustandserfassung von Längs- (PGR-M und PGR-A) und Querebeneheit (SPT und SPH), Flickstellen (FLI) und Netzzissen (NRI) vorliegen sollte. Diese musste mindestens zweimal, besser dreimal durchgeführt worden sein, um einen Verlauf einer Verhaltenskurve beschreiben zu können. Durch unvollständig festgehaltene Dokumentationen durchgeführter Bau- und Erhaltungsmaßnahmen resultieren zwei weitere Probleme. Zum einen liegen keine detaillierten Informationen zum Aufbau der Straße vor und zum anderen können zwischen zwei Zustandserfassungen Verbesserungen des Straßenzustands detektiert werden. Dies widerspricht jedoch der Voraussetzung einer stetig voranschreitenden Verschlechterung des Zustands. Weiterhin sind DTV(SV)-Angaben von Straßen gegebenenfalls von zwei oder mehr Fahrstreifen oder dem gesamten Straßenquerschnitt auf den jeweils betrachteten Fahrstreifen umzurechnen. Welcher Fahrstreifen beschrieben wird, richtet sich nach der Erfassung der Zustandsdaten. In der Regel liegen alle Datengruppen in unterschiedlichen Datenbanken vor, was eine arbeitsintensive Verknüpfung zur Folge hat. Als gänzlich fehlend ist eine Kanaldatenbank zu nennen. Hierfür wird die Anzahl von Schächten und auch Aufgrabungen in den einzelnen Abschnitten ermittelt, was die Untergrundsituation widerspiegelt. Eine Zuordnung der einzelnen Abschnitte von unterschiedlichen Messkampagnen ist stets kritisch zu hinterfragen und auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Daher ist an dieser Stelle festzustellen, dass eine bessere Pflege der Daten und des Datenaufbaus bzw. der Datenfortschreibung Voraussetzung ist. Die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Datentypen sowohl innerhalb eines Jahres als auch jahresübergreifend kann somit verbessert werden.

### 4 Untersuchungsergebnisse

#### 4.1 Datenauswertung und Modellierung für die Stadt Hamburg

Auf den zur Verfügung gestellten Daten der Stadt Hamburg wird die oben beschriebene Methodik für ein eindimensionales Modell angewandt. Um zu beurteilen, ob die nominal skalierten Parameter (Lage, Busmitnutzung, Parkmöglichkeit und LSA) einen Einfluss haben und wie groß dieser quantitativ ist, kommt die Varianzanalyse zum Einsatz. Anhand der Ergebnisse der Varianzanalyse der Stadt Hamburg hat sich eine Differenzierung

- nach Parkmöglichkeit für die Zustandsgrößen SPT und SPH,
- nach Busmitnutzung für die Zustandsgrößen PGR-M und PGR-A und
- nach Parkmöglichkeit sowie LSA für die Zustandsgröße FLI

als statistisch signifikant erwiesen. Da die nominal skalierten Einflussgrößen nicht direkt in die Verhaltensfunktion einbezogen werden können, erscheint eine Gruppierung der erfassten Zustandsdaten nach den Parametern für die Entwicklung der Verhaltensfunktion verschiedener Zustandsgrößen zielführend und notwendig. Für jede einzelne Gruppe wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt und anhand dieser Ergebnisse das Deckschichtalter als unabhängige Variable  $x$  (s. Formel 1) für die Regressionsanalyse festgelegt.

Für die Regressionsanalyse wurde nachfolgende Potenzfunktion angenommen:

$$ZG = a + b + x^c$$

Für die sechs Zustandsgrößen wurde die Regressionsberechnung mithilfe der Software Table Curve 2 D für jede Gruppe durchgeführt. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Koeffizienten und Güte der festgelegten Verhaltensfunktionen (auf Basis der Messdaten der Stadt Hamburg)

Zustandsgröße	Einflussparameter		Verhaltensfunktion	Deckschichtalter				
				a	b	c	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (A)
SPT	mit Parkmöglichkeit		Potenzfunktion	0,000	1,473	0,476	0,720	0,927
	ohne Parkmöglichkeit		Potenzfunktion	0,024	2,019	0,500	0,449	0,979
SPH	mit Parkmöglichkeit		Potenzfunktion	-0,049	0,142	0,500	0,134	0,763
	ohne Parkmöglichkeit		Potenzfunktion	-0,090	0,386	0,500	0,054	0,840
PGR-M	mit Busmitnutzung		Potenzfunktion	0,348	3,468	0,500	0,489	0,927
	ohne Busmitnutzung		Potenzfunktion	-1,261	2,357	0,523	0,671	0,942
PGR-A	mit Busmitnutzung		Potenzfunktion	-0,064	1,770	0,120	0,634	0,989
	ohne Busmitnutzung		Potenzfunktion	0,000	0,674	0,463	0,780	0,961
NRI	-		Potenzfunktion	0,000	0,009	2,446	0,113	0,954
FLI	mit Parkmöglichkeit	mit LSA	Potenzfunktion	-0,026	0,000	4,016	0,118	0,999
		ohne LSA	Potenzfunktion	-0,022	0,001	2,944	0,043	0,995
	ohne Parkmöglichkeit	mit LSA	Potenzfunktion	0,000	0,078	0,499	0,012	0,930
		ohne LSA	Potenzfunktion	-0,015	0,091	1,865	0,056	0,922

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bestimmtheitsmaße relativ gering sind, sodass eine abschnittsspezifische Anpassung der Koeffizienten erforderlich ist. Diese Anpassung der Verhaltensfunktionen erfolgt durch eine Änderung des Funktionsverlaufs mithilfe eines Kalibrierfaktors  $KF_{ZG,j}$  (Änderung der Krümmung), wodurch sich höhere Bestimmtheitsmaße ( $R^2(A)$ ) ergaben. Die Anpassungsgüte war mit Ausnahme der Variante "SPH mit Parkmöglichkeit", für die lediglich ein Bestimmtheitsmaß von 0,763 erreicht wurde, sehr gut. Für die restlichen Varianten liegen die Bestimmtheitsmaße über 90 %, für einige Varianten sogar über 95 %.

$$KF_{ZG,j} = \frac{ZG_{t,j}}{ZG_{g,j}(t)}$$

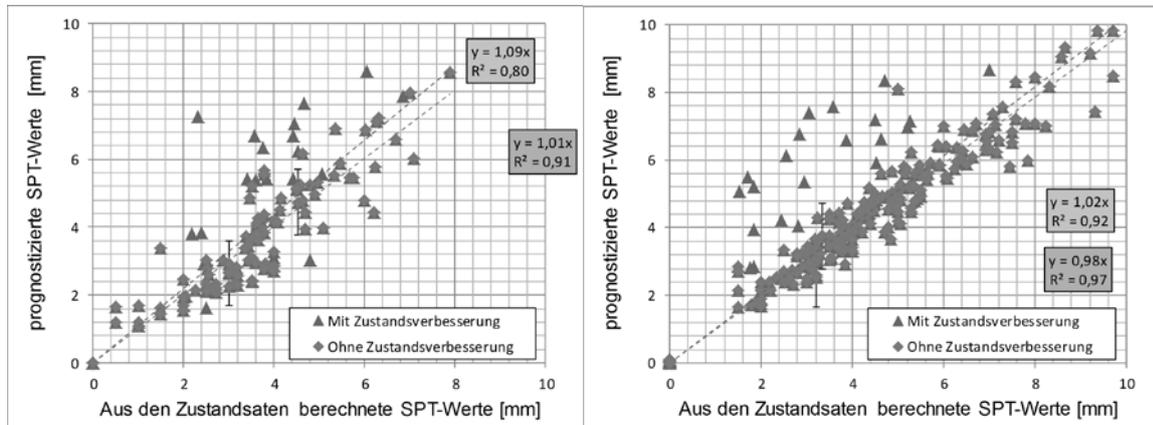
## 4.2 Validierung der Verhaltensfunktion

Die mithilfe der Stadt Hamburg modellierten Verhaltensfunktionen sollen validiert werden. Dies geschieht in zwei Schritten, wobei die jeweilige Datengrundlage zum einen von einer nicht in der Ableitung der Verhaltensfunktionen berücksichtigten Zustandserfassung der Stadt Hamburg selbst und zum anderen von den Zustandserfassung der Städte Wiesbaden und Düsseldorf stammen.

### 4.2.1 Validierung mit den neuesten Zustandsdaten der Stadt Hamburg

Für die Validierung dient in einem ersten Schritt die aktuellste Zustandserfassung der Stadt Hamburg aus dem Jahre 2012,

welche erst seit Mai 2013 zur Verfügung stand und somit bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden konnte. Es werden somit alle aus der Kampagne 2012 berechneten Zustandsgrößen den mittels der aus den Kampagnen 1999, 2003 und 2008 abgeleiteten Verhaltensfunktion prognostizierten Werten gegenübergestellt, was beispielhaft für die Zustandsgröße SPT in Bild 2 dargestellt ist. Es ist ersichtlich, dass sich das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  durch die Eliminierung der "verbesserten" Zustandsdaten infolge nicht dokumentierter Maßnahmen oder systematischer Fehler erhöht und sich somit die Abweichung zwischen gemessenen und prognostizierten Werten verringert. Die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  für die Zustandsgrößen SPT, SPH, PGR-M, PGR-A und FLI liegen bei mindestens 85 %, wodurch ein guter Zusammenhang zwischen den gemessenen und prognostizierten Werten ausgedrückt wird. Aus der Validierung mit der aktuellsten Zustandserfassung der Stadt Hamburg lässt sich schlussfolgern, dass die Vorgehensweise zur Modellierung der Verhaltensfunktionen grundsätzlich bestätigt werden kann. Die damit prognostizierten Werte können für die meisten Zustandsgrößen mit einer hohen Approximationsgenauigkeit zu den gemessenen Werten ermittelt werden. Dies trifft jedoch nur auf die Abschnitte zu, auf denen keine Erhaltungsmaßnahmen zwischen den einzelnen Zustandserfassungen stattgefunden haben. Solche Maßnahmen haben eine Zustandsverbesserung zur Folge, welche die Aussagekraft und Plausibilität der Verhaltensfunktion beeinträchtigt und die Prognosemodelle daher nur beschränkt anwendbar machen.



**Bild 2:** Aus den erfassten Daten berechnete und mittels der Verhaltensfunktion prognostizierte SPT-Werte. links: mit Parkmöglichkeit, rechts: ohne Parkmöglichkeit (Stadt Hamburg)

### 4.2.2 Validierung mit den Zustandsdaten der Städte Wiesbaden und Düsseldorf

Eine weitere Validierung findet mit den Zustandsdaten der vier Zustandserfassungen der Stadt Wiesbaden aus den Jahren 1999, 2003, 2007 und 2011 sowie der drei Zustandserfassungen der Stadt Düsseldorf aus den Jahren 1998, 2003 und 2008

statt. Die Vorgehensweise der Ermittlung der Verhaltensfunktionen für die beiden Städte ist identisch wie für die Stadt Hamburg. Nach der abschnittsspezifischen Kalibrierung stellt sich eine hohe Genauigkeit der Prognosefunktion gegenüber den aus den erfassten Zustandsdaten berechneten Zustandsgrößen ein (s. Tabelle 2 und Tabelle 3).

Tabelle 2: Koeffizienten und Güte der festgelegten eindimensionalen Verhaltensfunktion (auf Basis der Messdaten der Stadt Wiesbaden)

Zustandsgröße	Einflussparameter		a	b	c	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (A)
SPT	mit Busmitnutzung	mit LSA	6,679	0,030	1,804	0,087	0,969
		ohne LSA	8,440	0,014	2,500	0,171	0,819
	ohne Busmitnutzung	ohne LSA	4,330	0,726	0,983	0,244	0,721
SPH	-		0,280	0,008	2,042	0,207	0,943
PGR-M	-		11,964	0,146	1,500	0,047	0,966
PGR-A	mit Busmitnutzung		1,983	0,042	1,500	0,132	0,926
	ohne Busmitnutzung		2,676	0,035	1,500	0,113	0,955
NRI	mit Parkmöglichkeit	mit Busmitnutzung	1,008	0,129	2,087	0,695	0,958
		ohne Busmitnutzung	0,010	0,121	2,627	0,984	0,993
	ohne Parkmöglichkeit	mit Busmitnutzung	0,820	8,432	0,800	0,481	0,934
		ohne Busmitnutzung	1,493	1,091	1,402	0,372	0,934
FLI	mit Busmitnutzung		3,899	0,700	1,500	0,237	0,828
	ohne Busmitnutzung		10,326	2,253	0,987	0,170	0,923

Tabelle 3: Koeffizienten und Güte der festgelegten eindimensionalen Verhaltensfunktionen (auf Basis der Messdaten der Stadt Düsseldorf)

Zustandsgröße	Einflussparameter		Deckschichtalter				
			a	b	c	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (A)
SPT	mit Parkmöglichkeit		4,475	1,426	0,722	0,383	0,942
	ohne Parkmöglichkeit		3,235	0,292	1,146	0,258	0,827
SPH	bebaut	mit Parkmöglichkeit	0,720	0,743	0,712	0,193	0,998
		mit Parkmöglichkeit	5,253	2,791	0,757	0,284	0,944
	unbebaut	ohne Parkmöglichkeit	0,287	0,002	3,000	0,035	0,999
PGR-M	-		3,765	0,613	1,278	0,330	0,826
PGR-A	-		0,820	0,250	0,929	0,411	0,803
NRI	-		0,415	0,055	2,000	0,121	0,834
FLI	bebaut		0,000	0,110	1,636	0,070	0,994
	unbebaut		1,123	0,072	2,000	0,135	0,798

Anhand der Ergebnisse der Korrelationsanalyse der Stadt Wiesbaden sind die Zustandsgrößen ebenfalls durch Schächte und Aufgrabungen beeinflusst. Beispielweise beeinträchtigen die Aufgrabungen die Längs- sowie Querebenheit und können noch unmittelbar zu mehr Flickstellen führen. Diese Tatsache hat sich jedoch erst bei der Validierung durch die Stadt Wiesbaden und Stadt Düsseldorf ergeben. Daher wird an dieser Stelle versucht, neben Zeit nach der ersten Zustandserfassung als Laufvariable x eine weitere Variable y in die Verhaltensfunktion aufzunehmen, welche die Anzahl an Schächten oder Aufgrabungen beschreibt. Somit wird das Modell zweidimensional mit multipler Regressionsanalyse aufgebaut, wofür die Software TableCurve 3D angewandt wurde. Hieraus ergab sich folgende Funktionsbeschreibung der Zustandsgrößen:

$$ZG = a + b \times x^c + d \times y$$

Mit der Variable y, welche die Anzahl an Schächten oder Aufgrabungen beschreibt, kann der unterirdische Einfluss durch das Kanalnetz auf eine mögliche Prognosefunktion des Straßenzustands berücksichtigt werden. Das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> hat sich bei den meisten Zustandsgrößen dadurch deutlich verbessert.

## 5 Folgerungen für die Praxis

Das Ziel dieses Forschungsprojekts war die Entwicklung von Prognosefunktionen für innerörtliche Straßenzustände. Prognosefunktionen für den Straßenzustand kommunaler Straßen lassen sich aufstellen, wenn eine regelmäßige Datenerfassung stattfindet und diese Datenerfassung strukturiert durchgeführt wird. Die erfassten Daten werden in einer strukturierten Datenbank festgehalten und diese Datenbank wird fortschreibend gepflegt. Neben gemessenen Daten muss auch eine detaillierte Dokumentation über Erhaltungs- und Instandsetzungs- sowie sonstiger Maßnahmen am Straßenkörper in der Datenbank festgehalten werden. Ergänzend wird eine Verknüpfung mit einer georeferenzierten Kanal- bzw. Leitungsdatenbank empfohlen.

Mit den ermittelten Bestimmtheitsmaßen R<sup>2</sup> ≥ 0,8 für nahezu alle Zustandsgrößen bei drei untersuchten Städten (Hamburg, Wiesbaden und Düsseldorf) lässt sich feststellen, dass das Ziel dieses Forschungsprojekts somit grundsätzlich erreicht werden konnte. Eine Übertragbarkeit der aufgestellten Modelle auf andere Straßen ist mit den vorhandenen Daten jedoch nicht möglich, da hier kein ausgeprägtes Datengerüst zur Verfügung stand, welches ein allgemein gültiges Modell zuließ. Für jede weitere Stadt und ihr Straßennetz muss die dargestellte Vorge-

hensweise in Bild 1 mit zukünftig ermittelten Daten wiederholt angewandt werden, sodass spezifische Zustandsprognosefunktionen entwickelt werden können. Eine deterministische Auswertung mit einer zu großen Menge von Daten, die eine Zustandsverbesserung zwischen zwei Messkampagnen erkennen lassen, ist problematisch, da sie das verwertbare Datenkollektiv verkleinern. Eine Möglichkeit auch diese Daten nutzen zu können ist die stochastische Zustandsprognose. Mithilfe einer Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix können auch Zustandsverbesserungen mit gewissen Wahrscheinlichkeiten abgebildet werden. Hierin ist daher auch die Begründung zu sehen, in weiteren Forschungsvorhaben dieses Ziel der stochastischen Zustandsprognose weiter zu verfolgen.