Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/ Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

http://www.ub.tuwien.ac.at

TU UB

TU UB WIEN Universitätst

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology. http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

Erhaltungsmanagement Straßenoberbau – Zustandsbewertung und Zustandsprognose

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab und Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Hoffmann Institut für Verkehrswissenschaften Forschungsbereich Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen

> von Valentin Donev Matr. Nr.: 1129517 7200 Razgrad, Bulgarien Knyaz Boris Straße Nr.63

> Wien, Stand 15.09.2014

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Rahmen des Gemeinsamen Studienprogramms zwischen der Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie Sofia (UABG) und der Technischen Universität Wien (TU Wien) angefertigt. Die Wahl des Themenfeldes wurde durch die Komplexität und der interdisziplinären Natur der Fragestellungen im Erhaltungsmanagement, die allgemeine Gültigkeit der Prinzipien, die vielfältigen Möglichkeiten zur Anwendung in der Praxis und durch die zunehmende Bedeutung der Erhaltung motiviert. An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die meine persönliche und fachliche Entwicklung während des Diplomsemesters und des ganzen Studiums besonders beeinflusst haben.

Ich möchte mich zuerst bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald BLAB für die Möglichkeit bedanken, diese Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen durchführen zu können. Durch seinen Vorlesungsblock in Sofia hat er mein Interesse für das Straßenwesen geweckt.

Die vorliegende Arbeit ist als Ergebnis von einer intensiven Zusammenarbeit und spannenden Diskussionen mit Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus HOFFMANN zustande gekommen. Er hat dieses interessante Thema bereitgestellt und mir große Freiheit bei der Abgrenzung der Inhalte gewährt. Ich möchte ihm auch für die Inspiration, das außergewöhnliche Engagement, die andauernde vorbehaltlose Unterstützung, sowie für das Interesse an meiner Entwicklung nach der Diplomarbeit danken. Seine Korrekturen haben wesentlich zur Erhöhung der Qualität dieser Arbeit beigetragen.

Weiterhin möchte ich meinen herzlichen Dank Herrn Emer.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.h.c. Georg STEFANOFF dafür aussprechen, dass er durch stundenlange Gespräche, Beratung und Mentoring mein Wachstum in vielen Aspekten des privaten, beruflichen, gesellschaftlichen und kulturellen Lebens unterstützt hat. Mein Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Ing. Marin DONCHEV, der mich bei einer zusätzlichen Vertiefung der Lerninhalte immer unterstützt hat und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ich danke meinen Studienkollegen und Freunden für die schöne gemeinsame Zeit und für die Begleitung während der Studienzeit. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für ihr Verständnis, ihren Beistand und für die Schaffung von allen Voraussetzungen dafür, dass ich meine volle Aufmerksamkeit dem Studium widmen konnte.

Sofia, September 2014 Valentin Donev

Zusammenfassung

Die Erfassung des Straßenzustandes schafft eine objektive Ausgangsbasis, um Entscheidungen im Rahmen der Maßnahmenplanung zu begründen. Die Erfassungsverfahren aus Österreich, Deutschland und der Schweiz unterscheiden sich u.a. in der Art und Anzahl der erfassten Schäden und in der Länge der Erfassungsabschnitte. Eine direkte Vergleichbarkeit der ermittelten Zustandsgrößen ist nur in Bezug auf die Spurrinnentiefe gegeben. Die Bewertung der Schäden erfolgt nach demselben Schema, aber mit unterschiedlicher Bewertung. Die erfassten Schäden werden zuerst über einen Bewertungshintergrund in Noten umgewandelt und dann zu Teilwerten und einem Gesamtwert als Basis der Maßnahmenoptimierung verknüpft. In der Schweiz werden die Maßnahmen direkt manuell den Schäden ohne einen Optimierungsalgorithmus zugeordnet. Die weit verbreitete Zusammenfassung von unterschiedlichen Schäden mit unterschiedlichen Ursachen zu einem Zustandsmerkmal, sowie von verschiedenen Zustandsmerkmalen zu einem Gesamtwert verwischt die Ursachen und erschwert erheblich die Maßnahmenwahl. Die übliche Festlegung von Ausfallsgrenzen auf Basis von Expertenbefragungen oder Häufigkeitsverteilungen ist wissenschaftlich nicht begründbar und führt bei nicht unmittelbar sicherheitsrelevanten Merkmalen zu einem unnötigen Verlust an Lebensdauer. Es wird daher empfohlen, Zustandsbewertungen im Wesentlichen nur für die Visualisierung des Zustandes und Identifikation von Problemstellen zu beschränken.

Für die Zustandsprognosen werden im deutschsprachigen Raum praktisch ausschließlich deterministische Modelle auf empirischer Basis verwendet, wobei die jeweilige Zustandsfunktion abschnittsweise angepasst wird. Die verwendeten Modelle basieren jedoch weitgehend auf alten Daten, bilden Einflussfaktoren wie Dimensionierung, Verkehrsbelastung und Klima mathematisch unvollständig bis unrichtig ab und vernachlässigen durchgehend die Zensur der erfassten Daten. Die üblichen Methoden zur Anpassung auf Abschnittsebene sind horizontale und vertikale Verschiebung, Skalierung und Regression. Die Prognosen durch horizontale oder vertikale Verschiebung der Masterfunktion in den letzten erfassten Zustand führen jedoch zu einer Verzerrung des Ausgangszustandes und der Altersverteilung. Die Prognose auf Basis einer Skalierung erlaubt zumindest theoretisch die Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsgeschichte. Mehrmalige Erfassungen führen bei diesen häufig verwendeten Methoden zu keiner Erhöhung der Prognosegenauigkeit, da Verschiebung bzw. Skalierung immer durch den letzten Messwert erfolgen.

Liegt eine Reihe von Messwerten vor, kann die Masterfunktion mittels Regression angepasst werden. Mit der Ableitung von Konfidenz- und Prognoseintervallen werden die Grundlagen für den Übergang von einer deterministischen zu einer stochastischen Prognose am Einzelabschnitt geschaffen. Ex ante Prognoseintervalle ziehen die Unsicherheit bei Erfassung und Prognose der erklärenden Variablen (z.B. Verkehr) in Betracht und werden in der Arbeit mittels Bootstrapping und Monte Carlo Simulation beispielhaft ermittelt. Die Zuverlässigkeit der Prognose steigt mit der Anzahl der berücksichtigten Erfassungen und mit der Abnahme der frei wählbaren Parameter der Funktion. Die Erweiterung des einfachen Regressionsmodells zu einem multiplen durch Einbeziehung von mehreren Einflussgrößen hat das Ziel, die Prognosekraft des Modells zu erhöhen. Nachdem es aber nicht möglich ist, alle relevanten Einflussfaktoren zu berücksichtigen, ist immer mit einem Spezifikationsbias zu rechnen. Weiters besteht am Einzelabschnitt zwischen kumulierter Verkehrsbelastung und Deckschichtsalter ein starker korrelativer Zusammenhang (Multikollinearität). Das Vorhandensein von hoher Multikollinearität beeinträchtigt zwar nicht die Prognose, wohl aber die Trennung des Einflusses der Variablen auf das Ergebnis.

Homogene Markov-Ketten sind in der Literatur häufig verwendete diskrete stochastische Zustandsprognosemodelle, die keine Kenntnis über den bisherigen Zustandsverlauf erfordern. Die aus dem Modell resultierenden Zustandsfunktionen weisen unabhängig vom jeweiligen Schadenstyp einen linearen Verlauf auf. Die Anwendung auf realen Daten zeigt jedoch eine erhebliche Überschätzung der Lebensdauer bzw. Unterschätzung des Investitionsbedarfs. Aufgrund konstanter Übergangswahrscheinlichkeiten ist dieser Ansatz daher für Anlagen mit einem kontinuierlichen Schädigungsprozess kaum geeignet. Aus der abschließenden Gegenüberstellung der betrachteten Prognosemodelle mit einer neuen Methodik nach HOFFMANN auf Basis von LTPP-Daten für das Merkmal Querrisse konnten die Unterschiede in der Prognosequalität klar herausgearbeitet werden. Die Methodik nach HOFFMANN ermöglichte nicht nur die empirische Ableitung von Zustandsfunktion und Ausfallsverteilung, sondern ist auch in der Lage Datenzensur zu berücksichtigen und erlaubt zudem zutreffendere Prognosen im Vergleich.

Summary

The surveying and evaluation of the pavement condition provides an objective starting basis to justify decisions in the context of planning maintenance and rehabilitation activities. The survey approaches in Austria, Germany and Switzerland differ i.a. in the type and number of the evaluated distresses and in the length of the measurement sections. A direct comparison between the calculated condition values is feasible only in terms of the rut depth. The evaluation of the distresses follows the same scheme but with different assessments. At first, the evaluated pavement distresses are converted into grades using rating backgrounds and are then combined to sub-indices and to one total condition index providing the basis for the optimization of maintenance treatments. In Switzerland maintenance treatments are assigned manually, directly to the distress types, without the use of an optimization algorithm. The widespread aggregation of different distress types with different causes to one condition value, as well as the combination of different condition values to one total condition erases the underlying failure causes and makes the selection of maintenance treatments considerably more difficult. The common definition of failure criteria (condition thresholds), based on expert opinions or frequency distributions, is not scientifically justified and leads in the case of distress types with no direct relation to road safety to unnecessary loss of service life. It is therefore recommended to limit the use of condition assessments only to visualization of the condition and identification of problem sections.

Pavement condition predictions in German speaking countries are almost solely based on empirically derived, deterministic models, whereat the respective performance function (master) is adapted (calibrated) to each road section. The commonly used models however are based on old data, fail to reproduce influencing factors like design parameters, traffic loads and climate conditions in a mathematically complete and correct manner and disregard the presence of censored data. The traditional methods for single-section model calibration are horizontal and vertical shifting, scaling and regression. Predictions with horizontal or vertical shifting of the master performance function through the last measured condition lead however to bias in the initial condition and age distribution. The prediction based on scaling allows, at least theoretically, the reproduction of the performance history. Multiple measurements will not contribute to increasing prediction accuracy, because the shifting resp. scaling of the function is always conducted through the last existing measurement value.

If a series of measurements is present, the master function can also be adapted using regression analysis. The derivation of confidence and prediction intervals provides a basis for the transition from deterministic to stochastic prediction at project-level. Ex ante prediction intervals take in consideration the uncertainty in the measurement and prediction of the explanatory variables (e.g. traffic loads). This thesis provides an exemplary calculation of ex ante prediction intervals using bootstrapping und Monte Carlo simulation. The reliability of the prediction increases with the number of the considered measurements and with a decreasing number of free model parameters. The extension of the simple regression model to a multiple regression model through the inclusion of more influencing variables aims to increase the prediction power of the model. Since it is not possible to consider all influencing factors, specification bias is always expected. Furthermore there is a strong correlational relationship (multicollinearity) between cumulative traffic loading und age of the surface layer at project-level. In fact, the existence of multicollinearity does not affect the prediction ability of the model, but it affects the assessment of the contributions of the individual predictors.

Homogeneous Markov Chains are a commonly used in engineering literature discrete stochastic prediction model, which requires no knowledge of previous condition development. The performance functions, resulting from the model, exhibit a linear development, irrespective of the particular distress type. The application to real data shows a substantial overestimation of the predicted service life resp. underestimation of the investment needs. Due to the constant transition probabilities, this approach is not applicable to elements with continuous deterioration process. The final comparison of the considered prediction models with a new methodology acc. to HOFFMANN is based on LTPP-data for the distress type transverse cracking and shows a clear picture of the differences in the prediction quality. The methodology acc. to HOFFMANN allows not only the empirical derivation of performance functions and failure distribution, but also accounts for data censoring and provides accurate predictions in comparison.

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	leitung		7				
	1.1	Ausgangslage und Problemstellung						
	1.2	Zielsetzung, Inhalte und Abgrenzung der Arbeit						
	1.3	.3 Vorgehen und Methodik						
2	Zus	tandserfa	assung und Zustandsbewertungsansätze	10				
	2.1	Bausteine eines systematischen Erhaltungsmanagementsystems (EMS)						
	2.2	Zustandsmerkmale						
	2.3	Zustandserfassung und Zustandsgrößenermittlung						
		2.3.1	Zustandserfassung in Österreich	15				
		2.3.2	Zustandserfassung in Deutschland					
		2.3.3	Zustandserfassung in der Schweiz	21				
		2.3.4	Vergleich und zusammenfassende Beurteilung	25				
	2.4	Zustand	lsbewertungsansätze					
		2.4.1	Zustandsbewertung in Österreich	29				
		2.4.2	Zustandsbewertung in Deutschland					
		2.4.3	Zustandsbewertung in der Schweiz					
		2.4.4	Vergleich und zusammenfassende Beurteilung					
		2.4.5	Ausfallskriterien und Lebensdauer					
3	Zus	tandspro	gnosemodelle	45				
	3.1	45						
		3.1.1	Empirische vs. mechanistische Zustandsprognosemodelle	47				
		3.1.2	Deterministische vs. stochastische Zustandsprognosemodelle					
		3.1.3	Zustandsfunktionen	51				
	3.2	sch-deterministische Zustandsfunktionen (AT, DE, CH)						
		3.2.1	Zustandsprognosemodell in Österreich					
		3.2.2	Zustandsprognosemodell in Deutschland	55				
		3.2.3	Zustandsprognosemodell in der Schweiz					
		3.2.4	Zustandsfunktionen im Vergleich (AT, DE, CH)	60				
	3.3	Anpassi	ung von stetigen Zustandsprognosemodellen	61				
		3.3.1	Anpassung durch Verschiebung und Skalierung	63				
		3.3.2	Prognose mittels bivariater Regression	67				
		3.3.3	Prognose mittels multipler Regression					
	3.4	Anpassi	ung von diskreten Zustandsprognosemodellen	96				
		3.4.1	Struktur des Datenmaterials und Datenzensur	96				
		3.4.2	Homogene Markov-Ketten					

	3.5	Vergleich von Zustandsprognosemodellen				
		3.5.1 Vergleich auf Basis von LTPP-Daten (USA)	104			
		3.5.2 Vergleich auf Basis einer Monte Carlo Simulation (MCS)	108			
4	Zus	ammenfassung und Ausblick				
5	Anhang					
	5.1	Abbildungsverzeichnis	116			
	5.2	2 Tabellenverzeichnis				
	5.3	Literaturverzeichnis	119			
		5.3.1 Fachbücher, Artikel, wissenschaftliche Berichte und Dissertationen	119			
		5.3.2 Technische Regelwerke und Normen	123			

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Mit dem Wirtschaftsboom nach dem Zweiten Weltkrieg und der Vergrößerung des Kraftfahrzeug-Bestandes ging auch eine rasante Entwicklung der hochrangigen Straßeninfrastruktur einher. In den Jahren 1965 bis 1985 wurde ein Großteil der Bundesautobahnen in Deutschland und der Nationalstraßen in der Schweiz erbaut, während die Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich ein um 5-10 Jahre niedrigeres Durchschnittsalter aufweisen. Mit der zunehmenden Alterung erhöht sich auch der erforderliche Finanzbedarf für die Erhaltung. Zugleich sind die bestehenden Netze größtenteils ausgebaut, sodass sich der Neubau hauptsächlich auf Lückenstellen und Umfahrungen konzentriert. Das Netz der Nationalstraßen zum Beispiel entspricht derzeit (Stand 2013) 96% der geplanten Länge und wird voraussichtlich in den nächsten 15-20 Jahren vollendet¹. Daher hat sich der Anteil der Erhaltungsausgaben im Vergleich zum Neubau wesentlich erhöht und wird in Zukunft noch weiter steigen.

Im jährlichen Schnitt der Jahre 2006 bis 2011 beliefen sich die Investitionen für die bauliche Straßenerhaltung (ohne Ausbau und Erweiterung) auf rund 325 Millionen Euro pro Jahr für Autobahnen und Schnellstraßen (AT), auf etwa 1.070 Millionen Euro pro Jahr für Bundesautobahnen (DE) und auf rund 470 Millionen Euro pro Jahr für Nationalstraßen (CH)². Umgelegt auf das Netz der Autobahnen und Schnellstraßen (Ø 2.100 km für denselben Zeitraum), entspricht das jährlich etwa 155.000 Euro/km Fahrbahn (Vollquerschnitt). Ähnlich ergibt sich für das Netz der Bundesautobahnen (Ø 12.650 km) ein jährlicher durchschnittlicher Mitteleinsatz von 85.000 Euro/km Fahrbahn, bzw. für das Netz der Nationalstraßen (Ø 1.780 km, davon ca. 80% Autobahnen) 264.000 Euro/km Fahrbahn. In den aktuellen Erhaltungsprogrammen der Straßenbetreiber ist schon eine Erhöhung dieser Investitionen zugrunde gelegt. In Österreich zum Beispiel werden die Ausgaben zur Erhaltung der Autobahnen und Schnellstraßen ab dem Jahr 2014 auf 460 Millionen Euro pro Jahr angehoben.

Neben der ungünstigen Altersverteilung und den Finanzierungsengpässen ist auch mit einer verstärkten Beanspruchung der Straßeninfrastruktur zu rechnen. Der Güterverkehr wird in Zukunft durch den ausgeweiteten europäischen Binnenmarkt noch weiter stark zunehmen. Ein Großteil dieser Verkehrsleistung wird auf den Autobahnen abgewickelt, obwohl sie nur einen geringen Anteil (2-2,5%) am Gesamtnetz aufweisen. Die o. g. Herausforderungen sind kaum ohne eine periodische Erfassung, Bewertung und Prognose des Straßenzustandes im Zuge eines systematischen Erhaltungsmanagements beherrschbar.

Die Grundsätze der systematischen Erfassung und Bewertung wurden Anfang der neunziger Jahre im deutschsprachigen Raum entwickelt und teilweise normativ geregelt. Allein die Auswertung des Ist-Zustandes aber greift bei der Maßnahmenplanung zu kurz, da nicht alle geschädigten Abschnitte gleich repariert werden können. Während viele Systeme noch bei der Analyse des Straßenzustandes geblieben sind, wurden auch Prognosemodelle abgeleitet, die in erster Linie auf einem deterministischen Zustandsverlauf basieren. Die verwendeten Modelle können die lokalen Einflüsse und damit verbundene unterschiedliche Schädigungsraten auf den einzelnen Abschnitten mathematisch nicht richtig abbilden. Aufgrund der stochastischen Natur der Zustandsentwicklung geht die Wahrscheinlichkeit eines exakten Eintritts einer deterministischen Prognose im Einzelfall immer gegen Null. Weiters sind für die Schätzung des Investitionsbedarfs die systematischen Fehler in den Prognoseansätzen zu vermeiden. Daher sollen Prognosemodelle vorgeschlagen bzw. weiterentwickelt werden, die die stochastische Natur des Schädigungsprozesses, die Struktur und die Zensur der vorhandenen Daten ausreichend berücksichtigen.

¹ vgl. ASTRA (2013)

² vgl. BMVBS (2007-2013); ASFINAG (2010;2012); BFS (2013) S14

1.2 Zielsetzung, Inhalte und Abgrenzung der Arbeit

Eine wesentliche Grundlage jedes Erhaltungsmanagementsystems für den Straßenoberbau bilden Zustandsdaten, die derzeit je nach Land auf unterschiedliche Art und Weise erfasst und bewertet werden. Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit sollen die verwendeten Verfahren zur Zustandserfassung und –bewertung des Straßenoberbaus in Österreich, Deutschland und der Schweiz gemäß der Literatur systematisch zusammengefasst, analysiert und soweit möglich auf Basis einer Anwendung auf erfasste Zustandsdaten verglichen werden. Weiters soll festgestellt werden, inwieweit die erfassten Zustandsmerkmale miteinander vergleichbar sind. Für die Analyse geht es vor allem darum, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Verfahren der Länder aufzuzeigen und ihre Zweckmäßigkeit im Hinblick auf die nachfolgendende Nutzung für die Erstellung von Zustandsprognosen und Maßnahmenoptimierung zu überprüfen. Eine systematische Darstellung möglicher methodischer Grenzen und Probleme bestehender Ansätze sowie Ausarbeitung von Verbesserungsvorschlägen sind nicht Gegenstand der Arbeit.

Der Schwerpunkt der Diplomarbeit liegt vielmehr auf einer Anwendung und Analyse der Prognoseverfahren in Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Straßenzustandes. Alle Beschreibungen und Berechnungen beschränken sich dabei auf die Zustandsprognose ohne Maßnahmen bzw. das Szenario "nichts tun", wobei die gewonnenen Erkenntnisse grundsätzlich auch für die Prognose mit Maßnahmen gültig sind. Ausgehend von einem generellen Überblick über Prognosemodelle werden Anforderungen an diese in Bezug auf das Erhaltungsmanagement formuliert, die als Basiskriterien für den späteren Vergleich der Modelle und ihrer Ergebnisse verwendet werden. Konkret werden dazu die Prognoseverfahren und Zustandsfunktionen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz systematisch dargestellt und hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit dem aktuellen Stand der Wissenschaft bewertet.

Generell erfolgt die Prognose über angepasste Zustandsfunktionen, welche die mittlere zeitliche Entwicklung der Schäden am Netz beschreiben. Die Anpassung der Zustandsfunktion auf Abschnittsebene trägt dabei örtlichen Gegebenheiten und Belastungen Rechnung. Dazu werden üblicherweise verschiedene Verfahren (Verschiebung, Skalierung, etc.) eingesetzt, die den Verlauf der Zustandsfunktion durch den zuletzt erfassten Zustand erzwingen. Im Rahmen der Arbeit sollen daher die Auswirkungen dieser Verfahren auf Lebensdauer, Alter und Zustand im Einzelfall und am Netz untersucht werden.

Für die Frage nach geeigneten Zustandsfunktionen und deren Anpassung sollen weiters Verfahren der Regressionsrechnung und deren Anwendung näher betrachtet und mit herkömmlichen Verfahren verglichen werden. Für den Übergang von einer deterministischen zu einer stochastischen Betrachtungsweise wird ein Schwerpunkt auf die Zuverlässigkeit der Prognose bzw. auf die Berechnung von Konfidenzintervallen für Prognosen gelegt. Dazu erfolgt eine eingehende Beschäftigung mit den Annahmen der Regression sowie mit den sich bei Abhängigkeit der Prädiktoren ergebenden Verzerrungen der Parameter. Weiters sollen statistische Lösungsansätze und deren Anwendung gezeigt werden, um diese selten beachteten Verzerrungen zu minimieren. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, wird nur auf die wichtigsten Aspekte der Regressionsrechnung eingegangen und diese beispielhaft auf Zustandsdaten angewendet.

In der Literatur werden homogene Markov-Ketten als die einfachste Form von Markov-Prozessen ebenfalls häufig in der Zustandsprognose eingesetzt. Auf Basis eines Vergleiches der theoretischen Modellannahmen und der praktischen Anwendung auf erhobene Zustandsdaten soll festgestellt werden, welche Methode für die Modellierung der Schädigungsprozesse im Straßenoberbau am besten geeignet ist. Dazu sollen die beschriebenen Zustandsprognosemodelle anhand einer Monte Carlo Simulation, realen Daten aus dem "Long Term Pavement Performance (LTPP)" Programm sowie Daten des Landes Steiermark verglichen werden. Auf Basis der Ergebnisse dieses Vergleiches sind abschließend Empfehlungen für die Anwendung abzuleiten.

1.3 Vorgehen und Methodik

Die Stellung von Zustandsbewertung und Zustandsprognose im Erhaltungsmanagement des Straßenoberbaus ergibt sich aus der Beschreibung der wesentlichen Bausteine des Erhaltungsmanagementsystems (Kapitel 2.1). Davon ausgehend werden die Verfahren zur Zustandserfassung bzw. –bewertung aus Österreich, Deutschland und der Schweiz in Kapitel 2.3 bzw. Kapitel 2.4 vorgestellt. Für die spätere Analyse und den Vergleich der Verfahren sind diese durchgängig auf Basis der technischen Regelwerke und Forschungsberichte der jeweiligen Länder darzustellen. Der erste Teil der Arbeit konzentriert sich dazu in der Analyse vor allem auf die Vergleichbarkeit der erfassten Schadensmerkmale und die Herkunft der Bewertungsansätze für den Straßenzustand.

Aufbauend auf diese Erfassungs- und Bewertungsverfahren soll dann die Prognose des Straßenzustandes näher betrachtet werden. Kapitel 3.1 gibt dazu einen Überblick über die Klassifikation von mathematischen Prognosemodellen im Hinblick auf das Erhaltungsmanagement. Im Fokus des Kapitels 3.2 stehen die bestehenden empirisch-deterministischen Zustandsprognosemodelle im deutschsprachigen Raum. Diese werden anhand von einfachen Beispielen auf Plausibilität kontrolliert und die Ergebnisse werden bewertet. Im Kapitel 3.3 werden weitere Verfahren wie die Regressionsrechnung zur Anpassung von stetigen Prognosemodellen an empirische Daten umfassend beschrieben. Hier werden vor allem die Auswirkungen von verschiedenen Einflussfaktoren auf die Erwartungstreue der Modellparameter und die Zuverlässigkeit der Prognose anhand von empirischen Beispielen untersucht. Im Kapitel 3.4 wird auf die homogene Markov-Ketten als diskretes Prognosemodell eingegangen. Auf Basis von realen Daten werden die Auswirkungen dieser Methode auf Lebensdauer bzw. Investitionsbedarf bewertet. Im Kapitel 3.5 werden die beschriebenen Modelle auf Basis von LTPP-Daten und einer Monte Carlo Simulation gegenübergestellt und die resultierenden stochastischen Zustands- und Ausfallsverteilungen diskutiert.

Die erstellten Tabellen, Methoden und Beispiele orientieren sich an den von HOFFMANN³ entwickelten Methoden und Systematik. Die erforderlichen mathematischen Grundlagen für Berechnungen in der Diplomarbeit zusammen mit einer kurzen Beschreibung des jeweiligen Verfahrens werden in Tabellen synthetisiert um einen ununterbrochenen Lesefluss des Haupttextes zu ermöglichen und dennoch eine hohe Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Die Umsetzung der im Kapitel 1.2 beschriebenen Inhalte wird anhand von zahlreichen Beispielen veranschaulicht, die entsprechend vom Haupttext abgesetzt sind (grauer Hintergrund). Erst die Anwendung auf konkrete Beispiele ermöglicht die notwendige Tiefe, um konkrete Analysen vorzunehmen und zu neuen Schlussfolgerungen zu kommen. Diese theoretisch-empirische Vorgehensweise mit der Aufbereitung des erforderlichen Datenmaterials (z.B. LTPP-Daten zu Querrissen) ist zwar mit einem vergleichsweise hohen Arbeitsaufwand verbunden, ermöglicht aber dafür konkrete belastbare Aussagen zur Eignung der Prognosemodelle.

Die statistischen Auswertungen und die Berechnung der Beispiele erfolgten in erster Linie mittels Microsoft Excel 2010 durch manuelle Eingabe der erforderlichen Formeln. Dieses Softwareprodukt erlaubt eine automatisierte Neuberechnung nach Veränderung der Eingangsparameter und eine flexible Formatierung der graphischen Darstellungen sowie laufende Kontrolle der Berechnungsvorgänge. Da bestimmte Rechenoperationen in Excel nicht möglich sind, wurde zusätzlich auch die spezialisierte Software Matlab R2013b verwendet. Die Ergebnisse statistischer Analysen wurden in vielen Fällen mit IBM SPSS Statistics V22.0 kontrolliert. Für die Erstellung der Abbildungen und Diagramme wurden auch MS PowerPoint 2010 und SigmaPlot V12.3 verwendet.

³ vgl. HOFFMANN, M. (2014)

2 Zustandserfassung und Zustandsbewertungsansätze

2.1 Bausteine eines systematischen Erhaltungsmanagementsystems (EMS)

Ein Erhaltungsmanagementsystem (EMS) liefert objektive Grundlagen zu einer planmäßigen Erhaltung von Straßennetzen unter wirtschaftlichem Mitteleinsatz mit dem Ziel einer nachhaltigen, bestmöglichen, gefahrlosen Nutzung. Die Bausteine eines Erhaltungsmanagementsystems sind in Abbildung 1 gegeben⁴. In der vorliegenden Diplomarbeit werden nur die hellgrau markierten Teilschritte behandelt.

Auf Basis der in der Erhaltung festgelegten Ziele sind zunächst Zustandsmerkmale zu definieren und diese systematisch in einem Schadenskatalog zusammenzustellen. Es sind nur solche Schäden zu erfassen, die voneinander zuverlässig unterscheidbar sind und direkt zu Maßnahmen führen. Schäden, die verschiedene Ursachen, Fortschritt und anwendbare Maßnahmen aufweisen, sollen nicht zu aggregierten Merkmalen zusammengefasst werden. Weiters wird auch Kenntnis über die zeitliche Entwicklung der Zustandsmerkmale in Form von Zustandsfunktionen vorausgesetzt. Erst auf dieser Basis sind eine periodische Zustandserfassung, -bewertung und -prognose sinnvoll. Die Bewertung des Zustandes ermöglicht die Bereitstellung von Informationen für die Entscheidungsträger in einer vereinfachten Form, sowie die Identifikation von Problemstellen. Mit den cha-



Abbildung 1: Gesamtüberblick der Bausteine und Abläufe eines selbstlernenden systematischen Erhaltungsmanagementsystems nach HOFFMANN

rakteristischen Zustandsfunktionen und den vorhandenen Erfassungsdaten erfolgt weiter die Zustandsprognose auf Netz- und Abschnittsebene, die mit der Anzahl an Erfassungen immer genauer wird.

Für die auf die Prognose stützende Maßnahmenplanung und -optimierung ist eine Standardisierung der nach Schadenstyp anwendbaren Maßnahmen mit ihren Einheitskosten und ihrer Wirkdauer in einem Maßnahmenkatalog erforderlich. Durch die Festlegung von typischen Arbeitsschritten und Teilleistungen (Positionen) zu den einzelnen Maßnahmen ist die automatisierte Erstellung eines Leistungsverzeichnisses für die Ausschreibung möglich. Bei den herkömmlichen Erhaltungsmanagementsystemen erfolgt die Optimierung anhand eines gewichteten Gesamtzustandes. Die von HOFFMANN vorgeschlagene Methodik basiert hingegen auf die direkte Zuordnung von Maßnahmen zu den Schadenstypen und Ermittlung der Anwendbarkeit in Abhängigkeit von der Schadensschwere. Auf Basis von Kostenfunktionen, die die Wirkdauer und die Einheitskosten nach Ausmaß ("Economy of Scale") der einzelnen Maßnahmen berücksichtigen, werden die Maßnahmenkombinationen mit den geringsten Kosten pro Jahr für den gegeben Abschnitt berechnet. Wird dieser Vorgang zusammen mit den Nachbarabschnitten bzw. mit dem prognostizierten Ausmaß und der prognostizierten Schwere für den Analysezeitraum wiederholt, ist auch eine Ermittlung der optimalen Bauloslänge bzw. des optimalen Eingriffszeitpunktes möglich.

In vielen Fällen kann das aus der Optimierung ermittelte Erhaltungsprogramm wegen budgetärer Restriktionen nicht vollständig umgesetzt werden, sodass eine Festlegung von Prioritäten in Abhängigkeit von Funktionsbedeutung und Verkehrssicherheit erforderlich wird. Ferner ist die Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen für die Kontrolle der Umsetzung, sowie für die laufende Aktualisierung und Verbesserung der Optimierungsgrundlagen (Zustands- und Kostenfunktionen) von großer Bedeutung.

⁴ vgl. HOFFMANN, M. (2014); HOFFMANN, M. (2013a); HOFFMANN, M. (2013c)

2.2 Zustandsmerkmale

Zur objektiven Beschreibung des Straßenzustandes werden Zustandsmerkmale herangezogen, die bestimmte Eigenschaften der Fahrbahn beschreiben. Die Zustandsmerkmale unterscheiden sich nach Bauweise und können grundsätzlich in Rissbildung, Oberflächenschäden, Ebenheitsschäden und Reparaturstellen unterteilt werden. Im Folgenden werden ausgewählte Merkmale definiert und gemäß Literatur⁵ ihre Auswirkungen auf Fahrkomfort, Fahrsicherheit und strukturelle Lebensdauer zusammengefasst. Für Schadensursachen und Einflussfaktoren auf die Entwicklung wird auch auf Kapitel 3.3.3 verwiesen.

- Einzelrisse: Einzelrisse sind feine bis klaffende Brüche, wobei in Abhängigkeit von ihrer Position und Orientierung auf der Fahrbahn Quer-, Längs- und Nahtrisse zu unterscheiden sind. Bei tiefen Temperaturen können durch den verhinderten thermischen Schrumpf induzierte kryogene Zugspannungen nur sehr langsam abgebaut werden und es kommt bei extremen Abkühlraten zu einer Überschreitung der Materialfestigkeit. Das Ergebnis sind Querrisse, die in regelmäßigen Abständen auf der Fahrbahn auftreten. Längsrisse entstehen infolge der Superposition von thermischen und verkehrsbedingten Zugspannungen an der Schichtunterseite in der Fahrspur und/oder an der Schichtoberseite neben der Fahrspur (in Abstand 0,5...0,9 m). Nahtrisse zwischen den Fertigerbahnen sind auf Fehler bei der Bauausführung zurückzuführen. Die Risse ermöglichen das Eindringen von Wasser, welches bei Frost gefriert und zu einer fortschreitenden Schädigung der Substanz von oben nach unten führt. Ab einer gewissen Rissbreite (ca. 2,0 cm) ist auch mit Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit zu rechnen. Daher ist der Eingriffszeitpunkt in der Regel möglichst früh nach dem Schadensbeginn zu wählen, um aufwendige Erhaltungsmaßnahmen zu vermeiden.
- Netzrisse: Netzrisse sind miteinander verbundene Risse, die die Fahrbahn in mosaikförmige Blöcke zerteilen. Die Netzrisse werden in der Regel durch Ermüdungserscheinungen verursacht. Die Baustoffermüdung ist maßgebend für die strukturelle Lebensdauer des Straßenoberbaus und Basis für die Dimensionierung der Schichtdicken. An der Unterseite der Tragschicht entstehen radiale Zugspannungen, die unter wiederholter Verkehrsbeanspruchung zu feinen Rissbildungen und somit allmählich zur Abnahme der Steifigkeit und der Tragfähigkeit führen. Die entstehenden Risse summieren sich und wandern an die Oberfläche, wo sie erst erkennbar werden. Da die Beseitigung von Netzrissen tiefgreifende Erhaltungsmaßnahmen (Erneuerung) erfordert, empfiehlt es sich das Auftreten dieses Schadensmerkmals durch eine stärkere Dimensionierung möglichst lang zeitlich zu verschieben. So sind mit einer höheren Anfangsinvestition durch die Erweiterung des Anwendungsbereichs von den kostengünstigen Deckschichtmaßnamen langfristig Einsparungen zu erzielen. Ist die Lebensdauer in Bezug auf die Netzrisse schon erreicht, dann kann vor allem auf untergeordneten Straßen von Vorteil sein, die Straße weiter zu nutzen und erst bei einer Beeinträchtigung von sicherheitsrelevanten Zustandsmerkmalen zu sanieren.
- Oberflächenschäden: Die Erscheinungsformen des Zustandsmerkmals Oberflächenschäden charakterisieren Substanzverluste von Deck- oder Tragschichten (Ausmagerungen, Ausbrüche, Abplatzungen, etc.) oder Griffigkeitsmangel (Bindemittelaustritt). Ausmagerungen als Herauslösen von Bitumen und Füller sind von Kornausbrüchen als Herauslösen des Gesteins in der Praxis schwierig zu unterscheiden. Die Auswirkungen dieser Schadenstypen beschränken sich auf die substanzielle Schädigung der Deckschicht. Ausbrüche und Schlaglöcher sind unter Verkehr und Witterung lokal herauslösende Teile der Deck- bzw. der Tragschicht. Austritt von Bitumen an der Straßenoberfläche (in den Radspuren) kann unter Verkehr und/oder hohen Temperaturen aufgrund eines zu hohen Bindemittelgehalts und/oder zu geringen Hohlraumgehalts erfolgen. Dabei wird durch eine reduzierte Griffigkeit die Verkehrssicherheit beeinträchtigt. Die Oberflächenschäden können im Vergleich zu anderen Merkmalen relativ früh auftreten, sind aber aufgrund einer degressiven oder linearen Entwicklung selten kritisch für die Lebensdauer des Straßenoberbaus. Darüber hinaus wird ein Teil der Schäden noch im Rahmen der betrieblichen Erhaltung ausgebessert, während die anderen im Rahmen EMS meist mit Deckschichtmaßnahmen behoben werden.

⁵ vgl. BLAB, R. (2001) S17-29; BLAB, R. (2013); HOFFMANN, M. (2013a); MOLZER, C. et al. (2000) S34-69; SCHMUCK, A. (1987) S30-61; BECKEDAHL, H.-J. (2010) S27-45; SOCINA, M. (2007) S33-60; KLUGER-EIGL, W. (2009) S6-27

- Längsebenheit: Das Zustandsmerkmal Längsebenheit dient der Charakterisierung der Unebenheiten in Längsrichtung der Fahrbahn. Die Längsebenheit hat Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und auf den Fahrkomfort, sowie auf die Beanspruchung des Straßenoberbaus. Bei unebener Straßenoberfläche kann es zum Anheben des Rades und somit zur Verlust des Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn kommen, was vor allem bei Kurven die Fahrsicherheit beeinträchtigt. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wird das Fahrzeug zu Schwingungen angeregt, die auf die Fahrzeuginsassen und auf das Ladegut übertragen werden (Fahrkomfort). Weiterhin werden durch die Schwingungen zusätzliche dynamische Lasten erzeugt, die zu einer erhöhten Beschädigung der Fahrbahn führen. Die Entwicklung der Längsebenheit wird durch die Oberbauherstellung (Baustoffe und Bauausführung), durch klimatische Einwirkungen (Hitze, Frost, Wasser) und Verkehr, sowie durch die Gleichmäßigkeit des Untergrundes beeinflusst. Der Längsebenheit wird eine hohe Bedeutung primär für die hochrangigen Straßen beigemessen, wobei die Beeinträchtigung dieses Merkmals allein auf untergeordnete Straßen selten zum Auslösen von Erhaltungsmaßnahmen und eher zu Geschwindigkeitsbegrenzungen führt.
- Querebenheit: Unebenheiten in Querrichtung entstehen meist in Form von Spurrinnen. Die Spurrinnen sind vertikale Abweichungen von dem Soll-Querprofil im Bereich der Radspuren, die einen kontinuierlichen Verlauf in Längsrichtung der Fahrbahn aufweisen. Die Spurrinnenbildung hat Einfluss auf die Fahrsicherheit und liefert Hinweise auf die Verformung des Straßenoberbaus. Bei Regen sammelt sich Wasser in den Spurrinnen an, was bei höheren Geschwindigkeiten die Gefahr von Aquaplaning bzw. Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug erhöht. Steilere Flanken der Spurrinnen erschweren die Lenkvorgänge bei Fahrstreifenwechsel auch bei trockener Fahrbahn und stellen für Motorradfahrer eine potenzielle Gefahr dar. Die Schadensursachen für die Spurrinnenbildung sind Abnutzung infolge mechanischer Beanspruchung, plastische Verformung infolge von Verkehrslasten und hohen Temperaturen und Nachverdichtung nach der Verkehrsfreigabe. Die Spurrinnen können in der Deckschicht, in der Tragschicht oder in den ungebundenen Schichten entstehen. Je breiter die Spurrinne ist, desto tiefer liegt in der Regel das Problem. Die Spurrinnen erreichen gegenüber anderen Zustandsmerkmalen früher den kritischen Wert und sind oft bestimmend für die Lebensdauer des Straßenoberbaus. Die Beseitigung der Unebenheiten in Querrichtung erfordert teure Erhaltungsmaßnahmen (zumindest Deckschichtmaßnahmen).
- Griffigkeit: Das Zustandsmerkmal Griffigkeit beschreibt den Einfluss der Straßenoberfläche (Beschaffenheit der Decke und der Gesteinsoberfläche) auf die Übertragung von Antriebs-, Bremsund Seitenführungskräfte zwischen Reifen und Fahrbahn. Als Kenngröße für die Griffigkeit dient der Reibungsbeiwert µ, der als Verhältnis zwischen der übertragbaren Reibungskraft und der vertikalen Radlast definiert ist. Die übertragbare Reibungskraft ist von zahlreichen Einflussfaktoren (Fahrbahntextur, Fahrgeschwindigkeit, Reifenqualität, Luft- und Fahrbahntemperatur, Schlupf, Zwischenmedium, etc.) abhängig. Daher ist eine Ermittlung der Griffigkeit allein auf Basis der Fahrbahntextur derzeit nicht möglich und erfolgt mittels aufwendiger Messungen und Simulation der Bremsvorgänge unter standardisierten Bedingungen. Die Griffigkeitsmessungen werden weltweit auf angenässter Fahrbahn durchgeführt, da auf einer trockenen Fahrbahn in der Regel das Griffigkeitsniveau relativ hoch ist. Weiterhin sind die Reibungswerte beträchtlich von dem Bewegungszustand des Fahrzeugs bzw. von dem Schlupfzustand abhängig. Der Schlupf bezeichnet die prozentuale Abweichung der Umfangsgeschwindigkeit des Rades von der Fahrgeschwindigkeit. Ein Schlupfwert von z.B. 18% bedeutet, dass die Umfangsgeschwindigkeit des Rades 82% der Geschwindigkeit des frei rollenden Rades (der Fahrgeschwindigkeit) beträgt, d.h. das Rad wird gebremst. Die Kraftübertragung erreicht ein Maximum bei einem Schlupfwert von 10...20% (bei Nässe) und fällt mit zunehmendem Schlupf auf den Gleitreibungsbeiwert bei 100% Schlupf (blockiertes Rad) ab. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand nimmt die Griffigkeit nur geringfügig mit der Liegedauer ab. So kann bei Einhaltung der zulässigen Reibungsbeiwerte bei dem Ablauf der Gewährleistungsfrist vielfach davon ausgegangen werden, dass dieses Merkmal nicht maßgebend die Lebensdauer des Straßenoberbaus bestimmen würde. Aus Gründen der Verkehrssicherheit spielt die Griffigkeit jedoch eine wesentliche Rolle bei der Identifikation und Beseitigung von Unfallgefahrstellen.

2.3 Zustandserfassung und Zustandsgrößenermittlung

In der Zustandserfassung oder Zustandserhebung werden die Art, das Ausmaß (Umfang) und die Schwere der verschiedenen Schadensmerkmale erfasst, sowie die eindeutige Position der Schäden dokumentiert. Die Zustandsdaten zusammen mit den Verkehrs- und Bestandsdaten bilden die Grundlage jedes Erhaltungsmanagementsystems (EMS). Die Bedeutung einer regelmäßigen systematischen Zustandserfassung für die Straßenerhaltung kann wie folgt zusammengefasst werden⁶:

- Analyse des Ist-Zustandes: Bestimmung von kritischen Abschnitten zur intensiven Beobachtung, Ermittlung des umgehenden Handlungsbedarfs in Form von Sofortmaßnahmen
- Basis für Prognosen und Verbesserung der bestehenden Prognosen: Verbesserung der Prognosegenauigkeit durch Einbeziehung von neuer Information (vgl. Kap. 3.3 & Kap. 3.4)
- Planung und Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen auf Abschnitts- und Netzebene: Planung und Optimierung von kurz- und mittelfristigen Maßnahmen
- Entwicklung von Erhaltungsstrategien auf Netzebene: Budgetfestlegung und Entwicklung von langfristigen Strategien zur Erreichung von definierten Erhaltungszielen
- Erkenntnisgewinn für Straßenbau und -erhaltung: Abschätzung der Wirkdauer und Analyse der Versagensmechanismen von verschiedenen Bauweisen bzw. Erhaltungsmaßnahmen

Die Erfassungsintervalle hängen von der Gesamtlänge des Netzes und von den Ressourcen der Betreiber (Budget, Anzahl Messgeräte, Messleistung, etc.), sowie von der bisherigen Erfassungspraxis. Für die Zwecke des Erhaltungsmanagement und die Ableitung von Prognosemodellen empfiehlt es sich, den Straßenzustand auf Netzebene alle 3 bis 5 Jahre nach möglichst einheitlicher Methodik zu erfassen. Bei einer genaueren Betrachtung können optimale Erfassungsintervalle ausschließlich ökonomisch ermittelt werden. Kürzere Intervalle bzw. größere Anzahl an Erfassungen erlauben eine genauere Vorhersage der zukünftigen Entwicklung des Straßenzustandes. Eine genauere Prognose führt zur Reduktion der Unsicherheit bzw. Reduktion der Streuung von Zustands- und Ausfallsverteilungen (vgl. Kap. 3.3.2). Die optimale Länge der Erfassungsintervalle kann dann aus dem zusätzlichen Nutzen durch bessere Prognosen im Vergleich zu dem finanziellen Aufwand für Zustandserfassung ermittelt werden.

Die Dokumentation der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen und die Ergebnisse der Abnahmeprüfungen sollen als eine unverzichtbare Ergänzung zu den Erfassungsdaten ebenfalls in der Straßendatenbank gespeichert werden. Werden die eingesetzten Maßnahmen nicht vollständig aufgezeichnet, dann liegen zensierte Daten vor und es kann zu einer Überschätzung der Lebensdauer kommen. Abnahmeprüfungen hingegen stellen eine zusätzliche Erfassung dar, die den Anfangszustand bzw. die Auswirkung einer Maßnahme (Rücksetzwert) beschreibt.

Die Verfahren zur Zustandserfassung lassen sich gemäß Literatur⁷ grundsätzlich in drei Gruppen unterteilen:

- **Visuell-sensitive Zustandserfassung:** Optische Aufnahme der sichtbaren Schäden durch geschultes Personal anhand von definierten Kriterien (z.B. Schadenskatalog) und/oder Beurteilung aufgrund von erzeugten physischen Empfindungen beim Befahren einer Straße (z.B. Längsebenheit)
- **Visuell-manuelle Zustandserfassung:** Visuelle Erfassung, ergänzt durch händische Messungen mit einfachen Hilfsmitteln, z.B. Messung der Spurrinnen mit Richtlatte und Messkeil
- **Messtechnische Zustandserfassung:** Aufnahme von Schäden durch automatische schnellfahrende Messsysteme (z.B. RoadSTAR) oder stationär arbeitende Messsysteme (z.B. FWD)

Die visuellen Erhebungen erfolgen durch Begehen oder Befahren mit niedriger Geschwindigkeit und Registrierung der Schäden vor Ort. Alternativ können durch schnellfahrende Messfahrzeuge gewonnene Foto- und Videoaufnahmen nachträglich ausgewertet werden, was auch eine Überprüfung der Ergebnisse erlaubt. Die visuellen Zustandserfassungen sind zeitintensiv, von subjektiven Wahrnehmungen

⁶ vgl. UDDIN, W. (2006) S18:18-26

⁷ vgl. WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S61; SCHMUCK, A. (1987) S65-93; SOCINA, M. (2007) S33

geprägt und erfordern meistens eine Sperrung der Erfassungsstrecke. Dabei können Schadensausmaß und -schwere nur grob abgeschätzt werden. Da bestimmte Merkmale nur messtechnisch bzw. visuell erfassbar sind, hat sich in der Praxis eine Kombination von beiden Verfahren als sinnvoll bewährt. Auf das hochrangige Netz ist die messtechnische Erfassung mit schnellfahrenden Geräten vorzuziehen, da damit eine hohe Leistungsfähigkeit bei nur geringer Beeinträchtigung des Verkehrs erreicht wird. Für das untergeordnete Straßennetz kann die billigere visuelle Zustandserfassung von Vorteil sein und bei beengten Verhältnisse im Innerortsbereich die einzige Alternative darstellen. Ähnlich wie bei der Erfassungsintervalle können alternative Messverfahren bzw. -systeme mit verschiedener Mess-

Die Zustandserfassungen stellen eine Momentaufnahme des Straßenzustandes dar. Der Zustand wird durch verschiedene Eigenschaften (Zustandsmerkmale) charakterisiert (vgl. Kap. 2.2). Die

Dateninformation verglichen werden.



Abbildung 2: Ablauf der Zustandsdatenanalyse von der Erfassung zur Gesamtbewertung des Straßenzustandes

Zustandsmerkmale werden durch Indikatoren (Schadensausmaß und Schadensschwere) qualitativ oder quantitativ beschrieben. Das Schadensausmaß gibt die Ausdehnung eines Schadens in Form von betroffener Fläche, Länge oder Anzahl an. Die Schadensschere bestimmt zusätzlich die Intensität des Schadens und somit die Dringlichkeit einer Erhaltungsmaßnahme (z.B. Rissbreite, Schlaglochtiefe, etc.).

Im Rahmen der Zustandserfassung werden zunächst Roh- oder Maschinendaten ermittelt. Diese zeichnen sich durch eine hohe Datendichte aus und werden in Österreich nicht systematisch aufbewahrt. Die Rohdaten enthalten auch zusätzliche Informationen (z.B. Temperatur, Kurvenradien, Neigungen, etc.) und dienen als Grundlage für die Berechnung von Messgrößen (z.B. Spurrinnentiefe aus dem Querprofil).

Die Messgrößen bei messtechnischer Erfassung bzw. die Erfassungsgrößen bei visueller Erfassung beschreiben das Ausmaß oder die Schwere des Schadens und haben eine physikalische Einheit (m², lfm, etc.) oder werden auf Fläche bzw. Länge bezogen (Prozentwert). Die Datendichte kann in Abhängigkeit von dem Merkmal und dem Messsystem deutlich variieren. In Österreich werden die Messgrößen standardmäßig für 50 m-Abschnitte aufgezeichnet. Bei einer visuellen Erfassung sind dagegen Abschnittslängen bis 500 m üblich.

Aus den Mess- bzw. Erfassungsgrößen werden in einem weiteren Schritt Zustandsgrößen gebildet (Zustandsgrößenermittlung). Für die Ermittlung von Zustandsgrößen kommen je nach Land und Merkmal verschiedene Verfahren zur Anwendung. Dabei können verschiedene Schadenstypen in einer Gruppe zusammengefasst werden (z.B. Oberflächenschäden) und unterschiedliche Schadensschweren eines Merkmals können durch Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden. Durch die Aggregation und Gewichtung wird jedoch an Datenschäre und -objektivität verloren. Der gesamte Prozess von der Erfassung der einzelnen Merkmale bis zur Beurteilung des Gesamtzustandes (vgl. Kap. 2.4) ist in Abbildung 2 dargestellt⁸.

Im Folgenden werden die relevanten Zustandsmerkmale sowie die Verfahren zu ihrer Erfassung in Österreich, Deutschland und in der Schweiz vorgestellt. Die Erfassung der Tragfähigkeit wird dabei nicht bei jedem Land behandelt, da diese ausschließlich auf Projektebene und nicht mit landspezifischen Geräten erfolgt. Neu entwickelte Systeme zur Messung im fließendem Verkehr (z.B. Rolling Wheel Deflectometer, USA) werden zukünftig auch eine Erfassung der Tragfähigkeit auf Netzebene erlauben.

vgl. WENINGER-VYCUDIL, A. et al. (2009) \$18,19; SOCINA, M. (2007) \$25-30,61,62; HOFFMANN, M. (2006) \$47

2.3.1 Zustandserfassung in Österreich

Die messtechnische Zustandserfassung der Autobahnen und Schnellstraßen (ca. 2.185 km) wird periodisch alle 5 Jahren durch die dafür akkreditierte Prüfanstalt Austrian Institute of Technology (AIT) durchgeführt. Dabei erfolgt die Erfassung mit dem Hochleistungsmessgerät RoadSTAR, wobei dieses Gerät auch als Standard den Normen zugrunde gelegt ist. Die erste messtechnische Zustandserfassung des Straßenoberbaus wurde in den Jahren 1991 bis 1996 durchgeführt und durch eine visuelle Erfassung 1995 ergänzt. Ursprünglich wurde auf dem hochrangigen Netz nur der höchstbelastete erste Fahrstreifen systematisch erfasst, seit dem Jahr 2010 umfassen die Messungen jedoch alle Fahrstreifen. Das Netz der Landesstraßen B wurde bis 2002 in zwei Messkampagnen vollständig erfasst. Die Zustandserfassung der Landesstraßen B und L wird seither je nach Bundesland messtechnisch (z.B. Salzburg) und/oder visuell (z.B. Steiermark) und somit nicht nach einheitlicher Methodik durchgeführt. Derzeit wird der Straßenzustand durch fünf Merkmale im Rahmen der österreichischen Pavement Management System (VIAPMS) beschrieben: Risse, Oberflächenschäden, Längsebenheit, Querebenheit und Griffigkeit (vgl. Tabelle 1).

Das Messsystem RoadSTAR (Road Surface Tester of Arsenal Research) ist auf einen 2-Achs-Lkw aufgebaut und mit Einrichtungen zur Messung der Griffigkeit, Textur, Längs- und Querebenheit, Risse, Oberflächenschäden sowie allgemeine Trassierungsparameter (Längs- und Querneigung, Kurvenradien) ausgerüstet. Ein Wassertank über der Hinterachse des Fahrzeugs erlaubt die konstante Annässung der Fahrbahn während Griffigkeitsmessungen. Sämtliche Messergebnisse werden über GPS und Stationierung positionsgenau verortet. Im Unterschied zu Deutschland, wo drei verschiedene Arten von Messfahrzeugen für die routinemäßige Erfassung des Straßenoberbaus eingesetzt werden, können mit dem RoadSTAR im Rahmen einer einzigen Messfahrt alle für das PMS relevanten Schadensmerkmale erfasst werden. Derzeit sind in Österreich (und auch weltweit) zwei solche Fahrzeuge vorhanden, wobei das zweite Fahrzeug speziell für Griffigkeits- und Texturreferenzmessungen eingesetzt wird.

Die Erhebung der Oberflächenschäden und Risse mit dem System RoadSTAR erfolgt mittels einer am Dach des Messfahrzeugs montierten digitalen Zeilenkamera. Die Erfassungsbreite in Querrichtung beträgt 4 m. Das Verfahren erlaubt die Feststellung von Rissen ab 1 mm Breite. Eine Beleuchtungseinheit am Querbalken des RoadSTAR erlaubt eine Aufnahme, die weitgehend unabhängig von den wechselnden Lichtverhältnissen ist. Das so gewonnene Fotomaterial wird nachträglich manuell durch geschultes Personal ausgewertet. Die Erfassung von Oberflächenschäden und Risse auf dem Netz der Landes- und Gemeindestraßen erfolgt derzeit vielfach visuell (Begehung bzw. Befahrung) durch Erfassungsteams.

Unabhängig von der Erfassungsmethode werden die Fahrbahnschäden getrennt nach Asphalt- und Betonbauweise anhand eines Schadenskatalogs (z.B. RVS 13.01.11) bewertet. Die Risse in Asphaltdecken werden in Einzelrissen (Längs-, Quer- und unregelmäßige Risse), Nahtrissen und Netzrissen unterteilt und nach Ausmaß und Schwere (drei Stufen, S1-S3) erfasst⁹. Obwohl diese Risstypen verschiedene Ursachen und verschiedene zeitliche Entwicklung aufweisen, werden sie im Rahmen des PMS zu einem Merkmal zusammengefasst. Zu diesem Zweck sollen die Einzelrisse durch Multiplikation mit einer Einflussbreite von 0,5 m (Überlegung basiert auf eine OECD-Studie) in Fläche umgerechnet werden. Zusätzlich wird die Einflussbreite mit einem Gewichtungsfaktor nach der Schadensschwere erhöht oder vermindert. Bei der Festlegung des Gewichts für S1 (0,4) wird davon ausgegangen¹⁰, dass bei einer bestimmten maximalen Schädigung auch die geringste Schwere allein zum Erreichen des Warnwertes (Anlass zur Planung von Maßnahmen, vgl. Kap. 2.4) führen sollte. Nach vergleichbaren Überlegungen wird auch das Gewicht für S3 bestimmt. Die Zusammenfassung von Rissen mit verschiedener Einheit (Ifm bzw. m²) sowie die Gewichtung und die Multiplikation mit einer willkürlichen Einflussbreite stellen ein großes Problem in Bezug auf die Maßnahmenwahl und –optimierung des bestehenden PMS dar (vgl. Kap. 2.3.4).

Dem Merkmal Oberflächenschäden werden ebenso Schäden mit verschiedenen Ursachen und verschiedener Progressivität zugeordnet, wie z.B. Ausmagerung, Bindemittelaustritt, Flickstellen, Ablösungen und Schlaglöcher bei Asphaltstraßen. Für jedes Einzelmerkmal wird nur eine Schwere definiert.

⁹ vgl. WENINGER-VYCUDIL, A. et al. (2009) S20-26; MOLZER, C. et al. (2002) S20-29

¹⁰ vgl. WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S119-125

Die Erfassung der Längsebenheit erfolgt gemäß RVS 11.06.68 (2004) nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung mittels 4 Lasersensoren, die kontinuierlich den Abstand zur Fahrbahnoberfläche messen. Diese Sensoren sind an einem 2 m langen Längsbalken in der Spur der rechten Räder von Road-STAR montiert. Das Straßenlängsprofil wird mit Höhenpunkten in Abstand von 5 cm ermittelt, wobei auf je 5 Messwerte ein Medianfilter angewandt wird, um Einflüsse der Textur zu isolieren. Ferner werden Wellenlängen <0,5 m und >50,0 m gefiltert. Die Lasersensoren in Längsabständen 0 m/1,0 m/2,0 m bilden ein symmetrisches System zur Erfassung von Wellenlängen ab 10 m. Das asymmetrische System mit Sensoren in Abständen 0m/0,1 m/2,0 m soll die kürzeren Wellenlängen umfassen. Durch Überlagerung der beiden Längsprofile entsteht das endgültige Profil, auf dessen Basis unterschiedliche Kennwerte der Längsebenheit ermittelt werden können.

Der International Roughness Index (IRI) ist der maßgebende Parameter für Beschreibung der Längsebenheit in Österreich und wird für eine Mindestlänge von 50 m berechnet. Ausgehend von dem gemessenen "wahren Profil" wird die Fahrt eines vereinfachten Fahrzeugs (Viertel-Fahrzeug) über die gemessene Strecke mathematisch simuliert (vgl. Tabelle 4). Das Fahrzeug wird durch ein Feder-Dämpfer-System ersetzt. Der IRI ergibt sich als die Summe der Auslenkungen der Feder in beide Richtungen, dividiert durch die überfahrene Länge¹¹. Die Bestimmung dieses Index ist mit einer großen Anzahl an Messgeräten möglich. Zudem sind die Ergebnisse zeitlich stabil und nach heutigem Kenntnisstand weitgehend vergleichbar. Da mit dem IRI bestimmte Unebenheitsformen (Einzelhindernisse und periodische Unebenheit) nur unzureichend beschrieben werden, wird derzeit eine andere Kenngröße für Beurteilung der Längsebenheit gesucht¹².

Die Erfassung der Querebenheit erfolgt gemäß RVS 11.06.67 (2004) nach dem Prinzip der berührungslosen Abtastung mit Lasersensoren, die an einem starren Messbalken an der Vorderseite des Fahrzeugs (RoadSTAR) montiert sind. Durch schräg gestellte Lasersensoren wird bei einer Messbalkenlänge von 2,5 m eine Erfassungsbreite von 3,3 m erreicht. Gemessen wird der Abstand zwischen dem Sensor und der Straßenoberfläche. Daraus wird der Querprofilverlauf abgeleitet, wobei der Abstand der Messpunkte im Querprofil 15 cm beträgt. Um eine Abhängigkeit von Textureinflüssen zu vermeiden, werden jeweils 5 Einzelprofile in 1 cm Längsabstand erfasst und gemittelt. Die resultierenden Querebenheitswerte werden in einem Abstand von 1 m gespeichert. Die maßgebende Zustandsgröße für das Pavement Management System (PMS) ist die maximale Spurrinnentiefe der linken und rechten Radspur unter simulierten 2 m-Latte für eine Abschnittslänge von 50 m. Ein Hochpräzisions-Kreiselsystem erlaubt die Berechnung der Querneigung bzw. der fiktiven Wassertiefe.

Die Erfassung der Griffigkeit mit dem System RoadSTAR erfolgt nach dem Prinzip des "modifizierten Stuttgarter Reibungsmessers" (STURM)¹³. Die Modifikation besteht darin, dass der Reifendruck des Messrads konstant gehalten wird. Zudem wird auch die Radlast laufend gemessen, was eine höhere Genauigkeit der erfassten Griffigkeitswerte gewährleistet. Der Reibungsbeiwert µ_{RS} wird als das Verhältnis der aus dem Bremsmoment (gemessen) berechneten Bremskraft zu der aktuellen Radlast in 15 cm Abstand ermittelt, über eine Länge von 5 m gemittelt und gespeichert. Für das PMS werden jedoch die 50 m-Mittelwerte verwendet. Die Erfassung wird standardmäßig mit einem gerade geführten Messrad mit genormtem Messreifen bei konstantem Schlupf von 18% in der rechten Radspur auf genässter Fahrbahn durchgeführt. Dabei beträgt die Messgeschwindigkeit 60 km/h. Die Schlupfmessung ermöglicht im Unterschied zur Messung mit blockiertem Messrad einerseits eine lückenlose Aufzeichnung der Reibungsbeiwerte. Andererseits finden die Bremsvorgänge der heutigen Fahrzeuge, die über ein Antiblockiersystem (ABS) verfügen, im Bereich des optimalen Schlupfs (10...20%) statt. Alternativ sind mit dem Road-STAR ABS- und Blockmessungen auch möglich. Das Messrad ist so am Fahrzeug aufgehängt, dass auch bei Kurvenfahrt keine Seitenkräfte auf das Rad wirken. Aufgrund von konstruktiven Besonderheiten können Griffigkeitswerte unter bestimmten minimalen Kurvenradien nicht mehr erfasst werden. Somit beträgt der minimale Kurvenradius bei der Standardmessgeschwindigkeit (60 km/h) 85 m. Für beengte Verhältnisse wird in Österreich auch der Grip Tester eingesetzt.

¹¹ vgl. KUNISCH, B. (2006) S53-59; STÜTZE, T. (2004) S33; SAYERS, M.W. et al. (1998) S45-52

¹² vgl. FRÜHMANN, G. et al. (2005)

¹³ vgl. RVS 11.06.65 (2002); GRUBER, J. et al. (2004) S13-15; KLUGER-EIGL, W. (2009) S34-39; SOCINA, M. (2007) S40

Schaden	Beschreibung	Ausmaß	Schwere			
ASPHALT: Risse (Zustandsgröße ZG _R	I,Asphalt)					
• Einzelrisse (Längsrisse, Querrisse, unr						
 Vergossene oder sanierte Ri 	sse geringer Breite	Ø Breite < 2 mm	m (m ²)*	S1 (G=0,4)		
 Offene Risse mittlerer Breit 	e	Ø Breite 210 mm	m (m ²)*	S2 (G=1,0)		
 Offene Risse großer Breite of 	oder mehrfach parallele Risse	Ø Breite > 10 mm	m (m ²)*	S3 (G=4,0)		
Offene Fugen, Nahtrisse (Geradlinig ve	erlaufende Risse zw. den Fertigerbahnen)					
 Fugen/Nahtrisse geringer Bit 	reite	Ø Breite < 2 mm	m (m ²)*	S1 (G=0,4)		
 Offene Fugen/Nahtrisse mit 	tlerer Breite	Ø Breite 210 mm	m (m ²)*	S2 (G=1,0)		
 Offene Fugen/Nahtrisse group 	ßer Breite oder mehrfach parallele Risse	Ø Breite > 10 mm	m (m²)*	S3 (G=4,0)		
• Netzrisse (Netzmaschen >300 mm bei	dicken Schichten; feinmaschige - bei dünnen)					
- Offene Risse, die die Decke	mosaikförmig zerteilen	Ohne Ausbrüche	m ²	S2 (G=1,0)		
- Offene mosaikformige Risse	e mit ausgebrochenen Polygonecken	Mit Ausbruche	m-	S3 (G=4,0)		
*bei frachennarten Kissausbreitungen						
ASPHALT: Oberflächenschäden (Zusta	andsgröße ZG _{OS,Asphalt})					
 Ausmagerung und Kornausbrüche (Au Mörtel; Kornausbrüche – Herauslösen 	smagerung – Herauslösen von bituminösen von Gestein von der Oberfläche)	Verlust Bitumen & Füller Kornverlust	m ²	S1 (G=1,0)		
Oberflächliche Flickstellen (Oberfläch	liche Behandlung von Schadstellen)	Kurzfristige Maßnahme	m ²	S1 (G=1,0)		
Bindemittelaustritt (Austritt von Bitum	en an der Straßenoberfläche)	Flächiger Bindemittelaustritt	m ²	S1 (G=1,0)		
 Ablösungen und Abplatzungen (Örtlich Oberflächenbehandlung; klar erkennba 	h begrenztes Ablösen einer Deckschicht oder re Oberfläche der darunter liegenden Schicht)	Flächiger Schichtverlust	m ²	S2 (G=5,0)		
Schlaglöcher (Löcher in der Fahrbahne	lecke und den darunter liegenden Schichten)	Lokale tiefe Schäden	m ²	S2 (G=5,0)		
BETON: Risse (Zustandsgröße ZG _{RI,Bet} • Einzelrisse (Längsrisse, Querrisse, unre	_{ton}) egelmäßige Risse) / Eckabbrüche					
 Sanierte Risse / Sanierte Ecl 	kabbrüche	Geschlossen	m	S1 (G=0,4)		
- Offene Risse / Offene Eckal	bbrüche	Offen	m	S3 (G=4,0)		
BETON: Oberflächenschäden (Zustand	lsgröße ZG _{OS,Beton})					
Ablösungen, Abplatzungen und Ausbrüder Oberfläche bis hin zu Ausbrüchen	üche (Ablösen oder Abplatzen von Beton an mit großer Tiefe)	Flächige Schäden (In den obersten 3 bis 15 mm)	m ²	S2 (G=5,0)		
 Kantenschäden (Muschelartige Ausbrü ränder; oft mit parallelen Rissen bis zu 	iche oder Abplatzungen entlang der Platten- 30 cm von der Fuge)	Kantenschäden (Im Bereich der Quer- und Längsfuge)	m ²	S2 (G=5,0)		
Reparaturstellen aus Asphalt (Örtlichen durch den Einbau von Asphalt)	r Teil- oder Gesamtersatz von Betonfeldern	Kurzfristige Maßnahme	m ²	S2 (G=5,0)		
ASPHALT/BETON: Längsebenheit (Zustandsgröße ZGLE)						
International Roughness Index IRI [m/	km] für Mindestabschnittslänge von 50 m, z.B.	mit RoadSTAR lt. RVS 11.06.68	(2004)			
ASPHALT/BETON: Spurrinnen (Zusta	andsgröße ZG _{SR})					
Maximale Spurrinnentiefe [mm] der lin	nken und rechten Radspur unterhalb der 2 m-La	tte, z.B. mit RoadSTAR lt. RVS	11.06.67 (2004), Mitte	lwert über 50 m		
ASPHALT/BETON: Griffigkeit (Zusta	ndsgröße ZG _{GR})					
 Reibungskoeffizient μ [-] der nassen St Abschnitte, z.B. mit RoadSTAR lt. RV 	traßenoberfläche in der rechten Radspur mit Me /S 11.06.65 (2002); Alternativ: Grip Tester lt. R	essrad mit konstantem Schlupf und VS 11.06.71 (2009)	d Messgeschwindigkei	it 60 km/h für 50 m		
ASPHALT/BETON: Traofähiokeit (Zustandsoröße ZGreener)						
Erfassung nur auf Projektebene bei Ber und Bohrkernuntersuchungen; Alternat	darf nach zusätzlichen detaillierten Untersuchur tiv: Deflexion [mm/100] mit Benkelmanbalken,	ngen; Restlebensdauer RL [%] üb Lacroix-Deflectograph o. visuell	er Tragfähigkeitsmess e Beurteilung lt. RVS	ungen, z.B. FWD 11.06.63 (1995)		
Legende:	ANMERKUNGEN:					
S Schadensschwere	 Spurrinnen, Längsebenheit und Griffigkeit Oberflächenschäden werden visuell bzw. u 	werden messtechnisch mit dem S	System RoadSTAR erf	asst. Risse und		
ZG _i Zustandsgröße Merkmal i [-] AML _{R1i} Ausmaß Längenwert des		und Oberflächenschäden erfolgt	durch Gewichtung in A	Abhängigkeit von		
Merkmals <i>i</i> [m] AMA _{RLi} Ausmaß Flächenwert des	werden unter Berücksichtigung einer stand	ardisierten Einflussbreite von 0,5	m in Fläche umgerech	hnet		
Merkmals <i>i</i> [m ²]	Ermittlung ZG Risse (Asphalt):	Ermittlu	ing ZG Oberflächensc	häden (Asphalt):		
A_B Bezugsfläche (Abschnitt) $[m^2]$ G_i Gewicht Schadensschere S:	$ZG_{RI,Asphalt} = \frac{0.5.\sum_{i} (AML_{RI,i}.G_{RI,i}) + \sum_{i} (AML_{RI,i}.G_{RI,i})}{A}$	$\frac{MA_{RI,i}G_{RI,i}}{2}.100[\%] \qquad ZG_{OS,A}$	$_{sphalt} = \frac{\sum_{i} (AM_{OS,i}.G_{OS})}{A}$)		
	1 B		* * B			

Tabelle 1: Erfasste Schadensmerkmale im Rahmen der Zustandserfassung in Österreich (System VIAPMS)¹⁴

¹⁴ Eigene Darstellung auf Basis von WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S18-28; RVS 13.01.11 (2009); RVS 13.01.16 (2012); RVS 11.06.67 (2004); RVS 11.06.68 (2004); RVS 11.06.65 (2002); RVS 11.06.71 (2009); HOFFMANN, M. (2014)

2.3.2 Zustandserfassung in Deutschland

Die Zustandserfassung und -bewertung der Bundesfernstraßen (Autobahnen und der Bundesstraßen) wird durch private Fachunternehmen im Auftrag von Bund und Ländern unter der Geschäftsführung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bundesweit nach einheitlicher Methodik in einem vierjährlichen Zyklus durchgeführt und als ZEB-Kampagne bezeichnet. Die ersten zwei Jahre des Zyklus werden die Autobahnen erfasst, die zweite zweijährige Messkampagne umfasst die Bundesstraßen. Die erste Erfassung erfolgte in den Jahren 1991/1992 auf die Bundesautobahnen bzw. 1993 bis 1995 auf die Bundesstraßen. Seitdem liegen jeweils fünf Zustandserfassungen bis Ende 2012 vor, die für eine zuverlässige Prognose der Zustandsentwicklung auf empirischer Basis weitgehend ausreichend sind (vgl. Kap. 3.3.2). Gegenwärtig werden auf Autobahnen (derzeit ca. 12.850 km) alle Fahrstreifen, auf Bundesstraßen (derzeit ca. 39.700 km) der Fahrstreifen in Stationierungsrichtung erfasst. Aufgrund der großen Gesamtnetzlänge wurde entschieden, dass die Erfassung nur messtechnisch mit schnellfahrenden Fahrzeugen, die im Verkehr "mitschwimmen", erfolgen soll. Das Erfassungsverfahren wird auch auf Land-, Kreis- und Gemeindestraßen angewendet.

Die Zustandserfassung und –bewertung (ZEB) ist in vier Teilprojekte unterteilt: Teilprojekt 1 (Erfassung der Längs- und Querebenheit), Teilprojekt 2 (Erfassung der Griffigkeit), Teilprojekt 3 (Erfassung der Substanzmerkmale) und Teilprojekt 4 (Auswertung der Daten). Bei der Auswertung werden die Einzelmesswerte, die je nach Zustandsmerkmal mit verschiedener Datendichte aufgezeichnet werden, über eine Abschnittslänge von 100 m für freie Strecken bzw. 20 m für Ortsdurchfahrten aggregiert. Eine Übersicht der erfassten Merkmale und der zugehörigen Zustandsindikatoren ist in Tabelle 2 gegeben.

Die Erfassung des Oberflächenbildes erfolgt getrennt nach Asphalt- und Betonbauweise mittels eines speziell dazu entwickelten Messfahrzeugs zur Aufnahme von Substanzmerkmalen (MESOB). Durch 8 hochauflösende Digitalkameras werden lückenlos Bilder der Straßenoberfläche gewonnen, die nachträglich manuell anhand eines Schadenskatalogs durch Fachkräfte ausgewertet werden. Um die Fachkräfte bei dieser zeit- und kostenintensiven Aufgabe zu unterstützen, sind automatisierte Systeme, die eine Vorauswahl der Bilder treffen können, in Entwicklung bzw. Erprobung¹⁵.

Für die Schadensauswertung bei Asphaltdecken wird der Fahrstreifen in Rasterfelder mit Breite von einem Drittel der Fahrstreifenbreite und Länge von einem Meter geteilt (vgl. Abbildung 3). Bei der Erfassung wird dann nur unterschieden, ob der Schaden im betrachteten Rasterfeld vorkommt oder nicht (betroffen Ja/Nein), d.h. es findet keine quantitative Aufnahme von Risslängen oder –breiten statt. Zwischen Netzrissen und Einzelrissen wird nicht unterschieden und Felder gelten als betroffen, auch wenn sie nur in geringem Ausmaß Einzelrisse aufweisen. Daher ist es in Bezug auf Risse nur begrenzt möglich, eine optimierte Auswahl zwischen Maßnahmen zu treffen bzw. das Ausmaß der erforderlichen Maßnahmen zu ermitteln. Die Erfassung der Merkmale Ausbrüche (AUS), Offene Arbeitsnähte (ONA), Bindemittelanreicherung (BMA) stellt derzeit nur einen zusätzlichen Aufwand dar, da sie weiter nicht bewertet werden und keine Rolle bei der Maßnahmenwahl spielen, obwohl sie mit Verkehrssicherheit und Substanzerhalt im Zusammenhang stehen.

Für die messtechnische Zustandserfassung der Ebenheit im Längs- und Querprofil wird das schnellfahrende Ebenheitsmessfahrzeug zur Fahrbahnoberflächenanalyse EFA der Bundesanstalt für Straßenwesen verwendet. Die Erfassung der Längsebenheit erfolgt das nach dem Prinzip der berührungslosen Mehrfachabtastung. Fünf an einem starren Träger (4 m lang) montierte Lasersensoren messen laufend den Abstand zur Straßenoberfläche in der rechten Radspur der Fahrbahn. Auf Basis der so gewonnenen Ebenheitslängsprofile mit Profilpunkten in 10 cm Abstand werden die Zustandsgrößen der allgemeinen Unebenheit für 100 m-Abschnitte nach komplexen Berechnungsverfahren ermittelt.

Das Unebenheitsmaß (AUN) ist eine rein geometrische Größe zur Charakterisierung der Längsebenheit¹⁶. Seine Berechnung beruht auf die Annahme, dass das Straßenprofil als eine Überlagerung von Sinuswellen mit unterschiedlichen Längen und Amplituden betrachtet werden kann. Durch Fou-

¹⁵ vgl. CANZLER, U. et al. (2011)

¹⁶ vgl. MAERSCHALK, G. et al. (2011) S21,22; SCHMUCK, A. (1987) S37,38; KUNISCH, B. (2006); STÜTZE, T. (2004)

rier-Transformationen ist eine Zerlegung dieses Profils in seine Komponenten: Wellenlänge, Amplitude und Phase möglich. Die spektrale Unebenheitsdichte $\Phi_h(\Omega)$ (Power Spectral Density, PSD) ist das Quadrat der Amplituden, bezogen auf das Produkt der maximalen Frequenz (entspricht der minimalen Wellenlänge) und der Anzahl der Stützpunkte des Längsprofils. Das Unebenheitsspektrum ergibt sich dann dadurch, dass die spektrale Dichte gegenüber der entsprechenden Wegkreisfrequenz bzw. Wellenlänge aufgetragen wird (vgl. Tabelle 4). Dieses Spektrum wird durch eine Gerade mittels der OLS-Methode ersetzt (vgl. Tabelle 16). Das allgemeine Unebenheitsmaß ist der Wert der linearisierten spektralen Dichte bei einer Bezugswegkreisfrequenz $\Omega_0=1$ (entspricht einer Wellenlänge von $L_0=6,28$ m). Niedrige Werte des Unebenheitsmaßes deuten auf eine gute Ebenheit hin.

Da das Unebenheitsmaß insbesondere periodische und einzelne Unebenheiten (z.B. Stufenbildung) nicht ausreichend berücksichtigt, wurde der Längsebenheitswirkindex (LWI) als Ergänzung zu AUN entwickelt. Dieser Index charakterisiert die Auswirkungen der Längsunebenheiten und die resultierende Beanspruchung der Straße, des Fahrers und des Ladegutes. Die Berechnungsgrundlagen werden hier nicht diskutiert bzw. können der Literatur¹⁷ entnommen werden. Das Längsprofil wird auf Basis von drei "Filtern" bewertet: Mensch-Filter (Wellenlängen von 3 bis 10 m), Radlast-Filter als Kriterium zur Verkehrssicherheit und Straßenbeanspruchung (Wellenlängen <3 m) und Ladegut-Filter (Wellenlänge >10 m). Ausschlaggebend für die Ermittlung von LWI sind die größten Auswirkungen der Unebenheit.

Das Verfahren "Bewertetes Längsprofil" (BLP) wurde in den letzten Jahren entwickelt und berücksichtigt sowohl die Geometrie, als auch deren Auswirkungen, wobei die Berechnung weitgehend unabhängig von Annahmen über die Geschwindigkeit, des Fahrzeugtyps, etc. erfolgen soll. Aufgrund vielversprechender Ergebnisse erster Praxiserprobungen wurden auch Schritte gesetzt, das bewertete Längsprofil als einheitlichen Parameter zur Charakterisierung der Längsebenheit in Deutschland, Österreich und in der Schweiz zu verwenden.

Die Messung der Querebenheit erfolgt mit 19 Lasersensoren, die unter dem EFA-Fahrzeug quer zur Fahrtrichtung montiert sind. Je 11 seitliche Lasersensoren links und rechts erweitern die Erfassungsbreite auf insgesamt 4 m. Damit wird auch die Überbreite eines Messbalkens bei alternativen Systemen vermieden. Durch die Erfassung des Abstands zwischen Sensor und Straßenoberfläche von Messpunkten in Abstand von 10 cm ergeben sich vollständige Querprofile, die in Abstand von 1 m in Fahrtrichtung gespeichert werden. Die Querneigung wird mit den Daten eines Kreiselsystems und der Messgeschwindigkeit ermittelt. Die Zustandsgröße Spurrinnentiefe wird für 100 m-Abschnitte als Maximum aus den Mittelwerten der rechten und der linken Radspur mittels simulierter 2 m-Latte berechnet.

Die Erfassung der Griffigkeit in Deutschland erfolgt nach dem Prinzip des schräglaufenden Messrades¹⁸. Das System SCRIM (Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine) wurde in England entwickelt, in Deutschland weiter modifiziert und als SKM (Seitenkraftmessverfahren) bezeichnet. Das Gerät besteht aus einem Lkw, einem Wassertank und einem schräg zur Fahrrichtung gestellten Messrad mit profillosem Messreifen in Motorraddimension. Gemessen wird die Seitenkraft (senkrecht zur Radebene) bei einem konstanten Wasserfilm. Die Schrägstellung (um 20°) des sonst frei rollenden Rades entspricht einem Schlupf von ca. 34% und soll die Situation einer Kurvenfahrt und des Schleuderns simulieren. Der Seitenreibungsbeiwert ergibt sich als Verhältnis zwischen der gemessenen Seitenkraft und der Radaufstandskraft. Er wird kontinuierlich erfasst und standardmäßig in Längsintervallen von 1 m abgespeichert. Die ermittelten Einzelwerte werden zuerst auf die Sollgeschwindigkeit (40/60/80 km/h) und dann auf die Bezugstemperatur der Fahrbahn (20 °C) und des Wassers (20 °C) korrigiert und zu einem Mittelwert für 100 m-Abschnitt zusammengefasst. Die Messung erfolgt in die rechte Radspur in einem festgelegten Abstand von ca. 70 cm von Fahrbahnrandmarkierung. Die Ergebnisse sind bei Vorhandensein von Spurrinnen mit Vorsicht zu interpretieren. Das Gerät besitzt eine Tagesleistung von 200 bis 300 km in Abhängigkeit von der Straßenkategorie, was ein Grund für seine große Verbreitung weltweit ist. Gemäß der Literatur¹⁹ sind in Deutschland 14 SKM-Messfahrzeuge im Einsatz. Für schwer zugängliche Bereiche (z.B. Geh- und Radwege) werden die flexiblen Systeme Grip Tester und Mini-SKM verwendet.

¹⁷ vgl. KUNISCH, B. (2006) S61-64; SOCINA, M. (2007) S64

¹⁸ vgl. WEIDICH, P. (2009) S23,24; TP Griff-StB: SKM (2007); Arbeitspapier Nr. 9/M 2 zur ZEB (2001)

¹⁹ vgl. JACOT, A. et al. (2007) SB1-2

Merkmalsgruppen und Schadensmerkmale	Zustandsgröße	Indikator				
ASPHALT: Merkmalsgruppe Substanzmerkmale (Oberfläche)						
 Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse (Einzelne offene und vergossene Risse und Häufungen von Rissen, die netzartig miteinander verbunden sein können, wobei die Maschenweite des Netzes sehr unter- schiedliche sein kann) 	RISS	Betroffene Fläche, %				
Aufgelegte Flickstellen (Dünne, teilflächig aufgelegte Flickstellen, die aufgrund von Rissen und Oberflä- chenschäden aufgebracht worden sind, Oberfläche herauskragend)	AFLI	Betroffene Fläche, %				
• Eingelegte Flickstellen/Aufgrabungen (Teilflächige Wiederherstellung der Fahrbahnkonstruktion, die aufgrund von Rohrleitungsverlegungen oder ähnliche Straßenbauarbeiten entstanden ist, stufenlos)	EFLI	Betroffene Fläche, %				
Ausbrüche (Herauslösen von Teilen der Fahrbahnoberfläche infolge Verkehr, Verwitterung oder Witte- rungseinfluss)	AUS	Betroffene Fläche, %				
 Offene Arbeitsnähte (Arbeitsnähte, die fein bis klaffend aufgebrochen bzw. nicht vergossen sind, verlau- fen normalerweise geradlinig und treten in Längsrichtung in der Fahrbahnmitte, in Querrichtung – bei Deckschichtwechsel oder infolge von Einbauunterbrechungen auf) 	ONA	Gesamtlänge, m				
• Bindemittelanreicherung (Austreten von bituminösem Bindemittel an der Fahrbahnoberfläche)	BIN	Betroffene Fläche, %				
BETON: Merkmalsgruppe Substanzmerkmale (Oberfläche)						
• Längs- und Querrisse (Offene und vergossene, feine bis klaffende Brüche, die nicht im Rand- oder Eckbereich der Betonplatte auftreten)	LQRL/ LQRP	Ø Gesamtlänge, m/ Betroffene Platten, %				
• Eckabbrüche (Reparierte oder nicht reparierte, feine bis klaffende Brüche oder Zerstörungen im Bereich der Ecken. Als Eckabbrüche gelten beschädigte Plattenecken mit Seitenlängen zwischen 0, 2 und 1,2 m)	EBAF/ EABP	Ø Gesamtlänge, m/ Betroffene Platten,%				
• Kantenschäden (Reparierte oder nicht reparierte, feine bis klaffende Brüche oder Zerstörungen im Bereich der Kanten von Betonplatten mit einer Mindestbreite von 3 cm)	KASL/ KASAP	Ø Gesamtlänge, m/ Betroffene Platten, %				
Nester und Abplatzungen (Herauslösen von Teilen der Fahrbahnoberfläche infolge von Verkehr oder Verwitterung)	NTR	Betroffene Platten, %				
• Flickstellen und bituminöser Teilersatz (Mit Asphalt an der Plattenoberfläche ausgebesserter oder aufge- füllter Teilbereich sowie teilweiser oder vollständiger Ersatz der Zementbetonplatte durch Asphalt)	BTE	Betroffene Platten, %				
ASPHALT/BETON: Allgemeine Unebenheit (Merkmalsgruppe Ebenheit im Längsprofil)						
• Unebenheitsmaß, spektrale Dichte der Unebenheitshöhen $\Phi_h(\Omega_0)$ zur Charakterisierung von regellosen Unebenheitsformen (Geometrie) für einen 100 m-Abschnitt, z.B. mit EFA; Alternativ: ARGUS	AUN	cm ³				
• Längsebenheitswirkindex zur Charakterisierung der Auswirkungen von Einzelhindernissen und periodi- schen Unebenheitsformen auf Fahrer, Fahrzeug und Ladung für einen 100 m-Abschnitt, z.B. mit EFA	LWI	-				
Bewertetes Längsprofil	BLP	mm				
ASPHALT/BETON: Spurrinnen (Merkmalsgruppe Ebenheit im Querprofil)						
• Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken Spurrinnentiefe nach dem 2 m-Lattenprinzip, z.B. mit EFA, Mittelwert für einen 100 m-Abschnitt; Alternativ: ARGUS, ARAN	MSPT	mm				
• Max. aus den Mittelwerten der rechten und linken fiktive Wassertiefe, Mittelwert für 100 m-Abschnitt	MSPH	mm				
ASPHALT/BETON: Griffigkeit (Merkmalsgruppe Rauheit)						
 Seiteinreibungsbeiwert µ (SFC) der nassen Straßenoberfläche in der rechten Radspur mit schräg gestell- tem Messrad (20°) und Messgeschwindigkeit 40/60/80 km/h nach Geschwindigkeits- und Temperatur- korrektur für 100 m-Abschnitte mit SCRIM lt. TP Griff-StB: SKM (2007); Alternativ: SRM, Grip Tester 	GRI_40/GRI_60/ GRI_80	-				
ASPHALT/BETON: Tragfähigkeit						
Lokale Untersuchungen auf Projektebene, z.B. mit FWD						
ANMERKUNGEN:						
 Die messtechnische Erfassung der Substanzmerkmale erfolgt getrennt nach Asphalt- und Betonbauweisen mit schnellfahrenden Fahrzeugen (z.B. mit MESOB) zur lückenlosen Videoaufnahme der gesamten Fahrstreifenbreite. Die nachträgliche Auswertung des Videomaterials basiert auf den Schadenskatalog in ZTB ZEB-StB (2006). Eine vollständig automatisierte Registrierung und Auswertung von Rissen ist derzeit in Erprobung 						
• Die Ermittlung der Zustandsgrößen der Substanzmerkmale (Asphalt) mit Hilfe eines Flächenrasters, das den Fahrstreifen in Querrichtung in drei gleich breite Teilstreifen und in Längsrichtung in Teilabschnitte mit einer Länge von 1 m aufteilt. Die von dem entsprechendem Schaden betroffenen Rastfelder werden auf- summiert und durch die Gesamtanzahl der Rasterfelder im Auswerteabschnitt dividiert. Bei Flickstellen ist durch einen Flächenausgleich dafür zu sorgen, dass die berücksichtigen Rasterfelder der tatsächlich betroffenen Fläche entsprechen, während bei der ZG RISS jedes betroffenes Rasterelement berücksichtigt wird						

Tabelle 2: Erfasste Schadensmerkmale im Rahmen der Zustandserfassung des Straßenoberbaus in Deutschland²⁰

Aufgrund der problematischen Abgrenzung zwischen Netzrissen, Risshäufungen und Einzelrissen werden diese unter dem Merkmal RISS zusammengefasst

• Die Merkmale Ausbrüche (AUS), Offene Arbeitsnähte (ONA) und Bindemittelanreicherung (BIN) für Asphalt sowie Nester und Abplatzungen (NTR) und Flickstellen und bituminöser Teilersatz (BTR) für Beton werden nicht weiter bewertet und daher als "nicht bewertungsrelevante" Schadensmerkmale bezeichnet

• Flickstellen (FLI) setzen sich aus aufgelegten (AFLI) und eingelegten Flickstellen (EFLI) zusammen. Vollflächige Deckschichtreparaturen über die gesamte Fahrstreifenbreite mit einer Gesamtlänge von mehr als 20 m sowie konstruktiv bedingte Deckenanschlüsse gelten nicht als Flickstellen

 Die Zustandsgröße Längsebenheitswirkindex (LWI) wird bewertet, aber nicht bei der Bildung von Teil-und Gesamtwerten berücksichtigt (vgl. Tabelle 7). Die Zustandsgröße bewertetes Längsprofil (BLP) ist hier aus Vollständigkeitsgründen gegeben, ihre Erfassung und Bewertung ist noch nicht standardisiert

²⁰ Eigene Darstellung auf Basis von ZTB ZEB-StB (2006); Arbeitspapier Nr. 9/M 2 zur ZEB (2001); TP Griff-StB: SKM (2007); BECKEDAHL, H.-J. (2010) S27-69; SOCCINA, M. (2007) S33-67

2.3.3 Zustandserfassung in der Schweiz

Das Verfahren der Zustandserfassung ist in der Schweiz normativ festgelegt und wird auf National-, Kantonen- und Gemeindestraßen angewendet. Die Erfassung des Straßenoberbaus erfolgt meistens visuell, in unregelmäßigen Zeitintervallen und z.T. örtlich nach vereinfachter Methodik. Diese Aufgabe wird von den Straßenbetreibern selbst übernommen oder an Ingenieurbüros und Unternehmungen vergeben. Der Straßenzustand wird durch ein zusammengesetztes Merkmal, das alle berücksichtigten Erscheinungsformen von Schäden verknüpft, und vier weitere messtechnisch erfassbare Zustandsmerkmale charakterisiert. So werden unter dem Begriff Oberflächenschäden sowohl strukturelle Schäden (z.B. Netzrisse, Einsenkungen) als auch Schäden an der Oberfläche (z.B. Schwitzen, Ausmagerung) und Verformungen (z.B. Aufwölbungen) zusammengefasst. Ihre Erfassung erfolgt visuell mit bloßem Auge oder mit Hilfe von Foto- und Videoaufnahmen nach einem Schadenskatalog und kann bei Bedarf durch messtechnische Erfassung der Ebenheit im Quer- bzw. Längsprofil, der Griffigkeit oder der Tragfähigkeit ergänzt werden. Wegen des höheren Erhebungsaufwandes werden diese Merkmale selten bzw. unvollständig aufgenommen. Auf den Nationalstraßen (derzeit ca. 1.800 km) wurden bisher drei messtechnische Zustandserfassungen durchgeführt: ZEB-NS (1999-2002), ZEB-NS II (2004) und ZEB-NS III (2009).

Die visuelle Erfassung der Oberflächenschäden erfolgt nach Ausmaß und Schwere auf Basis eines Schadenkatalogs²¹, der 22 Schadenstypen für Asphaltbefestigungen und 13 Schadenstypen für Betonstraßen definiert (vgl. Tabelle 3). Der Katalog enthält verbale Beschreibungen und bildliche Darstellungen jedes Schadensmerkmals sowie Hinweise zur Bestimmung des Ausmaßes und der Schwere der Schäden. Die Erfassung erfolgt in der Regel auf Abschnitten mit einer Länge von 50 m (ganze Fahrbahn) bzw. 100 m (ein Fahrstreifen). Das Schadensausmaß A bezieht sich auf Fläche, Länge oder Anzahl (z.B. Betonplatten) und wird nicht als nummerischer Wert mit einer physikalischen Einheit erfasst, sondern anhand von vier Klassen bewertet: A0 (kein Schaden), A1 (<10%), A2 (10...50%) und A3 (>50%). Die Schadensschwere ist ebenfalls qualitativ in drei Klassen: S1 (leicht) bis S3 (schwer) eingeteilt. Auf einen Abschnitt können aber verschiedene Schwerestufen desselben Schadensmerkmals jeweils mit dem entsprechenden Ausmaß vorkommen. In diesem nicht ausdrücklich definierten Fall wird vielfach ein Gesamtausmaß ermittelt und die ungünstigste Schwerestufe gewählt.

Das Produkt aus Ausmaß und Schwere (A×S) wird als Matrixwert bezeichnet und für jedes Einzelmerkmal berechnet. Mehrere Einzelmerkmale werden aus Sicht der Maßnahmenplanung zu einer Hauptgruppe zusammengefasst²² (vgl. Tabelle 3). Für die entsprechende Hauptgruppe ist die größte Matrixzahl maßgebend bzw. für die weitere Berechnung einzusetzen. Die Matrixwerte werden dann nach Hauptgruppen gewichtet und zu dem Gesamtmerkmal Oberflächenschäden aufsummiert. Dieser Gesamtwert wird nur zu Vergleichsanalysen verwendet, die Maßnahmenplanung erfolgt anhand der Matrixwerte der Hauptgruppen, jedoch nach einer Umwandlung in Noten von 0 bis 5. Auf dieser Basis soll auch eine Prognose der Schadensentwicklung erfolgen, was methodisch problematisch ist. Einerseits werden in einer Hauptgruppe linear (z.B. Längsrisse) und flächenhaft (z.B. Netzrisse) auftretende sowie örtlich begrenzte Schäden (z.B. Setzungen) zusammengefasst, die unterschiedliche Ursachen haben und auch unterschiedliche optimale Maßnahmen erfordern können. Andererseits können in zwei aufeinanderfolgenden Erfassungen verschiedene Merkmale für den Matrixwert der Hauptgruppe maßgebend sein, was die Einwirkung von historischen Entwicklungen in der Prognose verzerrt. Darüber hinaus ist jede Multiplikation von Schwere und Ausmaß mit dem Verlust der Information dieser Indikatoren verbunden. Die Ersetzung des tatsächlichen Schadensausmaßes durch Ausmaßklassen im Rahmen der Erhebung führt zu erheblichen Unschärfen. Daher findet in erster Linie eine subjektive Bewertung statt, die zwar Hinweise auf den Zustand zulässt, aber nur begrenzt für einen Maßnahmenvergleich und eine Optimierung geeignet ist.

Die bisherige Erfahrung bei der visuellen Erfassung gemäß dem Schadenskatalog zeigt, dass sich einige Schadensmerkmale optisch nur schwer voneinander unterscheiden lassen (z.B. Polieren und Abrieb, Ausmagerung und Kornausbrüche, etc.). Zudem sind einige Schäden wie Pumpen und Blow-Up bei Betondecken oberflächig nicht erkennbar.

²¹ vgl. SN 640 925b Anhang (2003); SN640 925 (2003); SN 640 926 (2005)

²² vgl. SCAZZIGA, I. (1997) S41-44

Die maßgebende Kenngröße zur Beurteilung der Längsebenheit eines Abschnitts ist gemäß SN 640 520a (1977) die Standardabweichung der Winkelwerte über eine Länge von 250 m (s_w-Wert), die in Promille angegeben wird. Im Unterschied dazu dienen die Winkelwerte (W) zur Bewertung von lokalen Unebenheiten (z.B. Schächte, Arbeitsfugen). Die Erfassung dieser Größen erfolgt messtechnisch mit speziell dazu in der Schweiz entwickelten Geräten: das Winkelmessgerät (Anhänger) und der Goniograph (Schubbetrieb). Ihre Konstruktion besteht vereinfacht aus zwei je einen Meter langen Balken, die gelenkig miteinander verbunden sind und auf drei Rollen laufen (vgl. Tabelle 4)²³. Beim Befahren der Straßenoberfläche wird der Winkel (Richtungsänderung) zwischen den beiden Balken gemessen. Die Überlegung über die Standardauswertelänge von 250 m basiert auf statistische Überlegungen bezüglich der Repräsentativität der Standardabweichung. Bei hoher Messgeschwindigkeit kann es insbesondere auf unebenen Straßen zur Erschütterung des Geräts und Verzerrung der Messwerte kommen. Heute sind Hochleistungsmesssysteme wie z.B. ARAN vorhanden, die die Ermittlung der normativen Kenngrößen auch bei höherer Geschwindigkeit ermöglichen. In der Praxis wurde festgestellt, dass die Standardabweichung der Winkelwerte vor allem in Bezug auf Fahrkomfort eine limitierte Aussagekraft besitzt²⁴. Zukünftig sollen andere Verfahren zur Erfassung der Längsebenheit in der revidierten Norm berücksichtigt werden.

Die Erfassung der Querebenheit erfolgt mit dem schnellfahrenden Fahrzeug ARAN (Automatic Road Analyser) und einem Laserscannersystem am Heck des Messfahrzeugs²⁵. Das System misst das Querprofil der Straße über eine Breite von vier Metern und erzeugt dabei 1.280 Messpunkte, was eine Messgenauigkeit von 1 mm garantiert. Bei 100 km/h werden Querprofile in einem Abstand von 5 m aufgenommen. Die Spurrinnentiefe wird nach dem 4 m-Lattenprinzip mittels eines künstlichen Horizonts ermittelt. Alternativ wird auch das Querprofilmessgerät (QPM) verwendet, das mit einem Querbalken mit Ultraschallsensoren ausgerüstet ist.

Für die Erfassung der Griffigkeit werden in der Schweiz gemäß SN 640 510b (1985) Geräte mit blockiertem Messrad (100% Schlupf) verwendet. Nach Literaturangaben²⁶ sind in der Schweiz zwei Messgeräte Skiddometer BV 8 und ein SRM (Stuttgarter Reibungsmesser) im Einsatz. Diese Systeme arbeiten grundsätzlich nach dem gleichen Prinzip²⁷. Der in Schweden entwickelte Skiddometer ist ein einachsiger Anhänger mit zwei seitlich angeordneten Laufrädern und einem innenstehenden Messrad (vgl. Tabelle 4). Alternativ ist auch Messung mit konstantem Schlupf (14%) möglich. Um die Reibungskraft in der Radspur zu erfassen, soll versetzt gefahren werden, was aufgrund von kleinen Kurvenradien und beengten Verhältnissen nicht immer möglich ist. Der SRM besteht aus einem Lkw mit Wassertank und kann gleichzeitig die rechte und linke Radspur messen. Dieses Verfahren wurde ursprünglich als standardmäßig in Österreich und Deutschland angewandt, aber dann von RoadSTAR bzw. SKM abgelöst. Der Bremsvorgang erfolgt diskontinuierlich, indem das Messrad über eine Messlänge von 20 m blockiert wird und dann 5 m frei läuft (0% Schlupf). Daher ist eine lückenlose Aufnahme der Reibungsbeiwerte wie bei Systemen mit konstantem Schlupf nicht möglich. Aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Fahrzeugen mit ABS-Bremssystemen und der geringeren Messleistung hat die Erfassung mit blockiertem Rad an Bedeutung verloren.

Die Grundlagen für eine Revision des Erfassungsverfahrens sind im Rahmen eines Forschungsauftrages²⁸ mittlerweile erarbeitet worden. Die Verbesserungsvorschläge können wie folgt zusammengefasst werden: Reduktion der Schadensmerkmale auf je 8 Schadensbilder für Asphalt- und Betonbeläge, Einstufung der Schadensschwere in nur zwei Klassen: S1 (gering) und S2 (stark), Gewichtung der Schäden auf Basis von standardisierten Kosten für ihre Behebung, neue Indizes für Textur, Strukturwertverlust und Lärm. Zukünftig soll grundsätzlich visuell und nur auf schadhaften Abschnitten regelmäßig erfasst werden. Schadhafte Abschnitte werden auf Basis einer netzweiten "Nullmessung" ermittelt, die erst nach 10 Jahren zu wiederholen ist. Messtechnische Erfassungen werden nur örtlich und bei Bedarf vorgesehen.

²³ vgl. SCHMUCK, A. (1987) S40

²⁴ vgl. BRABER, R. (2008)

²⁵ vgl. JACOT, A. et al. (2012) S53-59

²⁶ vgl. JACOT, A. et al. (2007) S28 ²⁷ ugl. DO. M. T. et al. (2008) S44 4

²⁷ vgl. DO, M.-T. et al. (2008) S44,45,48,49; KLUGER-EIGL, W. (2009) S51-53,59; BÜHLMANN, F. (1983) S103-105

²⁸ vgl. BÄR, H. et al. (2014)

Tabelle 3: Erfasste Schadensmerkmale im Rahmen der Zustandserfassung des Straßenoberbaus in der Schweiz²⁹

Hauptgruppen	Einheit/	Ausmaß			Schwere			
Schadensmerkmale	Bezug	A1	A2	A3	S1	S2	S 3	
ASPHALT: Oberflächenglätte (Einzelindex I _{AI} ; GEWICHT G=2,0)								
Polieren (Gesteinskörner abgeschlif- fen, Mikrotextur z.T. verschwindet)	m/R	< 20 m	20100 m	>100 m	Vereinzelte polierte Körner	Deutlicher Anteil polierter Körner	Mehrheitlich polierte Körner	
• Schwitzen (Reine Bindemittel wird auf der Oberfläche ausgepresst)	m² /F oder m/F	< 10% o. < 20 m	1050% o. 20100 m	> 50% o. > 100 m	Sichtbare Verdunkelung	Deutliche Verdunkelung	Nasses Aussehen der Oberfläche	
ASPHALT: Belagsschäden (Einzelinde:	x I _{A2} ; GEWICH	IT G=2,0)						
Abrieb (Abnutzung in den Radspuren durch mechanische Einwirkung des Verkehrs)	m/R	< 20 m	20100 m	> 100 m	Beginn Spurrin- nenbildung durch Abrieb, T<15 mm	Gut sichtbares Größtkorn, deutliche SR	Deutliches Hervor- treten des Kornge- rüstes, T>30 mm	
 Ausmagerung, Absanden (Ablösen des bituminösen Mörtels von den Ge- steinskörnern; ganze Fahrbahnbreite) 	m²/F	< 10%	1050%	> 50%	Verlust von bituminösen Mörtel	Verlust von Belagsmaterial von oben → unten	Zerbröckelte Ober- fläche, Beginn von Schlaglochbildung	
 Kornausbrüche (Herauslösen der groben Gesteinskörner an der Ober- fläche aus dem bituminösen Mörtel) 	m²/F	< 10%	1050%	> 50%	Herauslösen von einzelnen Splittkörnern	Löcher mit großen Abständen zueinander	Viele kleine Schlaglöcher (D~D _{Größtkorn})	
• Ablösungen (Klar erkennbare Ober- fläche der darunterliegenden Schicht)	m²/R	< 10 %	1050%	> 50%	Einzelne Ablösun- gen, D<150 mm	Einz. Ablösungen, D=100300 mm	Kein Verbund, B≥300 mm	
Schlaglöcher (Folge von Netzrissen, Ausmagerung oder Kornausbrüchen)	m²/R	< 10 %	1050%	> 50%	Geringe Tiefe, D<100 mm	T<40 mm, D=100300 mm	T≥40 mm, D≥300 mm	
Offene Nähte (Beim Einbau herge- stellte Längs- und Quernähte)	m/F	< 5 m	525 m	> 25 m	Ausgemagerte Naht, kein Riss	Stellenweise offene Naht	Offene Naht, Sekundärrisse	
• Querrisse	Anzahl/F	< 2	27	> 7	B<2 mm	B=210 mm	B≥10 mm	
 Wilde Risse (⊥ und zur Straßenach- se, größere Maschenweite als NR) 	m²/F	< 10 %	1050%	> 50%	Einzelne, zufällig verteilt, B<2 mm	z.T. verbunden, B=210 mm	Belag in Schollen, B≥10 mm	
ASPHALT: Belagsverformungen (Einz	elindex I _{A3i1} ode	er I _{A3i0} ; GEWI	ICHT G=2,0)					
• Spurrinnen (Rinnenförmige Verfor- mung des Belags entlang Radspuren)	R				Erkennbar, T unter Latte <15 mm	Klar erkennbar, T=1530 mm	Ausgeprägt, evtl. Risse, T≥30 mm	
Aufwölbungen (Wulstartige Erhö- hungen entlang dem Fahrspurrand)	m/R	< 10 m	1050 m	> 50 m	Wahrnehmbare Hebung	Deutliche Hebung des Belagsrandes	Aufgequetschter Belagsrand	
 Wellblechverformungen (Kleine Wellen ⊥ zur Fahrrichtung; haupts. vor Stopsignalen/steilen Abschn.) 	m²/F	< 10 %	1050%	> 50%	Leichte Wellen, beim Befahren knapp spürbar	Deutlich sichtbar, beim Befahren störend	Starke Wellen, erzeugen Schwingungen	
 Schubverformungen (Im Bereich der Radspur; vor Stopsignalen/steilen Abschn.; Risse ⊥ zur Fahrrichtung) 	m ² /F	< 10 %	1050%	> 50%	Horizontale Ver- schiebung; keine Zugrisse; eben	Horizontale Ver- schiebung; leichte vertikale Wellen	Große horizontale Verschiebung, evtl. mit Zugrissen	
ASPHALT: Strukturelle Schäden (Einz	elindex I _{A4} ; GE	WICHT G=3	,0)					
Anrisse von Setzungen (Oft kreisbo- genförmig, innere Fläche abgesenkt)	m²/b	< 10 %	1050%	> 50%	Feiner Riss, andeutet Setzung	Deutlicher Riss Stufenbild. <5 mm	Großer Riss mit Stufenbildung	
• Setzungen, Einsenkungen (Lokale Setzungen oder Erhebungen, D<20m)	m²/R/b	< 10 %	1050%	> 50%	Sichtbar, Schwin- gungen im Fz.	Deutlich sichtbar, Fz. kontrollierbar	Erfordert Aufmerksamkeit	
 Abgedrückte Ränder (Fahrstreifen- rand durch Verkehr abgedrückt; oft sind auch Belagsrandrisse vorhanden) 	m²/b	< 10 %	1050%	> 50%	Wahrnehmbare Absenkung des Belagsrandes	Deutliche Absenkung des Belagsrandes	Abgedrückter Belagsrand mit deutlichen Rissen	
• Frosthebungen (Anhebung infolge Gefrieren des Untergrundes; Frost- eindringtiefe in der Mitte größer)	m²/F	< 10 %	1050%	> 50%	Leichte Hebung in der Fahrbahnmitte ohne Längsriss	Deutliche Hebung, stellenweise LR B<10 mm	Große Hebung, mehrfachen LR B≥10 mm	
• Längsrisse (Meist in Straßenmitte o. in Fahrstreifenmitte; mit Zacken)	m/F	< 5 m	525 m	> 25 m	Einfacher Riss, B<2 mm	Evtl. mit Rissen, B=210 mm	Mehrfache ∥ Risse, B≥10 mm	
• Netzrisse (Risse zerteilen den Belag in mosaikartigen Blöcken)	m²/R/F	< 10 %	1050%	> 50%	Schmale NR, Mul- dentiefe <15 mm	Ausgebildete NR, T=1525 mm	Blöcke z.T. zer- brochen T≥25 mm	
Belagsrandrisse (Risse entlang den Belagsrändern, die sich Richtung Fahrbahnmitte fortpflanzen)	m/a	< 10 m	1050 m	> 50 m	Kleinere Längs- risse i. von 300 mm des Randes	Mehrfache Risse über 1 m vom Belagsrand	Mehrfache Risse über 1 m vom Rand, vernetzt	
ASPHALT: Flicke (Einzelindex I _{A5} ; GE	WICHT G=1,0)	•		•	•		
• Flicke (Erstellt nach Arbeiten an Leitungen; Risse am Randbereich)	m²/F	< 10 %	1050%	> 50%	Intakte Flicke	Schlechter Ver- bund, Unebenheit	Schlechter Ver- bund, Setzungen	

²⁹ Eigene Darstellung auf Basis von SN640 925 (2003); SN 640 925b Anhang (2003); SN 640 926 (2005)

BETON: Oberflächenglätte (Einzelindex I _{B1} ; GEWICHT G=1,0)									
Polie fen, N	ren (Gesteinskörner abgeschlif- Aikrotextur z.T. verschwindet)	m/R	< 20 m	20100 m	> 1	100 m	Vereinzelte polierte Körner	Deutlicher Anteil polierter Körner	Mehrheitlich polierte Körner
BETON	: Materialverluste (Einzelindex	I _{B2} ; GEWI0	CHT G=2,0)						
 Abrie durch 	b (Abnutzung in den Radspuren mechanische Einwirkung)	m/R	< 20 m	20100 m	> 1	100 m	Beginn Spurrinnenbildung	Gut sichtbare Größtkörner, SR	Hervortreten des Korngerüstes
• Abbla gern (15 m	itterung (Abblättern o. Ausma- les Belags in den obersten 3 bis m; über die ganze Belagsbreite)	m²/F	< 10%	1050%	>	50%	Einzelne fehlende Körner; mageres Aussehen	Verlust von Belagsmaterial von oben → unten	Zerbröckelte Ober- fläche, Beginn von Schlaglochbildung
 Abpla Löch 	atzungen (Schalenförmige er im Belag)	Anzahl/F	< 5	515	>	> 15	Kleinere Abplatzungen	D<100 mm, T<50 mm	D≥100 mm, T≥50 mm
BETON	: Fugen- oder Kantenschäden (Einzelindex	I _{B3} ; GEWICHT (G=1,0)					
 Kantenschäden, Absplitterung (Brüche entlang Plattenränder; paral- lele Risse bis 300 mm von der Fuge) 		Anzahl/F	< 3	310	>	> 10	Feine Risse, kleine Stücke sind abge- brochen o. fehlen	Risse mit Brüchen, z.T. fehlen kleine Stücke	Risse mit Brüchen, es fehlen größere Stücke
• Fehle (bei H	nder o. spröder Fugenverguß Fugen/Rissen mit Verfüllungen)	Anzahl/F	< 3	310	>	> 10	Verguss punktuell lösgelöst	Verguss auf kleine Distanzen los	Verguss losgelöst, spröde
BETON	: Vertikalverschiebung (Einzeli	ndex I _{B4} ; Gl	EWICHT G=3,0)						
• Setzu	ngen, Frosthebungen († Abwei-	m²/F	< 10%	1050%	>	50%	Sichtbar, Schwin-	Deutlich sichtbar,	Erfordert
 Stufe 	g vom ursprünglichen Profil) nbildung (Unterschiedliches	m²/F	< 10%	1050%	>	50%	gungen im Fz. Stufe <5 mm	Fz. kontrollierbar Stufe 515 mm	Aufmerksamkeit Stufe >15 mm
 Pump terial 	u zweier Platten bei den Fugen) en (Durch Verkehr \rightarrow Feinma- gepumpt: Platten liegen hohl)	_	-	_		_	Kein Materialverlust	Wenig aus- gepumtes Feinmat.	Viel ausgepumptes Feinmaterial
 Blow und n 	-up (Betonbelag ist abgebrochen ach oben ausgeknickt; \uparrow T° C)	-	-	-		-	-	-	Jeder Schaden gilt als schwer
BETON	: Risse, Brüche (Einzelindex I _B	;; GEWICH	Г G=2,0)						
Risse	(Gerade oder serpentinenartig)	m/F	< 5 m	5 25 m	>	25 m	Schwindrisse	B=1 2 mm	B>2 mm
 Zerstals zv 	örte Platten (Zerteilung in mehr vei vollst. abgetrennten Stücke)	Anzahl/F	< 3	36		> 6	3 Stücke, leichte Unebenheit	≥ 3 Stücke, mitt- lere Unebenheit	> 3 Stücke, bis starke Unebenheit
BETON	: Flicke (Einzelindex I _{B6} ; GEW	ICHT G=1,())		1				I
Flick von S	e (Grabarbeiten o. Ausbesserung chlaglöchern; Setzungen; Risse)	m²/F	< 10%	1050%	>	50%	Intakte Flicke	Kein Verbund, Unebenheit	Kein Verbund, größere Unebenh.
ASPHA	LT/BETON: Ebenheit in Längs	richtung (Z	ustandsindex I ₂)						
• Stand	ardabweichung sw [‰] des Wink	elwerts W ül	oer 250 m, z.B. mi	t Winkelmess	gerät lt.	. SN 640	520a (1977); Alterna	tiv: Goniograph, Ara	n, APL-Gerät
ASPHA	LT/BETON: Ebenheit in Querr	richtung (Zu	standsindex I ₃)	20- (1077) 41		0			
• Spuri	mentiere I [mm] unter 4 m-Latt	e, z.B. mit A	KAN II. SN 640 5.	20a (1977) Al	ternativ	v: Querpi	rommessgerat (QPM))	
• Reibu	ngskoeffizient u [-] der nassen St	raßenoberflä	che mit blockierte	n Messrad, z.l	B. mit S	Skiddom	eter lt. SN 640 510b ((1985): Alternativ: SR	M. SCRIM
ASPHA	LT/BETON: Traefähiekeit (Zn	standsindex	I-)	,				(· · ·))	,
Defle Defle	ktionsmessung mit Benkelman-B ctograph	alken lt. SN	570 362a (1991); N	Maßgebende I	Deflexio	on [mm/]	100] lt. SN 640 733b	(1997); Alternativ: FV	WD, Lacroix-
Legende	:	ANMERK	UNGEN:						
P	Abkürzung Padepur	• Die Zust	andserfassung des	Straßenoberb	aus in o	der Schw	veiz erfolgt visuell, ev	vtl. mit Videoaufnahm	ne für die Merkmale
F	Abkürzung Fahrbahn	der Ober	flächenschäden un	d messtechnis	sch für	Längseb	enheit, Spurrinnen, C	Friffigkeit und Tragfäl	higkeit
<i>b</i>	Abkürzung Fahrbahnrand	 Die verse 925b An 	hang) nach Ausma	Bund Schwei	samme e in Al	engerasst bhängigk	eit von der Belagsart	(Asphalt/Beton) erfa	skatalog (SIN 640 sst
<i>a</i>	Abkürzung Fahrstreifenrand	• Die Ang	aben bezüglich des	s Schadensaus	maßes	in der Ta	abelle gelten für einer	n Fahrstreifen einer A	utobahn von 100 m
<i>B</i>	Abkürzung Breite [mm]	Länge bz	w. für einen 50 m	langen Fahrb	ahnabs	chnitt mi	it zwei Fahrstreifen a	uf den übrigen Straße	n
D T	Abkürzung Durchmesser [mm]; [m] Abkürzung Tiefe [mm]	 Bei Detailaufnahmen ist pro Hauptgruppe (Schadensgruppe) die größte Matrixzahl A×S (Ausmaß×Schwere) maß- gebend. Diese Matrixzahl wird mit einem Gewichtungsfaktor G_i multipliziert. Aus der gewichteten Matrixwerten der Hauptgruppen (ΣM×G_i) werden weiter die Indizes L und L der Oberflächenschäden gebildet 							
Image: Abkurzung Tiete [mm] Image: Abkurzung Tiete [mm] Fz Abkürzung Fahrzeug • Die detaillierte Bewertung des S		des Straßenzu	stande	s sowie	Wahl der optimalen E	Erhaltungsmaßnahme	und die Ableitung		
<i>SR</i> Abkürzung Spurrinnen von Zustandsfunktionen erfolgt auf Basis von Einzelindizes (I_{Ai}/I_{Bi}) gemäß SN 640 926 (2005)									
NR	Abkürzung Netzrisse	Schadensa	usmaß A:			Schaden	schwere S:	Matrixwerte M	:
<i>LR</i>	Abkürzung Längsrisse	Klasse S	Schadensausmaß A	A Antei	1	Klasse	Schadensschwere S	$M_i = A_i S_i$	Ausmaß
<i>М</i>	Abkürzung Matrixwert	A1 1	Kaum auftretend	< 10%	6	S1	Schaden leicht		1 2 3
S	Abkürzung Schadenschwere	A2 5	Stellenweise auftre	end 50°)% 6	S2 S3	Schaden mittel	S2 0	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
41	rickurzung Schauensausmaß			/ / / / /	-		series series	-1 55 0	

2.3.4 Vergleich und zusammenfassende Beurteilung

Die systematische Zustandserfassung des Straßenoberbaus in regelmäßigen Zeitintervallen bildet die Grundlage jedes Erhaltungsmanagementsystems. Die Zustandserfassungsverfahren aus Österreich, Deutschland und der Schweiz unterscheiden sich in der Art und der Anzahl der aufgenommenen Schadensmerkmale, in den dafür eingesetzten Messsystemen sowie in den Methoden zur Abschnittsbildung und Datenaggregation teilweise erheblich. Ein Überblick der verwendeten Standardmesssysteme wird in Tabelle 4 und Tabelle 5 gegeben. Da die Unterschiede sowohl Geräte und Messgenauigkeit, als auch Messprinzipien umfassen, ist ein Vergleich der erfassten Größen nur über Messungen und Umrechnung möglich.

Ein Nachteil der bestehenden Verfahren zur Erfassung und Zustandsgrößenermittlung besteht darin, dass über die Zusammenfassung von Schäden mit verschiedenen Ursachen, sowie Gewichtung, Multiplikation mit Einflussbreiten für Einzelrisse und Zählen von betroffenen Rasterfeldern nur eine subjektive quantitative Bewertung erfolgen kann (Abbildung 3). Diese Methodik erschwert erheblich die Optimierung von Maßnahmen sowie die Berechnung des tatsächlichen Handlungsbedarfes.

Alternativ zu den bestehenden Ansätzen wird eine durchgängige Zustandserfassung nach Ausmaß und Schwere von HOFFMANN vorgeschlagen³⁰. Über das Schadensausmaß (z.B. Risslänge) kann der Umfang der Erhaltungsmaßnahme ermittelt werden. In Abhängigkeit von der Schadensschwere (z.B. Rissbreite) sind verschiedene Maßnahmen anwendbar. So ist für Einzelrisse mit einer Breite von 1 bis 5 mm das Fräs- und Gießverfahren bzw. für Rissbreiten von 5 bis 10 mm das Heiß-Pressluftverfahren optimal. Das Problem der Datenaggregation bzw. der Zusammenfassung von Erfassungsabschnitten zu längeren homogenen Abschnitten wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. Grundsätzlich führt jede Homogenisierung oder Mittelwertbildung zu Informationsverlust über lokal problematische Schäden (z.B. mangelhafte Griffigkeit). Daher ist es besser, die Abschnitte in Bezug auf eine sinnvolle Bauloslänge erst bei der Maßnahmenoptimierung auf Basis des Vergleichs der jährlich anteiligen Kosten zu längeren Abschnitten zusammenzufassen³¹.

Bsp. : Ermittlung von Zustandsgrößen anhand von erfassten Rissschäden (AT, DE und CH)

Nach der Zustandserfassung des 1. Fahrstreifens einer Autobahn in Asphaltbauweise ist das Schadensbild der Risse (siehe unten) bekannt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird eine Abschnittslänge von 50 m gewählt (Standard DE & CH = 100 m). Das Schadensbild ist nach den Verfahren der Länder zu bewerten.

Auswertung lt. RVS 13.01.16 (2013) - Österreich



Kommentar:

 Einzelrisse mit Einflussbreite 0,5 m und Gewichtung sowie Netzrisse werden zu einem Merkmal Risse zusammengefasst





 $\frac{155}{50*3}$ (Felder im Abschnitt)

Kommentar:

Einzelrisse und Netzrisse verschiedener Schwere sowie vergossene Risse werden zu einem Merkmal zusammengefasst

Ermittlung erfolgt binär: Rasterfeld betroffen Ja/Nein \rightarrow keine quantitative Aufnahme Risslänge/-breite/-fläche

Auswertung lt. SN 640 925b (2003) - Schweiz



Netzrisse : $A = 67(5.50) = 4\% \rightarrow A1$; M = A.S = 1.2 = 2Längsrisse : $A = 16/50 = 32\% \rightarrow A2$; M = A.S = 2.3 = 6Querrisse : A = 2 Anz. $\rightarrow A2$; M = A.S = 2.2 = 4Kommentar:

Abbildung 3: Zustandsgrößenermittlung auf Basis von einem erfassten Rissbild (AT, DE und CH)

³⁰ vgl. HOFFMANN, M. (2013a); HOFFMANN, M. (2014)

³¹ vgl. HOFFMANN, M. (2013 c); HOFFMANN, M. (2014)

	Messsystem	Messbedingungen	Messgröße	Messprinzip
Netzweite Zustandserfassung der Griffigkeit	1. RoadSTAR (AT)	Prinzip: gerade geführtes Messrad und konstantem Schlupf, 18% Messgeschwindig.: 60 km/h Messreifen: PIARC, gerillt Reifeninnendruck: 2.0 bar Statische Radlast: 3.500 N Wasserfilmdicke: 0,5 mm Lage: rechte Radspur	Bezeichnung: <i>Längsreibungsbeiwert</i> μ_{R55} [-] Einzelwerterfassung: 0,15 m Mittelungslänge: 5 m Auswertelänge: 50 m Messwert entspricht näherungsweise dem Höchstwert des Reibungs- koeffizienten bei nasser Fahrbahn	Längsreibungsbeiwert ω Radwinkelgeschwindigkeit [rad.s ⁻¹] V Messgeschwindigkeit [km/h] F_x Bremskraft [kN] F_z Radlast [kN] 18% Schlupf (const) Schlupf = $\frac{\omega r - V}{V}$ $\mu_{RS} = \frac{F_x}{F_z}$ F_z
	2. SKM bzw. SCRIM (DE)	Prinzip: schräggestelltes Messrad, 20° = ca. 34 % Schlupf Messgeschwind.: 40, 60, 80 km/h Messreifen: SKM, profillos Reifeninnendruck: 3.5 bar Statische Radlast: 1.960 N Wasserfilmdicke: 0,5 mm Lage: rechte Radspur	Bezeichnung: <i>Seitenreibungsbeiwert</i> μ _{SCRIM} [-] Erfassung: kontinuierlich Einzelwerterfassung: 1 m Auswertelänge: 100 m Simulation von Konfliktsituationen (Kurvenfahrt und Schleudern) mit erhöhten Griffigkeitsbedarf	Seitenreibungsbeiwert V Messgeschw. [km/h] F_{Y} Seitenkraft [kN] F_{Z} Radlast [kN] α Schräglaufwinkel [°] 34% Seitenschlupf Schlupf = 100.sin α $\mu_{SCRM} = \frac{F_Y}{F_Z}$ F_Z
	3. SRM (CH, früher AT, DE)	Prinzip: gerade geführten blo- ckiertes Messrad (100% Schlupf) Messgeschwind.: 40, 60, 80 km/h Messreifen: PIARC, gerillt Reifeninnendruck: 1.5 bar Statische Radlast: 3.500 N Wasserfilmdicke: 0,5/1,0 mm Lage: rechte & linke Radspur	Bezeichnung: <i>Gleitreibungsbeiwert</i> μ _{SRM} , [-] Erfassung: diskontinuierlich Auswertelänge: 50 m Auswertung: computergestützt Simulation einer Vollbremsung bei nasser Fahrbahn mit blockiertem Rad ("Worst-Case-Scenario")	Gleitreibungsbeiwert ω Radwinkelgeschwindigkeit [rad.s ⁻¹] V Messgeschwindigkeit [km/h] F_x Bremskraft [kN] F_z Radlast [kN] 100% Bremsschlupf Schlupf = 1 $\mu_{SEM} = \frac{F_x}{F_z}$ F_z
	4. Skiddometer BV 8 (CH)	Prinzip: gerade geführten blo- ckiertes Messrad (100% Schlupf) Messgeschwind.: 40, 60, 80 km/h Messreifen: PIARC, gerillt Reifeninnendruck: 1.5 bar Statische Radlast: 3.500 N Wasserfilmdicke: 0,5 mm Lage: rechte/linke Radspur/Mitte	Bezeichnung: <i>Gleitreibungsbeiwert µ_{Skiddo}</i> , [-] Erfassung: diskontinuierlich Auswertelänge: 50 m Auswertung: manuell, graphisch Simulation einer Vollbremsung bei nasser Fahrbahn mit blockiertem Rad ("Worst-Case-Scenario")	Gleitreibungsbeiwert ω Radwinkelgeschwindigkeit [rad.s ⁻¹] V Messgeschwindigkeit [km/h] F_x Bremskraft [kN] F_z Radlast [kN] 100% Bremsschlupf Schlupf = 1 $\mu_{Stateb} = \frac{F_x}{F_z}$
ängsebenheit	1. RoadSTAR (AT)	Prinzip: <i>Mehrfachabtastung</i> <i>mittels Laser</i> (<i>"Wahres Profil"</i>) Messgeschwind.: 60 km/h Anzahl Lasersensoren: 4 (längs) → 0,0/0,1/1,0 und 4,0 m Messbalkenlänge: 2,0 m Wellenlängen: 0,5 m bis 50,0 m Messung: rechte Radspur	Bezeichnung: <i>International</i> <i>Roughness Index IRI</i> , [m/km] Mittelungslänge: 0,05 m Auswertelänge: 50 m Auswirkungen des erfassten Wellenspektrums der Straßeno- berfläche bei Überfahrt eines vereinfachten Standardfahrzeuges	International Roughness Index Ungefederte Masse x Gefederte Masse $RI = \frac{1}{L} \int_{0}^{LV} z_s - z_v dt$ Fahrzeugersatzsystem
Netzweite Zustandserfassung der Lä	2. EFA, BASt (DE)	Prinzip: Mehrfachabtastung mittels Laser ("Wahres Profil") Messgeschwind.: 0100 km/h Anzahl Lasersensoren: 5 (längs) \rightarrow 0,0/0,1/1,0/2,0 und 4,0 m Messbalkenlänge: 4,0 m Wellenlängen: 0,2 m bis > 200 m Messung: rechte Radspur	Bezeichnung: Allgemeines Unebenheitsmaß AUN, [cm ³] Charakterisierung von regellosen Unebenheitsformen (Geometrie) Bezeichnung: Längsebenheitswir- kindex LWI, [-] Auswirk. von Einzelhindernissen & periodischen Unebenheitsformen	Allgemeines Unebenheitsmaß Ausgleichsgerade wWelligkeit $\Phi_{n}(\Omega_{0})$ $Ausgleichsgerade wWelligkeit \Phi_{n}(\Omega_{0})Ausgleichsgerade wWelligkeit \Phi_{n}(\Omega_{0})Ausgleichsgerade wWelligkeit \Phi_{n}(\Omega_{0})Ausgleichsgerade \Delta_{n}(\Omega_{0})Ausgleichsgerade \Delta_{n}(\Omega_{0})Ausgleichsgerade \Delta_{n}(\Omega_{0})Ausgleichsgerade \Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{0})\Delta_{n}(\Omega_{$
	3. Winkelmessgerät, ETH (CH)	Prinzip: Aufnahme von Neigungs- änderungen (Geometrie) Messgeschwind.: 1025 km/h Aufbau: 3 Laufräder; 2 gelenkig verbundenen Balken; induktiver Wegaufnehmer Wellenlängen: 0,3 m bis ca. 6,0 m Messung: rechte/linke Radspur	Bezeichnung: <i>Winkelwert W</i> , [%] Einzelwerterfassung: 0,25 m Beurteil. von lokalen Unebenheiten Bezeichnung: <i>Standardabwei- chung der Winkelwerte s</i> _w , [%] Auswertelänge: 250 m (s _W) Gesamtbeurteilung des Abschnitts	Winkelwert Wahres Profil Balken 0 1 m 1 m

Tabelle 4: Standardmessverfahren und -geräte zur Erfassung der Griffigkeit & Längsebenheit in AT, DE und CH³²

³² Eigene Darstellung u.a. auf Basis von der Angaben von arsenal research, BASt, ETH, SACR AG etc. sowie unter Verwendung von JACOT, A. et al. (2007); JACOT, A. et al. (2012); KLUGER-EIGL, W. (2009); DO, M.-T. et al. (2008); RVS; SN

Messsystem		Messbedingungen	Messgröße	Messprinzip
Netzweite Zustandserfassung der Querebenheit	1. RoadSTAR (AT)	Prinzip: <i>Berührungslose</i> <i>Abtastung durch Lasersensoren</i> Messgeschwind.: 60 km/h Anzahl Lasersensoren: 23 (quer) Anzahl Messpunkte: 23 Messpunktabstand: 15 cm (quer) Querbalkenlänge: 2,5 m Erfassungsbreite: 3,3 m	Bezeichnung: <i>Spurrinnentiefe S</i> , [mm] Mittelungslänge: 1 m Auswertelänge: 25 m Bezeichnung: <i>Theoretische Wassertiefe W</i> , [mm] Mittelungslänge: 1 m Auswertelänge: 50 m (25 m)	Querebenheitsparameter $Simulicrice "Straightedge" 2m_Latte - Methode W_L 2m W_R 2m W_R max(S_g; S_L) max(S_g; S_L) Messpunkte max(W_g; W_L) im Querprofil $
	2. EFA, BASt (DE)	Prinzip: Berührungslose Abtastung durch Lasersensoren Messgeschwind.: 0100 km/h Anzahl Lasersensoren: 41 Anzahl Messpunkte: 41 Messpunktabstand: 10 cm (quer) Querbalkenlänge: - Erfassungsbreite: 4,0 m	Bezeichnung: Spurrinnentiefe SPT, [mm] Mittelungslänge: 10 m Auswertelänge: 100 m Bezeichnung: Theoretische Wassertiefe SPH, [mm] Mittelungslänge: 10 m Auswertelänge: 100 m	Querebenheitsparameter Simulierte 2m-Latte SPHL 3 SPHL 3 SPHL 3 SPHR SPHR SPHR SPTR max (SPHR; SPHL) max (SPHR; SPHL)
	3. ARAN (CH)	Prinzip: <i>Berührungslose</i> <i>Abtastung durch Laserscanner</i> Messgeschwind.: 0100 km/h Anzahl Lasercanner: 2 Anzahl Messpunkte: 1.280 Messpunktabstand: - Querbalkenlänge: - Erfassungsbreite: 4,0 m	Bezeichnung: <i>Spurrinnentiefe T</i> , [mm] Einzelwerterfassung: 5 m Auswertelänge: 50 oder 100 m Bezeichnung: <i>Theoretische</i> <i>Wassertiefe t</i> , [mm] Einzelwerterfassung: 5 m Auswertelänge: 50 oder 100 m	Querebenheitsparameter "Wire"- Methode Simuliore 4 m-Latte t t T Erfasster Querprofil
Erfassung der Tragfähigkeit auf Projektebene (AT, DE und CH)	1. Benkelman-Balken	Prinzip: Zerstörungsfreies, statisches Messverfahren Messgeschwindig.: $0 \rightarrow 5$ km/h Messpunktabstand: 25100 m Radlast: 4560 kN (50 kN) Aufzeichnung: ein Messwert im Lastzentrum \rightarrow Einzelwertmessung Lage: rechte oder linke Radspur	Bezeichnung: <i>Maßgebende</i> <i>Deflexion dv</i> , [1/100 mm] (CH) $dv = c.(\overline{d} + 2.\sigma)$, wobei \overline{d}, σ Mittlere Deflektion und Stan - dardabweichung einer homogenen Zone mitVariationskoeff. < 0,35 cKorrekturkoeffizient gemäß SN 640 733b (1998)	Versuchsablauf Messstelle belastet $d = 2.(A - A_2)$ $d/2$ A Radlast $d/2$ A Radlast $d/2$ A Messtelle $d/2$ A Messtelle $d/2$ A Messtelle $d/2$ A Messtelle
	2. Lacroix-Deflectograph	Prinzip: Zerstörungsfreies, quasistatisches Messverfahren Messgeschwind.: ca. 3 km/h Messpunktabstand: ca. 6 m Radlast: 4560 kN (50 kN) Aufzeichnung: jeweils 65 Werte über 130 cm → Muldenmessung Lage: rechte und linke Radspur	Bezeichnung: <i>Maßgebende</i> <i>Deflexion dv</i> , [1/100 mm] (CH) $dv = c.(\overline{d} + 2.\sigma)$, wobei \overline{d}, σ Mittlere Deflektion und Stan - dardabweichung einer homogenen Zone mitVariationskoeff. < 0,35 cKorrekturkoeffizient gemäß SN 640 733b (1998)	Versuchsablauf Zwillingsreifen 30 cm V V Position Ende Position Beginn der Messung der Messung
	3. Falling Weight Deflectometer	Prinzip: Zerstörungsfreies, dynamisches Messverfahren Messgeschwind.: stationär, ca. 1 min bis 2 min je Messpunkt Messpunktabstand: 25100 m Belastung: 70120 kN (50 kN) Anzahl Geofonen: 7 bis 9 Letzter Geofon: 2.400 mm (max)	Bezeichnung: <i>Tragfähigkeitszahl</i> <i>Tz</i> , [-] Tragfähigkeit der gesamten Stra- ßenbefestigung Bezeichnung: <i>Untergrundsindika- tor UI</i> , [µm] Tragfähigkeit des Untergrundes bzw. des Unterbaues	Deflexionsmulde $R0$ Krümmungsradius [m] $UI = D4 - D6$ $Tz = (R0 / D0)^{0.5}$ Gummipuffer Geofon Lastplatte Deflexion D0 D0 D1 D0 D1 D0 D1 D2 D3 D44
Schichtdicken	1. Georadar	Prinzip: Ausbreitung elektromagnetischer Wellen Messgeschwind.: bis 80 km/h Antennentyp: Hornantenne (frei schwebend) o. Antenne mit Ober- flächenkontakt (per Hand geführt) Messfrequenz: je nach Untersu- chungsziel von 0,4 bis 2,0 GHz	Einsatz auf Projektebene : Schadensanalyse (z. B. Art und tiefe des Schadens, unsichtbare Schäden) Qualitätskontrolle Einsatz auf Netzebene : Aufnahme von Schichtdicken zur Klassifizierung von Teilnetzen oder Einteilung in homogene Abschnitte	Schichtaufbau Georadar- antenne Oberfläche Schichtgrenze 1 Schichtgrenze 3 Schichtgrenze 4

Tabelle 5: Standardmessverfahren und -geräte zur Erfassung der Tragfähigkeit & Querebenheit in AT, DE und CH³³

³³ Eigene Darstellung u.a. auf Basis von der Angaben von arsenal research, BASt, Infralab SA, Dynatest, Uni Wuppertal (BUW), SACR AG etc. sowie unter Verwendung von CHAKAR, T. (2010); GOLKOWSKI, G. (2003); RVS; SN; ZTV-ZEB

2.4 Zustandsbewertungsansätze

Die erfassten Zustandsdaten und die daraus abgeleiteten Zustandsgrößen sollen möglichst objektiv die Eigenschaften des Straßenoberbaus zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben. Sie geben aber noch nicht Auskunft darüber, ob der erfasste Zustand als gut oder schlecht bezeichnet werden kann und ob bereits Erhaltungsmaßnahmen erforderlich sind. Die Aufgabe der Zustandsbewertung ist auf Basis von bestimmten Vorschriften (Bewertungshintergründe) ein Werturteil für den Straßenzustand zu fällen. Da es dabei um ein Urteil handelt, ist der Bewertungsprozess mehr oder weniger subjektiv. Die gängigen Verfahren zur Bewertung des Straßenoberbaus sind an den Prinzipien der Nutzwertanalyse orientiert und erfolgen im deutschsprachigen Raum nach demselben Schema in den zwei Teilschritten³⁴:

- Normierung: Umwandlung der Zustandsgrößen in dimensionslose Werte (Zustandswerte oder Zustandsindizes) durch die Anwendung einer Bewertungsfunktion
- Wertsynthese: Zusammenfassung der normierten Zustandsgrößen über Gewichtungs- und Verknüpfungsvorschriften zu Teilwerten (Substanz- und Gebrauchswert) und zu einem Gesamtwert

Die Bewertungsfunktion (auch: Normierungsfunktion oder Transformationsfunktion) ist meistens eine lineare Funktion, die jedem Wert der Zustandsgröße (in der Regel mit einer Dimension, z.B. mm, m², etc.) einen dimensionslosen Index ordnet. Der Verlauf der Normierungsfunktionen wird durch bestimmte Stützpunkte beeinflusst. Solche Punkte entsprechen z.B. dem geforderten Qualitätsniveau (Level of Service) oder basieren auf verkehrssicherungstechnischen Überlegungen. Folglich sind die Normierungsfunktionen für verschiedene Straßentypen nach der Funktion festgelegt, da die Anforderungen an eine untergeordnete Straße wesentlich niedriger sind. Die dimensionslosen Indizes basieren in vielen europäischen Ländern auf einem Schulnotensystem mit fünf Noten von 1 (sehr gutem Zustand) bis 5 (sehr schlechten Zustand), der auch fünf Zustandsklassen entsprechen. So wird einerseits mit der Normierung die stetige Verteilung der Zustandsgröße in definierte Zustandsklassen diskretisiert. Andererseits ist mit der Transformation der Zustandsgrößen über eine einheitliche Skala auch ein relativer Vergleich des Zustands eines Abschnitts in Bezug auf verschiedene Schadensmerkmale (z.B. Spurrinnen und Rissen) möglich. Die Normierung erlaubt auch die nachfolgende Zusammenfassung der Zustandswerte zu Teilwerten.

Der zweite Teilschritt der Bewertung, die Wertsynthese, besteht darin, mehrere normierte Zustandsgrößen (Zustandswerte) zu gewichten und anschließend zu Teilwerten und zu einem Gesamtwert zu verknüpfen. Im deutschsprachigen Raum werden derzeit zwei Teilwerte ermittelt:

- **Gebrauchswert:** Teilwert zur Beurteilung der Befahrbarkeit, des Fahrkomforts und der Verkehrssicherheit (Belange des Straßennutzers)
- **Substanzwert:** Teilwert zur Beurteilung der strukturellen Beschaffenheit des Straßenoberbaus (Belange des Straßenerhalters)

Zunächst wird geprüft, welche Zustandsmerkmale überhaupt einen Einfluss auf den jeweiligen Teilwert haben. Die Größe dieses Einflusses wird durch einen Gewichtungsfaktor berücksichtigt. Die beiden Teilwerte werden dann zu einem Gesamtwert zusammengefasst, der die Grundlage für die Maßnahmenoptimierung in den bestehenden Systemen bildet. Das Verfahren der Maßnahmenoptimierung hat als Ziel, einen möglichst guten Straßenzustand unter Budgetvorgaben zu erreichen. Ein Optimierungsalgorithmus, der auf Teil- oder Gesamtwerten aufgebaut ist, bereitet aber viele methodische Problemen, die in diesem Kapitel kurz diskutiert werden. Daher beschränkt sich die Rolle der Bewertung primär auf eine Visualisierung des Zustandes, die den Entscheidungsträgern einen Überblick über den Zustand des Netzes gibt und die Identifikation von Problemstellen mit erhöhtem Erhaltungsbedarf erleichtert.

Im Folgenden werden die Zustandsbewertungsansätze aus Österreich, Deutschland und in der Schweiz kurz beschreiben. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Herkunft der entsprechenden Normierungsfunktionen bzw. Bewertungshintergründe gelegt, da diese direkt die erwartete Lebensdauer und somit den Erhaltungsbedarf in den bestehenden Systemen beeinflussen (vgl. Kap. 2.4.5).

³⁴ vgl. SCHMUCK, A. (1987) S93-121; WENINGER-VYCUDIL, A. et al.(2009) S48-61; SCAZZIGA, I. (1997) S39-56

2.4.1 Zustandsbewertung in Österreich

Der Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in Österreich wurde als Element des Pavement Management Systems auf Basis der Überlegungen von Prof. SCHMUCK entwickelt. Das Verfahren besteht im Wesentlichen aus den Teilschritten Normierung und Wertsynthese (siehe unten). Die Einteilung der aus der Erfassung ermittelten Zustandsgrößen in Zustandsklassen ist auch in der RVS genormt³⁵. Ein Überblick des Bewertungsverfahrens wird in Tabelle 6 gegeben, wobei die detaillierte Beschreibung der dort angeführten Literatur zu entnehmen ist.

Die Zustandsgrößen (vgl. Kap. 2.3) werden in Österreich nicht für konstante Abschnittslängen, sondern für auf Basis von mathematischen Algorithmen gebildete homogene Abschnitte ermittelt und weisen je nach Merkmal unterschiedliche Einheiten auf. Die Zustandsgrößen werden über eine einheitliche Skala (Normierungsfunktion) in Schulnoten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) umgewandelt. Dabei wird der Zustandswert 3,5 als Warnwert bezeichnet. Das Erreichen des Warnwertes gibt Anlass zur Planung von Maßnahmen. Der Zustandswert 4,5 wird Schwellenwert genannt und stellt einen kritischen Zustand dar, dessen Erreichen bei sicherheitsrelevanten Schäden die Durchführung von Sofortmaßnahmen erfordert (vgl. Kap. 2.4.2). Die Normierung unterscheidet zwischen niederrangigen (Landesstraßen B und L) und hochrangigen (Autobahnen und Schnellstraßen) Straßen, wobei an die letzten strengere Anforderungen gestellt werden. Die Bewertungsfunktionen gelten jedoch sowohl für Asphalt- als auch für Betonstraßen, obwohl die Merkmale Risse und Oberflächenschäden bei Betonbefestigungen verschieden definiert sind. Die Zustandsklassen wurden ursprünglich durch untere und obere ganzzählige Grenzwerte definiert. Die resultierenden Normierungsfunktionen weisen Knicke auf und können mathematisch in mehrere Bereiche unterteilt werden. Für die Verwendung im PMS haben sich mittlerweile einteilige lineare Näherungsfunktionen eingebürgert.

Die Festlegung der Normierungsfunktionen basiert auf statistische Auswertungen der visuellen Zustandserfassung 1995 (Risse, Oberflächenschäden und Spurrinnen), der messtechnischen Zustandserfassung 1991-1996 (Griffigkeit) und Expertenbefragungen im Zuge der messtechnischen Erfassung 1999 (Längsebenheit), sowie auf bestehende Grenzwerte in Deutschland und in den Bundesländern Österreichs. Im Folgenden werden ausgewählte Aspekte der Entwicklung der Bewertungsfunktionen beschrieben.

Auf Basis der Auswertung der visuellen Zustandserfassung 1995³⁶, sowie auf Basis von bestehenden Grenzwerten im deutschsprachigen Raum werden zunächst Schwellenwerte für die verschiedenen Zustandsmerkmale, getrennt für Autobahnen und Schnellstraßen und für Landesstraßen B festgelegt. So wurde für das Merkmal Netzrisse und für Straßen A+S der Schwellenwert aus Deutschland (10%) übernommen. Für die Einzelrisse wurden damals eigene Klassen und eigene Schwellenwerte (A+S \rightarrow 60% relative Risslänge) vorgeschlagen. Heute werden die Risse zu einem Merkmal zusammengefasst und dabei wird der Grenzwert für Netzrisse verwendet. Dies ist vor allem bei Betondecken kaum nachvollziehbar, da auf diesen keine Netzrisse erfasst werden. Darüber hinaus wurden 1995 nur Merkmale für Asphaltstraßen erhoben. Die Schwellenwerte für die Merkmale Oberflächenschäden (damals Ausmagerungen u. Ausbrüche) und Spurrinnen wurden ebenfalls in Anlehnung an die deutschen Grenzwerte gewählt.

Im Weiteren wurden die anderen Klassengrenzen bzw. Klassenbreiten mittels Clusteranalyse auf Basis der erhobenen Zustandsgrößen ermittelt. Unter Clusteranalyse werden verschiedene Algorithmen zur Gruppenbildung zusammengefasst. Das Ziel dieses Verfahrens ist die vorhandenen Daten zu Gruppen (Cluster) zu vereinigen, wobei die Daten innerhalb einer Gruppe eine möglichst hohe Ähnlichkeit bzw. die Gruppen untereinander eine möglichst große Heterogenität aufweisen sollen. Die Berechnung erfolgte mit dem Softwareprodukt SPSS unter Eingabe der Gruppenanzahl (5) und der schon festgelegten Grenzen für den Schwellenwert. Als Ergebnis der Clusteranalyse (k-Means-Methode) erhält man Clusterschwerpunkte, sowie Minimal- und Maximalwerte für jede Zustandsklasse. Die gerundeten Ergebnisse wurden als Klassengrenzen vorgeschlagen und anschließend wurden Normierungsfunktionen abgeleitet. Die Berechnungsgrundlagen der Clusteranalyse sind in der Literatur³⁷ zu finden und werden hier nicht behandelt.

³⁵ vgl. RVS 13.01.15 (2006); RVS 13.01.16 (2012)

³⁶ vgl. MOLZER, C. et al. (1997)

³⁷ vgl. BACKHAUS, K. et al. (2011a) S397-455; BORTZ, J. et al. (2010) S453-470; RENCHER, A.C. (2002) S451-503

Der aktuelle Bewertungshintergrund für das Zustandsmerkmal Griffigkeit beruht auf die Ergebnisse der Zustandserfassung von 1991 bis 1996 mit dem RoadSTAR, die insgesamt 12.200 km Autobahnen, Schnellstraßen und Landesstraßen B (damals Bundesstraßen B) umfasste³⁸. Dabei wurde auf Autobahnen je Fahrtrichtung der erste Fahrstreifen, bzw. auf Landesstraßen B nur in einer Fahrtrichtung gemessen. Die Häufigkeitsverteilung der bei 18% Schlupf gemessenen Reibungsbeiwerte (vgl. Kap. 2.3.1) wurde in den für die Normierung üblichen fünf Zustandsklassen eingeteilt. Die 5%-, 10%-, 30%- und 70%-Quantile entsprechen den Noten 4,5, 3,5, 2,5 und 1,5. Bei der Festlegung beispielsweise des Schwellenwertes (Note 4,5) wurde unterstellt, dass dieser Wert auf maximal 5% der Abschnitte unterschritten werden darf (5%-Quantil). Die Wahl der obigen Quantile als Grenzen der Zustandsklassen erfolgte in Übereinstimmung mit der Methodik in Deutschland. Aktuell wird im PMS vereinfacht eine zweiteilige lineare Funktion mit einem Knick bei Note 3,5 verwendet, die nur für Autobahnen und Schnellstraßen gültig ist, obwohl der überwiegende Teil der Messkilometer 1991-1996 auf den Landesstraßen B (ca. 65%) erbracht wurde. Die aktuellen Grenzwerte für die Abnahme- bzw. Gewährleistungsprüfung gemäß RVS 08.16.01 (2010) entsprechen annährend den Noten 2,5 bzw. 3,0 der Normierungsfunktion.

Mittlerweile existieren schon Versuche, Mindestwerte für die Griffigkeit auf Basis von Überlegungen bezüglich der Verkehrssicherheit zu ermitteln. Im Rahmen eines Forschungsauftrags³⁹ wurden die mit RoadSTAR gemessenen Reibungsbeiwerte mit Anhaltewegen aus Pkw-Bremsversuchen verglichen. Auf Basis einer angestrebten Bremsverzögerung von 5 m/s² wurden Grenzwerte für die Griffigkeit für verschiedene Bedingungen ermittelt (Reifenqualität, ABS Ja/Nein, etc.). Die berechneten Werte korrelieren nach Angaben der Autoren sehr gut mit dem bestehenden Bewertungshintergrund, obwohl der Festlegung der Klassengrenzen in beiden Fällen vollkommen unterschiedliche Annahmen zugrunde lagen. Es ist jedoch zu beachten, dass bei dem ermittelten Mindestwert der Griffigkeit μ_{RS} =0,377 (gemäß dem Forschungsbericht) die erforderliche Bremsverzögerung von 5 m/s² nur unter bestmöglichen Bedingungen (ABS und sehr guten Reifen) und somit von einem geringen Teil der Fahrzeuge erreicht werden kann. Eine nähere Betrachtungen zum Thema finden sich in der weiterführenden Literatur⁴⁰.

Um eine Bewertung des Gesamtzustandes zu ermöglichen, werden die Zustandswerte der Einzelmerkmale unter Einbeziehung von Oberbauinformationen (Material, Alter, Schichtdicken, etc.) zu Teilwerten (Substanz- und Gebrauchswert) und anschließend zu einem Gesamtwert verknüpft (Wertsynthese). Die Berechnung der aggregierten Werte erfolgt nach einem erweiterten Maximalkriterium, das neben dem Maximalwert eines Wertepaares auch den Minimalwert berücksichtigt.

Der Gebrauchswert (GI) setzt sich aus den Komponenten Verkehrssicherheit und Fahrkomfort zusammen, welche die entsprechenden Teilziele der Erhaltung berücksichtigen. Dabei wird das Zustandsmerkmal Oberflächenschäden als Ausnahme nicht durch den Zustandswert, sondern direkt durch die Zustandsgröße nach einer Gewichtung berücksichtigt. So werden Zustandsgrößen unter dem Schwellenwert (z.B. < 40%) nicht so streng bewertet wie mit der üblichen Normierungsfunktion für Oberflächenschäden.

Der Substanzwert (SI) besteht aus den Teilen: Decke (getrennt für Asphalt/Beton) und theoretischer Tragfähigkeit. Für die Berechnung des Substanzwertes Decke werden diejenigen Zustandsmerkmale, die eine strukturelle Schädigung des Oberbaus darstellen, sowie das Deckenalter herangezogen. Die strukturelle Ermüdung des Oberbaus wird durch die Zustandsgröße theoretische Tragfähigkeit berücksichtigt, die auf eine Relation zwischen statistisch ausgewerteten Lebensdauern von bituminösen Tragschichten und der Zustandsfunktion Risse (vgl. Kap. 3.2.1) basiert. Die Einbeziehung der theoretischen Tragfähigkeit sowie des Alters soll oberflächlich nicht sichtbare strukturelle Schäden in Rechnung stellen.

Der Gesamtwert (GW) setzt sich wiederum aus den Teilwerten Gebrauchs- und Substanzwert, wobei den Belangen der Straßennutzer den Vorrang gegeben wird, d.h. der Substanzwert wird mit einem Faktor nach der Straßenkategorie reduziert. Da der gleiche Gesamtwert aus verschiedenen Kombinationen von Schäden ermittelt werden kann, ist die Wahl einer optimalen Maßnahme ein zufälliges Ereignis⁴¹.

³⁸ vgl. KLUGER-EIGL, W. (2009) S66-68; TIEFENBACHER, H. (2002) S88-99

³⁹ vgl. MAURER, P. (2007)

⁴⁰ vgl. HOFFMANN, M. (2013b); STÜTZE, T. (2004)

⁴¹ vgl. HOFFMANN, M. (2013a); HOFFMANN, M. (2013c)

Tabelle 6: Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in Österreich (System VIAPMS)⁴²

Beschreibung	Formeln	Darstellung		
Generelle Beschreibung:	Zustandsklassen – Bezeichnung und Grenzen:	Normierungsfunktion Risse		
Der Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in Österreich besteht aus den Teilschritten Normierung und Wert- synthese. Die aus der Zustandserfassung für homogene Abschnitte ermittelten Zustandsgrößen werden über eine einheitli- che Skala (Normierungsfunktion) in Schulnoten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) umgewandelt. Die Normierungs- vorschriften gelten sowohl für Asphalt- als	Note Klasseneinteilung Farbe SW 1 Sehr Gut [1,0-1,5) Grün 2 Gut [1,5-2,5) Hellgrün 3 Mittel [2,5-3,5) Gelb 4 Schlecht [3,5-4,5) Orange 5 Sehr Schlecht [4,5-5,0] Rot Mathematische Beschreibung Normierungs- funktionen: Normierungsfunktion Allgemein:	- 5.0 - 4.5 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -		
auch für Betonstraßen, aber unterscheidet zwischen niederrangigen (Landesstraßen B	$ZW_i = 1, 0 + X.ZG_i \qquad 1, 0 \le ZW_i \le 5, 0$	Normierungsfunktion Oberflächenschäden		
und L) und hochrangigen (Autobahnen und Schnellstraßen) Straßen, wobei an die letzten strengeren Anforderungen gestellt werden. Um eine Bewertung des Gesamt- zustandes zu ermöglichen, werden die normierten Einzelmerkmale unter Einbe- ziehung von zusätzlichen Oberbauinforma- tionen (Material, Alter, Schichtdicken, etc.) zu Teilwerten (Substanz- und Gebrauchs- wert) und anschließend zu einem Gesamt- wert zusammengefasst (Wertsynthese). Die Berechnung der aggregierten Werte erfolgt nach einem erweiterten Maximalkriterium, das neben dem Maximalwert eines Werte- paares auch den Minimalwert berücksich- tigt. Dabei wird versichert, dass das Erreichen eines kritischen Zustandes (Schwellenwert) durch ein einziges Merk- mal zu einem schlechten Gesamtzustand führt (Durchschlagsregel).	Normierungsfunktion Risse (RI): $ZW_{Rl} = 1, 0 + 0, 3500.ZG_{Rl}$ Straßen A+S $ZW_{Rl} = 1, 0 + 0, 1167.ZG_{Rl}$ Straßen B+LNormierungsfunktion Oberflächenschäden (OS): $ZW_{OS} = 1, 0 + 0, 0875.ZG_{OS}$ Straßen A+S $ZW_{OS} = 1, 0 + 0, 0875.ZG_{OS}$ Straßen A+S $ZW_{OS} = 1, 0 + 0, 0583.ZG_{OS}$ Straßen B+LNormierungsfunktion Spurinnen (SR): $ZW_{SR} = 1, 0 + 0, 175.ZG_{SR}$ Straßen A+S $ZW_{SR} = 1, 0 + 0, 140.ZG_{SR}$ Straßen B+LNormierungsfunktion Längsebenheit (LE): $ZW_{LE} = 1, 0 + 0, 7778.ZG_{LE}$ Straßen A+S $ZW_{LE} = 1, 0 + 0, 5833.ZG_{LE}$ Straßen B+LNormierungsfunktion Griffigkeit (GR): $ZW_{GR} = 9,9286 - 14, 286.ZG_{GR}$ $ZG_{GR} \le 0, 45$ $ZW_{GR} = 6, 5 - 6, 6667.ZG_{GR}$ $ZG_{GR} \ge 0, 45$ Ermittling van Tail van Cocomptionent	5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 5.0 Normierungsfunktion Spurrinnen 5.0 X X X X X X X X X X X X X		
Beispiele:	Gebrauchswert Teil Verkehrssicherheit:	ZG Spurrinnen [mm]		
Zustandsbewertung für den Straßenoberbau im System VIAPMS in Österreich. Legende: ZG _i Zustandsgröße Merkmal <i>i</i> [-]	$GI_{Skcher} = \max (ZW_{SR}; ZW_{GR}) + 0,1.\min(ZW_{SR}; ZW_{GR}) - 0,1$ Gebrauchswert Teil Fahrkomfort: $GI_{Komfort} = \max (ZW_{LE}; 1 + 0,0021875.ZG_{OS}^{2})$	Normierungsfunktion Längsebenheit		
ZWi Zustandswert Merkmal i [-] A+S Abkürzung Autobahnen und Schnellstraßen	+ 0,1.min $(ZW_{LE}; 1+0,0021875.ZG_{oS}^2) - 0,1$ Gebrauchswert gesamt: $GI = \max (GI_{S_{C},S_{C}}; GI_{S_{C},S_{C}}) +$	2,5 1,5 − Straßen A+S − Straßen B+L		
B+L Abkürzung Landesstraßen G Abkürzung Gemeindestraßen SP Abkürzung Saurzingentiefe (mm)	+ 0,1.min $(GI_{Sicher}; GI_{Komfort}) - 0,1$	N 1,0 P ZG Längsebenheit IRI [m/km]		
JK Abkürzung Spurimichtete (minj LE Abkürzung Längsebenheit GR Abkürzung Griffigkeit [-] OS Abkürzung Oberflächenschäden	Substanzwert Decke (Asphalt): $SI_{Decke} = \max \{ \max (ZW_{RJ}; ZW_{OS}) + 0, 1, \min (ZW_{RJ}; ZW_{OS}) - 0, 1; \max [\min (1+0,00010938.ZG_{SR}^{3}; 5); \}$	Normierungsfunktion Griffigkeit		
[%] <i>RI</i> Abkürzung Risse [%] <i>IRI</i> International Roughness Index [m/km]	; min (1+0,03840988.ZG _{1E} ³ ;5)]; ZW _{Alker} } Substanzwert Decke (Beton): $SI_{Decke} = \max \{ \max (ZW_{RI}; ZW_{OS}) + 0, 1. \min (ZW_{RI}; ZW_{OS}) - 0, 1; \max [\min (1+0,00010938.ZG_{SR}^3;5);$	H 3.0 5.5 ∞ 2.5 ∞ 2.0 1.5 1.0		
μ _{SRM} Reibungsbeiwert mit KoadStar [-] Alter Deckschichtalter [a] Tragf Tragfähigkeit Decke [-]	; min (1+0,03840988 ZG_{LE}^{3} ; 5)]; SI_{Tragf} } Substanzwert theoretische Tragfähigkeit:	0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 ZG Griffigkeit µ _{SRM} [-]		
<i>GI_{sicher}</i> Gebrauchswert Verkehrssicherheit [-]	$SI_{Tragf} = 1,0+0,35.ZG_{Tragf}$ Substanzwert gesamt:			
GI _{Komfort} Gebrauchswert Fahrkomfort [-] GI GI Gebrauchswert gesamt [-] SI _{Decke} Substanzwert Decke [-]	$SI = \max(0,89.SI_{Trayf}; SI_{Decke}) + 0,1.\min(0,89.SI_{Trayf}; SI_{Decke}) - 0,1$	IF 3.5 MZ 2.5		
SI _{Tragf} Substanzwert Tragfähigkeit [-] SI Substanzwert gesamt [-]	Gesamtwert: $GW = \max(1, 0.SI_{Trag}; 0.89.SI_{Decke})$ Straßen A+S	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		
GW Gesamtwert [-]	$GW = \max(1, 0.SI_{Tragf}; 0, 80.SI_{Decke})$ Straßen B+L	0 5 10 15 20 25 30 ZG Deckschichtalter [a]		

⁴² Eigene Darstellung auf Basis von WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S126-156; WENINGER-VYCUDIL, A. et al.(2009) S48-61; RVS 13.01.15 (2006); RVS 13.01.16 (2012); HOFFMANN, M. (2014)

2.4.2 Zustandsbewertung in Deutschland

Die Bewertung der erfassten Zustandsgrößen erfolgt direkt im Anschluss der Zustandserfassung (ZEB), getrennt von einem Pavement Management System (VIAPMS). Zum Zeitpunkt der Erstanwendung des PMS war die Ermittlung von Zustandswerten für jedes Prognosejahr computertechnisch mit großem Rechenaufwand verbunden. Als Zwischenlösung wurde daher beschlossen, die Prognose auf Basis der Zustandswerte und nicht der Zustandsgrößen aufzusetzen. In der Zukunft soll die Prognose jedoch auf Basis von Zustandsgrößen erfolgen, was nach der verwendeten Methodik zur Maßnahmenoptimierung die Einbindung des Bewertungsverfahrens in das PMS erfordert.

Das Bewertungsverfahren in Deutschland setzt sich wie in Österreich aus den Teilschritten Normierung und Wertsynthese bzw. Verknüpfung der normierten Zustandsgrößen zu Teilwerten und zu einem Gesamtzustandswert zusammen. Ein Überblick der verwendeten Berechnungsalgorithmen gemäß Literatur⁴³ sowie graphische Darstellung der Normierungsfunktionen ist in Tabelle 7 gegeben. Die Normierung wird nur für einen Teil der erfassten Zustandsmerkmale durchgeführt (vgl. Tabelle 2). Die restlichen "nicht bewertungsrelevanten" Schadensmerkmale sind möglichst umgehend im Rahmen der betrieblichen Erhaltung zu beseitigen. Eine Ausnahme bildet der Längsebenheitswirkindex, der zwar normiert, aber nicht für die Ermittlung von Teilwerten im Rahmen der Wertsynthese einbezogen wird.

Die Überführung der auf 100 m lange Auswerteabschnitte (bei Ortsdurchfahrten 20 m-Auswerteabschnitte) bezogenen Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte erfolgt über eine Notenskala, die Werte von 1,0 (sehr gut) bis 5,0 (sehr schlecht) aufweist. Die Normierungsfunktionen der einzelnen Merkmale sind durch drei charakteristische Punkte gekennzeichnet (Abbildung 4):

- **1,5-Wert (früher Zielwert):** Der 1,5-Wert entspricht bei den Ebenheitsmerkmalen der Toleranz, die bei Abnahme nach der Herstellung bzw. einer Erhaltungsmaßnahme zulässig ist.
- Warnwert (Note 3,5): Das Erreichen des Warnwertes erfordert eine intensivere Beobachtung des betroffenen Abschnitts und möglicherweise Planung von Erhaltungsmaßnahmen.
- Schwellenwert (Note 4,5): Beim Erreichen des Schwellenwertes sollen in der Regel bauliche oder verkehrsbeschränkende Maßnahmen (bei sicherheitsrelevanten Schäden) ergriffen werden.

Die Normierungsfunktion wird durch geradlinige Verbindung von den oben genannten Festpunkten vollständig definiert. Die Änderung des Zustandswertes von 1,0 nach 1,5 und von 4,5 nach 5,0 erfolgt sprunghaft. Damit werden alle Zustandswerte unterhalb des 1,5-Wertes und oberhalb des Schwellenwertes auf 1,0 bzw. 5,0 gesetzt. Die Überführung der Zustandsgrößen in Zustandswerte ist mit Informationsverlust und Verzerrung der ursprünglichen Zustandsverteilung verbunden. Diese Unstetigkeiten in den Normierungsfunktionen sind besonders problematisch, wenn die Zustandsprognose und die Maßnahmenbewertung auf Basis der Zustandswerte erfolgen (vgl. Kap. 3.2.2). Darüber hinaus ist der Wertebereich für den Zustandswert wie in Österreich auf 1,0 bis 5,0 beschränkt (vgl. Kap. 2.4.1). Für die graphische Darstellung der Ergebnisse der Zustandsbewertung werden in Deutschland acht Zustandsklassen mit einer Klassenbreite von 0,5 Notenwert verwendet. Zusätzlich werden durch die Normierungsknickpunkte vier Klassenbereiche gebildet, denen auch standardmäßig Farben zugeordnet sind.

Die Normierung in Deutschland erfolgt in Abhängigkeit von dem Anforderungsniveau an den Straßenzustand, der durch drei Funktionsklassen gekennzeichnet ist. Funktionsklasse 1 stellt die höchsten Anforderungen und wird z.B. für Zustandsbewertung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen verwendet. Bis einschließlich der Zustandserfassung 2001/02 wurde nur Funktionsklasse 1 eingesetzt. Gemäß ZTV ZEB-StB (2006) werden die Anforderungen an Substanzmerkmale und allgemeine Unebenheit in Ortsdurchfahrten durch Funktionsklasse 2, bzw. an Spurrinnen durch Funktionsklasse 3 formuliert. Die Zuordnung von Straßen zu den Funktionsklassen 2 und 3 erfolgt nicht nach einheitlichen Kriterien. Für die in Baulast von Kommunen befindlichen Innerortstraßen wird die Verwendung von Funktionsklasse A (Hauptverkehrs-, Verkehrs- und Sammelstraßen) und Funktionsklasse B (Anlieger- und Wohnstraßen) vorgeschlagen. Die Parameter der entsprechenden Normierungsfunktionen werden geprüft bzw. in einem

⁴³ vgl. ZTV ZEB-StB (2006) S7-25,79-82; SOCINA, M. (2007) S69-84; BECKEDAHL, H.-J. (2010) S69-77

derzeit in Vorbereitung stehenden Arbeitspapier niedergelegt⁴⁴. Die nachfolgenden Betrachtungen konzentrieren sich jedoch auf freie Strecken der Bundesfernstraßen und Ortsdurchfahrten.

Im Vergleich der Normierungsfunktion für die einzelnen Zustandsmerkmale zueinander lassen sich einige Besonderheiten feststellen. Die Normierungsfunktionen für Risse und Flickstellen unterscheiden sich nur für Funktionsklasse 1. Die Normierungsfunktionen verlaufen polygonal zwischen Note 1,5 und Note 4,5, wobei der Abschnitt zwischen Warnwert und Schwellenwert eine degressive Tendenz aufweist. Im Unterschied dazu verlaufen die Funktionen für Griffigkeit und fiktive Wassertiefe linear ohne Steigungsänderung bei dem Warnwert.

Die Festlegung der Fixpunkte der Normierungsfunktionen basiert im Allgemeinen nicht auf wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse, sondern auf Erfahrungen aus der Praxis und auf allgemeine Akzeptanz (z.B. Spurrinnentiefe, Risse). Die Warn- und Schwellenwerte für die fiktive Wassertiefe werden hingegen auf Basis von Simulationsrechnungen und Untersuchungen der hydrodynamischen Effekte von Spurrinnen, die mit Wasser gefüllt sind in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit v₈₅ (FK1: 100 km/h, FK2: 80 km/h, FK3: 60 km/h) festgelegt⁴⁵. Grenzwerte für das Unebenheitsmaß (AUN) werden in Bezug auf physikalische Grenzbelastungen des Menschen nach Straßenkategorien für verschiedene Geschwindigkeiten, Fahrzeiten und Welligkeitsverteilungen mittels mathematischer Zusammenhänge abgeleitet⁴⁶. Aufgrund eines engen Zusammenhangs zwischen AUN und dem Längsebenheitswirkindex (LWI), werden für LWI provisorisch die Grenzwerte für AUN verwendet.

Die Normierung des Schadensmerkmals Griffigkeit erfolgt auf Basis des Seitenreibungsbeiwertes nach dem Standardmessverfahren SCRIM bzw. SKM (vgl. Kap. 2.3.2) in Abhängigkeit von der Soll-Messgeschwindigkeit dieses Gerätes⁴⁷. Die Messgeschwindigkeit soll auf Bundesautobahnen 80 km/h, auf Bundesstraßen 60 km/h und auf Innerortsstraßen 40 km/h betragen. Der Bewertungshintergrund beruht auf netzweiten Erfassungen und den resultierenden empirischen Verteilungsfunktionen der gemessenen Griffigkeitswerte. Ursprünglich wurden das 5%-Quantil als Schellenwert, das 15%-Quantil als Warnwert und das 70%-Quantil der Verteilung als 1,5-Wert definiert. Der Verlauf der aktualisierten Normierungsfunktion wird jedoch nur auf Basis des Warn- und Schwellenwerts festgelegt, was einen Knick an dem Warnwert eliminiert. Die anderen Werte der Funktion werden durch lineare Interpolation bzw. Extrapolation ermittelt. Die aktuellen Grenzwerte werden auf Basis der Griffigkeitswerte (SCRIM-Mittelwerte über 100 m bei 80 km/h) aus der bundesweiten Zustandserfassung der Autobahnen (1. Fahrstreifen) im Jahr 1992 ermittelt. Die Normierungsfunktionen für 60 und 40 km/h werden durch Verschiebung aus der Normierungsfunktion für 80 km/h ermittelt. Dabei wird aus einer Griffigkeitserhöhung von 0,05 bei einer Reduktion der Messgeschwindigkeit um 20 km/h ausgegangen.

Die aktuelle vertragliche Anforderung an die Griffigkeit von der fertigen Oberfläche einer neuen Straßenkonstruktion (Abnahmewert) entspricht dem 2,5-Wert der Normierungsfunktion ($\mu_{SCRIM80}=0,46$). Die Griffigkeit bis zum Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung entspricht ca. dem 3,4-Zustandswert ($\mu_{SCRIM80}=0,40$)⁴⁸. Eine Unterschreitung dieser Grenzwerte um den Betrag der Messgenauigkeit von SCRIM ($\pm 0,03 \rightarrow$ in Noten: 0,43) ist zulässig. In Deutschland ist auch ein alternativer Bewertungshintergrund für das Verfahren SRM (Stuttgarter Reibungsmesser) vorhanden.

Die im Rahmen der Normierung berechneten dimensionslosen Zustandswerte werden mit Gewichtungsfaktoren multipliziert und zu den beiden Teilwerten Gebrauchswert und Subtanzwert (Oberfläche) zusammengefasst. Darüber hinaus erfolgt die Verknüpfung über eine logarithmische Funktion unter der zusätzlichen Berücksichtigung einer Durchschlagsregel. Die Gewichtung erfolgt in Relation zu der Bedeutung des Schadensmerkmals zur Erfüllung des entsprechenden Teilziels, wobei die Festlegung der Gewichte vielfach auf subjektiven Präferenzen beruht. Durch Addition der gewichteten Merkmale wird ein Index mit einer Skala von 0 bis 100 gebildet, der anschließend in eine logarithmische Funktion einge-

⁴⁴ vgl. E EMI (2012); STEINAUER, B. et al. (2006)

⁴⁵ vgl. STEINAUER, B. et al. (2006) S118-121

⁴⁶ vgl. STEINAUER, B. (1992) S2-13

 ⁴⁷ vgl. WEIDICH, P. (2009) S33-37; VAN DER SLUIS, S. (2002) S27-32; KLUGER-EIGL, W. (2009) S69-75; STÜTZE, T. (2004) S27; HUSCHECK, S. (1997)

⁴⁸ vgl. ZTV Asphalt-StB 07 (2007); ZTV Beton-StB 07 (2007)

bunden wird. Die Logarithmusbildung ermöglicht eine strengere Bewertung als eine lineare Verknüpfung (vgl. Abbildung 4). Anschließend wird der Gesamtwert aus dem jeweils schlechteren Wert von Gebrauchs- und Substanzwert ermittelt.

Ist der berechnete Teilwert kleiner als einer der teilwertrelevanten Zustandswerte, dann wird der Teilwert mit diesem Zustandswert gleichgesetzt, falls dieser den Warnwert (Note 3,5) überschreitet. Diese Durchschlagsregel wird in verschiedenen Modifikationen (z.B. Flickstellen schlagen nicht durch) angewandt und stößt auf Kritik in der Praxis. Auswertungen⁴⁹ von realen Daten haben gezeigt, dass diese Regel bei Gebrauchs- bzw. Substanzwert > 3,5 so oft zur Anwendung kommt, dass die Verknüpfungsformel und die Gewichtung übrig bleiben. Abschnitte, an denen Fahrbahnschäden schon durch Flicken behoben werden und daher einen ZWFLI > 3,5 erhalten, können als Folge der Durchschlagsregel schlechter bewertet werden als Abschnitte, deren geschädigte Fläche nicht saniert ist. Während die Durchschlagsregel bei sicherheitsrelevanten Schäden als angemessen erscheint, ist der z.B. des Durchschlag Zustandswerts der Längsebenheit in Bezug auf den Substanzerhalt wenig plausibel.

Eine Besonderheit des Bewertungsverfahrens ist in Bezug auf das Oberflächenbild bei Betonfahrbahnen gegeben. Zu den Substanzmerkmalen Längs- und Querrisse (LQR), Eckabbrüche (E-AB) und Kantenschäden (KAS) werden jeweils zwei Zustandsgrößen ermittelt (vgl. Tabelle 2), die auch getrennt normiert und anschließend zu einem Wert über Multiplikation und Wurzelbildung (geometrisches Mittel) verknüpft werden.

Das beschriebene Bewertungsverfahren in Deutschland wird derzeit überprüft bzw. überarbeitet. Die vorgeschlagene Änderungen umfassen u.a.⁵⁰: die Verwendung von linearen Normierungsfunktionen ohne Unstetigkeiten, die sich nur auf den Schwellenwert stützen, Aufhebung der multiplikativen Wurzelverknüpfung von Substanzmerkmalen bei Betondecken und der Durchschlagsregel bei der Ermittlung der Teilwerte, neue Berechnungsvorschriften für die Bildung der Teilwerte, Entfernung der oberen Grenze für die Zustandswerte (intern) bzw. Ermittlung von Zustandswerten > 5,0 und Berücksichtigung von Nutzerkosten.

⁵⁰ vgl. KRAUSE, G. et al. (2010) S36-38

Ausgewählte Besonderheiten des Zustandsbewertungsverfahrens in Deutschland



Einfluss der logarithmischen Transformation auf die Bildung des Gebrauchswertes (TWGEB)*



Kontiniuerliche Zunahme der teilwertrelevanten ZW um den gleichen Betrag

• Strengere Bewertung durch Logarithmusbildung

Einfluss der Durchschlagsregel auf die Bildung des Gebrauchswertes (TWGEB)**



Kommentar:

- Kontiniuerliche Verschlechterung der Griffigkeit, während die anderen Merkmale im sehr guten Zustand bleiben
- Durchschlag der Griffigkeit beim Erreichen des Warnwerts (Unstetigkeit in der Kurve des Gebrauchswerts)

Wurzelverknüpfung bei den Substanzmerkmalen von Betondecken:

 $ZWLQR = \sqrt{ZWLQRL.ZWLQRP}$ $ZWEAB = \sqrt{ZWEABF.ZWEABP}$ $ZWKAS = \sqrt{ZWKASL.ZWKASP}$

*Eigene Darstellung des Beispiels von SOCINA, M. (2007) S82 **Eigene Darstellung des Beispiels von SOCINA, M. (2007) S83

Abbildung 4: Ausgewählte Besonderheiten des deutschen Zustandsbewertungsansatzes (Straßenoberbau)

⁴⁹ vgl. STEINAUER, B. et al. (2006) S79-85

Tabelle 7: Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in Deutschland⁵¹



⁵¹ Eigene Darstellung auf Basis von ZTB ZEB-StB (2006); Arbeitspapier Nr.9/A 1 zur ZEB (2001)

2.4.3 Zustandsbewertung in der Schweiz

Das Bewertungsverfahren in der Schweiz ist normativ geregelt. Die Verknüpfung zu Teilwerten hat sich jedoch nicht einheitlich durchgesetzt. Die beobachteten oder gemessenen Werte eines Zustandsmerkmals werden ebenso über eine Funktion in dimensionslose Zahlen umgewandelt, die in der Schweiz Zustandsindizes bzw. Indexwerte statt Zustandswerte genannt werden. Die Normierungsfunktionen sind in zwei Normen⁵² verankert und in Tabelle 8 auch graphisch veranschaulicht. Ihr grundsätzlicher Verlauf ist polygonhaft mit Knicken an jedem ganzzahligen Indexwert. Als Besonderheit des Ansatzes in der Schweiz beginnt die Bewertungsskala bei 0 (sehr gut) und nicht bei 1,0 und endet wieder bei 5,0 (sehr schlecht), wodurch sich fünf Zustandsklassen mit gleicher Klassenbreite von einem vollen Notenwert ableiten lassen. Damit wird der kritische Zustand (Schwellenwert) bei dem Wert 4,0 erreicht.

Die Bewertung der Oberflächenschäden (Zustandsindex I_0/I_1) erfolgt durch Umwandlung der gewichteten Matrixwerte der Hauptgruppen $\sum (M_i.G_i)$ (vgl. Tabelle 3). Dieses Merkmal stellt selber einen Gesamtzustand dar und umfasst eine Reihe von verschiedenen Schäden, die auch in Gruppen geteilt sind. Der Index I_0/I_1 wird in Einzelindizes (I_{Ai} bzw. I_{Bi}) aufgespaltet, die die Grundlage für die Maßnahmenzuordnung und die Ableitung von Zustandsfunktionen bilden. Mit der Aufhebung der Gewichtung erfolgt die Normierung der Einzelindizes anhand der Matrixwerte, die an und für sich auch Indexwerte von 0 bis 9 sind. Die bestehende Normierungsfunktion bewertet eine Strecke als schlecht, nur wenn beide Indikatoren (Ausmaß und Schwere) maximale Ausprägung aufweisen (M=9,0). So wird einem Abschnitt, auf den sich schmale Netzrisse über die gesamte Fläche erstrecken (S1, A3 \rightarrow M=3,0), die Note 1,7 zugeordnet.

Die Normierung der Ebenheitsmerkmale unterscheidet zwischen Hochleistungsstraßen (HLS), Hauptverkehrsstraßen (HVS) und Verbindungs-/Sammel-/Erschließungsstraßen (VS/SS/ES). Die Hochleistungsstraßen erfüllen übergeordnete Netzfunktionen (Autobahnen und Autostraßen). Hauptverkehrsstraßen haben nationale bis regionale Bedeutung, während VS/SS/ES primär auf die Anforderungen des regionalen bis örtlichen Verkehr ausgerichtet sind. Die Festlegung von charakteristischen Punkten der Normierungsfunktionen erfolgt in Anlehnung an die Norm SN 640 521c (2003), welche die Anforderungen an die Ebenheit definiert. Die dort angegebenen gültigen Abnahmewerte für Spurrinnentiefe und sw-Wert entsprechen je nach Straßentyp der Note 1,0 in der jeweiligen Normierungsfunktion. Grenzwerten während der Gebrauchsdauer (in der Version SN 640 521a waren solche Grenzwerte für die Längsebenheit formuliert) wird der Indexwert 4,0 zugewiesen. Die Bestimmung der Zwischenwerte erfolgt, soweit bekannt, anhand von Ad-hoc-Überlegungen oder Interpolation.

Der aktuelle Bewertungshintergrund für die Griffigkeit (Zustandsindex I4) basiert auf einer repräsentativen Häufigkeitsverteilung der Messwerte auf 280 Strecken aus Zustandserfassungen mit dem blockierten Messrad (Skiddometer) in den Jahren von 1979 bis1982⁵³. Bei der Auswahl der Abschnitte wurde darauf geachtet, dass die prozentuale Aufteilung nach Straßentypen, Belagsarten und Belagsalter im Schweizer Gesamtstraßennetz auch in der Stichprobe beibehalten wird. Die Messungen wurden mit Geschwindigkeiten 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h und 100 km/h durchgeführt. Die Grenzwerte (Note 4,0) ergeben sich aus dem 10%-Quantil der Verteilung abzüglich der Messunsicherheit (0,02) und betragen $\mu_{Skiddo80}=0,32$, $\mu_{Skiddo60}=0,39$ und $\mu_{Skiddo40}=0,48$. Diese Richtwerte gelten sowohl für Zustandserfassungen als auch für Abnahmeprüfungen, weil in der Schweiz Abnahme- und Garantiewerte nicht speziell definiert sind. Der 3,0-Indexwert der Normierungsfunktion kann aus dem 10%-Quantil zuzüglich 0,02 ermittelt werden. Der Note 2,0 bzw. der Note 1,0 entspricht das 30%-Quantil bzw. das 60%-Quantil der repräsentativen Häufigkeitsverteilung. Die Abnahme der Reibungsbeiwerte mit der Erhöhung der Messgeschwindigkeit folgt einer degressiven Tendenz – der horizontale Abstand zwischen den Normierungsfunktionen wird kleiner. Seit dem Jahr 1990 ist das System SRM in der Schweiz im Einsatz. Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass der bestehende Bewertungshintergrund auch für SRM Gültigkeit besitzt. Bei der ersten netzweiten Zustandserfassung und -bewertung der Nationalstraßen im Jahr 2001 wurde auch ein SCRIM-Gerät verwendet, dessen Ergebnisse mit der deutschen Bewertungsskala beurteilt wurden⁵⁴.

⁵² vgl. SN 640 925b (2003); SN 640 926 (2005)

⁵³ vgl. BÜHLMANN, F. (1983) S15-27,107; SN 640 511b (1984); JACOT, A. et al. (2007) S29,30

⁵⁴ vgl. LINDENMANN, H. et al. (2010)
Im Unterschied zu Österreich und Deutschland wird in der Schweiz auch die Tragfähigkeit des Belags (Zustandsindex I₅) bewertet. Normierungsfunktionen sind für verschiedene Verkehrslastklassen⁵⁵ gegeben. Die Verkehrslastklasse T wird für die Dimensionierung des Straßenoberbaus (Wahl des Oberbautyps) verwendet, wobei die Einteilung auf Basis der täglichen äquivalenten Verkehrslast TF in sechs Kategorien von T1 (sehr leicht) bis T6 (extrem schwer) erfolgt. Die Beanspruchung auf Geh- und Radwege entspricht T1, Hochleistungsstraßen haben einen Aufbau gemäß T6. Der Bewertungshintergrund für Tragfähigkeit basiert auf der Norm SN 640 733b (1998), die die Ermittlung der Dicke einer Oberbauverstärkung von bituminösen Schichten aufgrund von der gesamten äquivalenten Verkehrslast (Normachse 8,16 t) und Deflektionsmessungen mittels eines Diagramms definiert. Je nach Verkehrslastklasse kann die zulässige Deflektion bei einer Gebrauchsdauer von 20 Jahren abgelesen werden, die der Note 1,0 in die Normierungsfunktion entspricht⁵⁶. Die zulässige Deflektion bei 10 Jahren wird mit Note 2,0 bewertet. Ist die maßgebende Deflektion (ausgewertet nach der Messung) größer als die zulässige Deflektion, dann ist eine Verstärkungsmaßnahme erforderlich. Für eine Verstärkungsdicke von 4 cm ergibt sich bei 10 Jahren ein Rücksetzwert der Zustandsnote von 1,0. Wird einem Abschnitt z.B. die Note 4,0 zugeordnet, dann ist ein Überzug von 8 cm erforderlich, um die Tragfähigkeit des Belags auf die Note 2,0 rückzusetzen.

Die Grundsätze für Gesamtbeurteilung des Straßenoberbaus sind wie die Normierung in einer schweizerischen Norm⁵⁷ enthalten, ihre mathematische Beschreibung ist ebenfalls in Tabelle 8 gegeben. Diese Norm unterscheidet zwischen indexierter, monetarisierter (hier nicht behandelt) Bewertung mit Substanz- und Gebrauchswerten und Bewertung mit zusammengesetzten Indizes. Im Unterschied zu Österreich und Deutschland wird in der Schweiz ein Gesamtwert nicht aus dem Substanz- und Gebrauchswert gebildet. Grundsätzlich sind drei zusammengesetzte Indizes (Gesamtindizes GI) definiert, die jedoch auf insgesamt sechs anwachsen, nachdem für jeden Index zwei Alternativen (Berechnung auf Basis I₀ oder I₁) gegeben sind. Die Gesamtindizes beziehen sich auf die Substanz der Beläge (GI₁/GI₂), auf die Verkehrssicherheit (GI₃/GI₄) und auf die Substanz des Oberbaus (GI₅/GI₆). Sie ergeben sich aus der Summe des Mittelwerts von den jeweils berücksichtigten Einzelindizes und ihrer Standardabweichung, multipliziert mit einem Faktor (1,25). Obwohl ein Gesamtindex einen Gesamtzustand ausdrückt, werden dabei nicht alle Einzelmerkmale berücksichtigt. Sie werden auch selten in ihrer Ganzheit erfasst. Die praktische Bedeutung dieser Indizes ist nicht klar definiert, beschränkt sich eher auf Vergleichsanalysen und Zustandsreihung für Prioritäten bei Maßnahmen.

Als Grundlage für Maßnahmenplanung auf Netzebene sollen die indexierten Substanz- und Gebrauchswerte dienen. Die Berechnung dieser Werte erfolgt in Abhängigkeit von dem Straßentyp, Geschwindigkeitslimit und Ortslage (Außerorts/Innerorts) durch lineare additive Verknüpfung und Gewichtung nach dem Einfluss. Für die Bildung des Gebrauchswerts wird am stärksten der Indexwert der Griffigkeit gewichtet. Maßgebenden Einfluss auf die Berechnung des Substanzwertes hat der Indexwert der Tragfähigkeit. Der Indexwert der Längsebenheit (I_2) wird lediglich bei der Ermittlung des Gebrauchswerts einer Straßenkategorie (HLS 120/100 mit Gewicht 0,10) verwendet. Die Durchsetzung dieser normierten Vorgehensweise stößt auf geringe Akzeptanz bei den Fachspezialisten. Als besonders problematisch werden die Einbeziehung des zusammengesetzten Indizes der Oberflächenschäden (I_0/I_1) anstatt der Einzelindizes I_{Ai}/I_{Bi} und die Verknüpfung bzw. Gewichtung betrachtet. Der Zustandsindex I_0 (I_1) wird aus verschiedenen Gruppen von Schadensmerkmalen zusammengesetzt, deren Einfluss auf den Gebrauchsund Substanzwert nach der vorhandenen Methodik nicht differenziert werden kann. Da die Summe der Gewichte jeweils 1,0 beträgt und in der Norm keine Durchschlagsregel vorgesehen ist, ist häufig mit einer "zu guten" Bewertung zu rechnen. Das Konzept für eine Vereinfachung des Erfassungs- und Bewertungsverfahrens in der Schweiz sowie die eingeführten neuen Indizes sind im Kapitel 2.3.3 kurz erläutert, da die vorgeschlagenen Veränderungen eng mit der Erfassungsmethodik verbunden sind. Auf weitere erarbeitete Verbesserungsvorschläge zum bestehenden Verfahren wird hier nicht näher eingegangen bzw. wird auf die entsprechende Literatur verwiesen⁵⁸.

⁵⁵ vgl. SN 640 324 (2011); SN 640 320 (2011); SN 640 733b (1998)

⁵⁶ vgl. SCAZZIGA, I. (1997) S52,53

⁵⁷ vgl. SN 640 904 (2003)

⁵⁸ vgl. u.a. RAFI, A. et al. (2006) S25-30; JACOT, A. (2009) S58-64

5,0

Ξ

Darstellung

Normierungsfunktion Oberflächenschäden

Tabelle 8: Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in der Schweiz⁵⁹

Beschreibung

Generelle Beschreibung: Das Bewertungsverfahren in der Schweiz ist in den Normen verankert. Die Umwandlung der beobachteten oder gemessenen Werte eines Schadensmerkmals in dimensionslose Indexwerte erfolgt über eine Bewertungsskala, die Werte von 0 (sehr gut) bis 5,0 (sehr schlecht) aufweist. Damit wird der kritische Zustand (Schwellenwert) bei dem Wert 4,0 erreicht. Die Normierungsfunktionen werden in Abhängigkeit von dem Straßentyp, von der Verkehrslastklasse bei der Tragfähigkeit und von der Messgeschwindigkeit bei der Griffigkeit definiert. Die charakteristischen Punkte der Funktionen sind in der Norm nicht festgelegt. Die hier gegebenen Werte sind abgelesen oder z.T. in der Literatur vorhanden. Die Normierungsfunktion für die Tragfähigkeit bezieht sich auf Messungen mit Benkelman-Balken, aber kann auch für den Lacroix-Deflektograph abgeleitet werden. Die Bedeutung der Gesamtindizes beschränkt sich auf Zustandsreihung und Vergleichsanalysen. Substanz- und Gebrauchswerte sollen als Grundlage für Maßnahmenplanung auf Netzebene dienen. Ihre Anwendung hat sich in der Praxis nicht durchgesetzt. Die Maßnahmenzuordnung erfolgt daher auf Basis der Einzelwerte (IAi für Asphalt bzw. IBi für Beton).

Beispiele:

Zustandsbewertungsansatz Straßenoberbau gemäß den Schweizerischen Normen

Legende:

HLS HVS VS SS ES GI _i SW _i GW _i	Abkürzung Hochleistungsstraßen Abkürzung Hauptverkehrsstraßen Abkürzung Verbindungsstraßen Abkürzung Sammelstraßen Abkürzung Erschließungsstraßen Gesamtindex (zusammengesetzter Index) Substanzwert Gebrauchswert Zustandsindex Oberflächen- schäden obne Spurrinpentiefe [.]	Gesamtindex Oberflächenzustand mit Tra (Substanz Oberbau): GI_5 (aus I_0, I_2, I_3 und I_5) oder GI_6 (aus Berechnung der zusammengesetzten Indi: $GI_i = \frac{1}{n} \cdot \sum (I_i) + k \cdot \sigma(I_i)$ $k = 1,25$ Ermittlung von Substanz- und Gebraue nach Straßentyp, Geschwindigkeitsregi Ortslage: HLS, Geschwindigkeitslimite 120/100 kn
I ₁	Zustandsindex Oberflächenschä- den mit Berücksichtigung der visuell geschätzten Spurinnen [-] Zustandsindex Ebenheit in Länesrichtung [-]	$SW_1 = 0, 4.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 4.I_5$ $GW_1 = 0, 2.I_0 + 0, 1.I_2 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_4$ HLS, Geschwindigkeitslimite 80 km/h: $SW_2 = 0, 3.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_5$
I3 I4 I5	Zustandsindex Ebenheit in Querrichtung [-] Zustandsindex Griffigkeit [-] Zustandsindex Tragfähigkeit [-]	$GW_2 = 0, 2.I_0 + 0, 3.I_3 + 0, 5.I_4$ HVS, Außerorts: $SW_3 = 0, 3.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_5$ $GW_3 = 0, 3.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_4$
M_{i} G_{i}	Matrixwert zur kombinierten Berücksichtigung von Schadens- ausmaß und Schadensschwere [-] Gewichtung der Hauptgruppen der Schadensmerkmale nach	VS, Außerorts*: HVS, Innerort $SW_4 = 0, 5.I_0 + 0, 5.I_5$ $SW_6 = 0, 5.I_0$ $GW_4 = 0, 5.I_0 + 0, 5.I_4$ $GW_6 = 0, 5.I_0$
STDEV $\sigma(I_i)$	Belagsart [-] . Abkürzung Standardabweichung Standardabweichung der Einzelindizes	SS, ES Außerorts*:SS, ES Innero $SW_5 = I_0$ $SW_7 = I_0$ $GW_5 = I_0$ $GW_7 = I_0$
<i>n</i>	Anzahl Einzelindizes	*Anstelle von I0 kann auch I1 verwendet werden

	Formein									
Z	Zustandsklassen – Bezeichnung und Grenzen:									
	Note	Klasseneinteilung	Farben	SW						
	1	Gut [0-1,0)	Grün							
	2	Mittel [1,0-2,0)	Gelb							
	3	Ausreichend [2,0-3,0)	Orange							
	4	Kritisch [3,0-4,0)	Rot							
	5	Schlecht [4,0-5,0]	Braun							

Normierungsfunktionen:

Charakteristische Punkte:

Мазарий	Indexwert [-]						
Messgro	1,0	2,0	3,0	4,0			
Spurrinnen-	HLS	4	6	9	12		
tiefe (T)	HVS	5	8	12	18		
[mm]	VS/SS	6	10	16	24		
STDEV	HLS	1,4	2,2	3,5	5,5		
Winkelwert	HVS	1,8	3,0	4,6	6,5		
(s _w) [‰]	VS/SS	2,2	3,8	5,5	8,0		
Reibungs-	40 km/h	0,48	0,52	0,58	0,64		
koeffizient μ [-]	60 km/h	0,39	0,43	0,48	0,56		
(blockleftes Rad)	80 km/h	0,32	0,36	0,42	0,49		

Zusammengesetzte Indizies (Gesamtindizes):

Gesamtindex Oberfläch	enzus	tand (Substanz der
Beläge):		
GI_1 (aus I_0, I_2 und I_3)	oder	GI_2 (aus I_1 und I_2)

Gesamtindex Oberflächenzustand mit Griffigkeit (Verkehrssicherheit):

 GI_3 (aus I_0, I_3 und I_4) oder GI_4 (aus I_1 und I_4) Gesamtindex Oberflächenzustand mit Tragfähigkeit

(Substanz Oberbau): GI_5 (aus I_0, I_2, I_3 und I_5) oder GI_6 (aus I_1, I_2 und I_5)

Berechnung der zusammengesetzten Indizes:

$GI_i = \frac{1}{n} \sum (I_i) + k \cdot \sigma(I_i)$	k =1,25
-------------------------------------------------------	---------

Ermittlung von Substanz- und Gebrauchswerten nach Straßentyp, Geschwindigkeitsregime und Ortslage:

HLS, Geschwindigkeitslimite 120/100 km/h:

 $SW_1 = 0, 4.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 4.I_5$ $GW_1 = 0, 2.I_0 + 0, 1.I_2 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_4$ HLS, Geschwindigkeitslimite 80 km/h: $SW_2 = 0, 3.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_5$ $GW_2 = 0, 2.I_0 + 0, 3.I_3 + 0, 5.I_4$ HVS. Außerorts: $SW_3 = 0, 3.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_5$ $GW_3 = 0, 3.I_0 + 0, 2.I_3 + 0, 5.I_4$ HVS, Innerorts*: VS. Außerorts*: $SW_4 = 0, 5.I_0 + 0, 5.I_5$ $SW_6 = 0, 5.I_0 + 0, 5.I_5$ $GW_4 = 0.5 I_0 + 0.5 I_4$ $GW_6 = 0.5 I_0 + 0.5 I_4$

SS, ES Innerorts*:



59 Eigene Darstellung auf Basis von SN 640 925b (2003); SN 640 904 (2003); SN 640 926 (2005)

2.4.4 Vergleich und zusammenfassende Beurteilung

Ihrem Wesen nach sind die Zustandsbewertungsansätze aus Österreich, Deutschland und der Schweiz ähnlich. In den drei Ländern werden die aus der Erfassung ermittelten Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte mit einer Bewertungsskala transformiert, die in Österreich und Deutschland von 1 bis 5 bzw. in der Schweiz von 0 bis 5 reicht. Diese Normierung erfolgt in jedem Land in Abhängigkeit von den Anforderungen bzw. von der Straßenkategorie. Die Zustandswerte werden miteinander zu Teilwerten verknüpft, welche die Anspruchserfüllung in Bezug auf Fahrsicherheit, Komfort und Substanzerhalt ausdrücken. In Österreich und Deutschland werden die Teilwerte zu einem Gesamtwert zusammengefasst, der in der Maßnahmenoptimierung verwendet wird. In der Schweiz werden Erhaltungsmaßnahmen direkt auf Basis des tatsächlichen Schadensbildes projektiert, wobei ein Optimierungsalgorithmus aufgrund des ausreichenden Budgets früher nicht als notwendig angesehen wurde. Trotz der Ähnlichkeiten zwischen den Bewertungsverfahren ergeben sich gravierende Unterschiede durch die Erfassung von teilweise verschiedenen Merkmalen mit verschiedenen Messsystemen, die über verschiedene Normierungsfunktionen bewertet und nach verschiedenen Verfahren zu aggregierten Werten verknüpft werden.

Einzelrisse und Netzrisse werden in Österreich und Deutschland zu einer Zustandsgröße zusammengefasst. In Österreich werden die Einzelrisse über Multiplikation mit einer Einflussbreite von 0,5 m in Fläche umgewandelt. Die Rissbreite wird zusätzlich über Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. In Deutschland werden die von Rissen betroffenen Auswertefelder ermittelt, ohne auf die Schadensschwere Rücksicht zu nehmen. In der Schweiz findet eine quantitative Ermittlung von Schadensausmaß oder – schwere nicht statt (vgl. Abbildung 3). Das Zustandsmerkmal Oberflächenschäden in Österreich hat keine Analogie in den anderen zwei Ländern. In Deutschland werden Ausbrüche und Bindemittelaustritt zwar ermittelt, aber nicht weiter bewertet. In der Schweiz werden die Oberflächenschäden ebenso nicht wertmäßig erfasst. Daher ist ein Vergleich der Zustandsgrößen Risse und Oberflächenschäden nicht möglich.

Die Längsebenheit wird in Österreich und Deutschland durch Größen, die aus dem aufgenommenen Längsprofil abgeleitet werden, bewertet (IRI, AUN, LWI). In der Schweiz hingegen ist maßgebende Kenngröße (s_w-Wert) eine geometrische Charakteristik der Straße. Das Unebenheitsmaß (AUN) ist auch eine geometrische Größe, die aber nach einer Reihe von Berechnungsvorgängen ermittelt wird. Der IRI und der LWI drücken die Auswirkungen der Längsebenheit auf standardisierte Fahrzeuge. Die Berechnungsannahmen und –verfahren sind jedoch völlig unterschiedlich. Somit sind die Zustandsgrößen der Längsebenheit in den drei Ländern nicht direkt vergleichbar, da sie verschiedene Einheiten besitzen, verschiedene Unebenheitsformen berücksichtigen und auf verschiedene Berechnungsansätze beruhen.

Die Ermittlung der Spurrinnentiefe erfolgt auf Basis von Querprofilen, die mit verschiedener Genauigkeit in verschiedenen Längsintervallen registriert werden. Die Spurrinnentiefe wird in Österreich und Deutschland als der maximale Abstand zwischen einer simulierten 2 m-Latte und der Fahrbahnoberfläche definiert, während in der Schweiz eine 4 m-Latte als Bezugslinie verwendet wird (vgl. Tabelle 5). Die beiden Methoden liefern jedoch ähnliche Ergebnisse, ausgenommen sind untergeordnete Straßen mit stark ausgeprägter Spurrinnenbildung. Aufgrund der ähnlich ermittelten Zustandsgrößen können auch die Normierungsfunktionen für die Spurrinnen gegenübergestellt werden (Abbildung 5). Die schweizerische Normierungsfunktion bewertet die Spurrinnentiefe am strengsten. Spurrinnen ab ca. 5 mm (auf Autobahnen) wird in Deutschland eine schlechtere Note als in Österreich zugewiesen.



Abbildung 5: Gegenüberstellung von Normierungsfunktionen für Spurrinnen in AT, DE und in der CH

Die Zustandsgröße Griffigkeit wird in den drei Ländern nach verschiedenen Messprinzipien erfasst (vgl. Tabelle 4). Die Erfassung der Griffigkeit erfolgt in Österreich mit konstantem Schlupf, in Deutschland – mit schräggestelltem Messrad und in der Schweiz – mit blockiertem Messrad. Trotz umfangreicher empirischer Versuche und internationaler Vergleichsmessungen in der Vergangenheit können keine generellen zuverlässigen Korrelationsgleichungen abgeleitet werden. Daher ist ein direkter Vergleich der erfassten Reibungsbeiwerte nicht ohne weiteres zulässig.

Die Bewertung der Merkmale Spurrinnen und Griffigkeit wird auf Basis von Zustandserfassungen auf Landesstraßen B gemäß Abbildung 7 (Netzebene) und Abbildung 8 (Abschnittsebene) gegenübergestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird auch die deutsche Bewertungsskala in 5 anstatt in 4 farblich gekennzeichnete Zustandsklassen eingeteilt. Die erfassten Daten werden mit den Normierungsfunktionen für Funktionsklasse 2 (FK 2) in Deutschland bzw. für Hauptverkehrsstraßen (HVS) in der Schweiz bewertet, die jeweils das zweitstrengste Anforderungsniveau darstellen. Es ist jedoch anzumerken, dass die Definitionen der Straßenkategorien in den verschiedenen Ländern nicht völlig übereinstimmen. Das Beispiel zeigt, dass eine vollständige Modellierung des Zustandes auf Netzebene nur durch die Summenlinien und nicht durch die Zustandsklassen möglich ist. Ferner sind auch die Auswirkungen des visuellen Erfassungsverfahrens auf Datendichte und -schärfe (Spurrinnen) dargestellt. Für die Bewertung der Griffigkeit nach dem deutschen Verfahren wird ein alternativer Bewertungshintergrund (1984) für das Messverfahren SRM verwendet, der wegen des gleichen Messprinzips mit dem schweizerischen Bewertungshintergrund für den Skiddometer vergleichbar ist. Da das Niveau der Reibungsbeiwerte mit dem gebremsten Rad wesentlich über demjenigen der Werte mit dem blockierten Rad liegt, kann festgestellt werden, dass der Mindestwert für die Griffigkeit in Österreich zu niedrig im Vergleich zu den Mindestanforderungen in Deutschland und der Schweiz ist.

Ein Vergleich der ermittelten Teil- und Gesamtwerte liefert keine Information über das tatsächliche Schadensausmaß oder –schwere. Die Bildung von Gesamtwerten erlaubt nur einen Überblick über relativ bessere oder schlechtere Straßenabschnitte und ist auch für Laien verständlich. Eine Ermittlung von optimalen Maßnahmen auf dieser Basis ist aber erschwert (Abbildung 6).

Bsp. : Auswertung von Zustandsgrößen und Zusammenfassen einzelner Zustandswerte zum Gebrauchswert (AT und DE)

Aus Zustandserfassungen auf Asphaltautobahnen sind für die Berechnung des Gebrauchswertes in AT und DE relevanten Zustandsgrößen bekannt. Diese Größen sind nach den Verfahren der Länder zu normieren und zum Gebrauchswert zu aggregieren.

A	Auswertung lt. VIAPMS (Tabelle 6) - Österreich									
Normierung (Zustandsgrößen → Zustandswerte)										
	Abschn	itt 1			Abschi	nitt 2				
	ZG	ZW			ZG	ZW				
SR	18,1mm	4,17		SR	2,3 mm	1,40				
GR	0,43	3,79		GR	0,69	1,90				
LE	1,8 m / km	2,40		LE	4,1 m / km	4,19				
OS	25%	3,19		OS	38%	4,33				
		Bild	ung des Ge	brauch	swertes					
GI	ner	4,45		GI _{Sicl}	her	1,94				
GI _{Kor}	nfort	2,54		GI _{Kor}	nfort	4,50				
GI		4,60		GI		4,60				

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Die sicherheitsrelevanten Merkmale (SR, GR) sind auf Abschnitt 1 im schlechten bzw. auf Abschnitt 2 im guten Zustand. Aufgrund des gleichen Teilwerts ist jedoch eine Reihung bzw. Ermittlung der Dringlichkeit nicht möglich
- Auf beiden Abschnitten sind verschiedene Maßnahmen anwendbar (z.B. Dünnschichtdecke hat keine Auswirkung auf LE und ist nur auf Abschnitt 1 anwendbar)

Auswertung lt. ZTV-ZEB (Tabelle 7) - Deutschland

Normierung (Zustandsgrößen → Zustandswerte)

	Abschn	itt 1			Absch	nitt 2	
	ZG	ZW			ZG	ZW	
AUN	1,6 cm ³	2,10		AUN	$5,9\mathrm{cm}^3$	3,98	
SPT	4,4 mm	1,63		SPT	16,5mm	4,15	
SPH	0,7 mm	1,81		SPH	5,2 mm	4,10	
GRI	0,33	4,36		GRI	0,37	3,79	
		Bild	ung des Ge	brauchs	wertes		
TWGE	EB	4,36		TWGI	EB	4,36	

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Auf Abschnitt 1 sind ausschließlich Griffigkeitsmängel festzustellen → kostengünstige Instandhaltungsmaßnahmen sind anwendbar (Fräsen, Oberflächenbehandlung, etc.)
- Auf Abschnitt 2 sind alle Zustandsmerkmale beeinträchtigt → Instandhaltungsmaßnahmen reichen in vielen Fällen nicht aus
- Der Gebrauchswert ist wegen der Durchschlagsregel gleich

Zusammenfassung:

- Völlig unterschiedliche Kombinationen von Schadenstypen ergeben den gleichen Teilwert bzw. Gesamtwert, der mehr oder weniger ein willkürliches Ergebnis darstellt
- Dadurch wird aber die Nachvollziehbarkeit Beanspruchung
 → Schaden → Ma
 Ma
 Bnahmen unterbrochen eine Anpassung
 von Ma
 Bnahmen auf dieser Basis ist nicht sinnvoll m
 m
 glich

Abbildung 6: Ermittlung des gleichen Teilwerts aus völlig unterschiedlichen Schäden bzw. Zustandswerten

Bsp.: Vergleich der Zustandsbewertungsansätze aus Österreich, Deutschland und der Schweiz auf Basis erfasster Daten für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit mittels Summenlinien (Netzebene)

Die Zustandsbewertungsansätze aus Österreich, Deutschland und der Schweiz sind für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit auf Basis von Daten aus der messtechnischen (2000-2001) und den visuellen (2008 und 2012) Zustandserfassungen auf Landesstraßen B im Land Steiermark zu vergleichen. Um ein vollständiges Schadensbild zu vermitteln, sollen die Summenhäufigkeiten der Zustandsgrößen berechnet, graphisch dargestellt und durch eine stetige Verteilung mathematisch beschrieben werden. Unterhalb der Summenlinien wird der prozentuale Anteil der Abschnitte in einer Zustandsklasse gemäß dem entsprechenden Bewertungshintergrund anhand von Balkendiagrammen angezeigt.



Abbildung 7: Vergleich von Normierungsfunktionen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit auf Basis von erfasster Zustandsdaten (Netzebene)

Bsp.: Vergleich der Zustandsbewertungsansätze aus Österreich, Deutschland und der Schweiz auf Basis erfasster Daten über Spurrinnen und Griffigkeit mittels Streckenbändern (Abschnittsebene)

Die Zustandsbewertungsansätze aus Österreich, Deutschland und der Schweiz sind für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit auf Basis von Daten aus der messtechnischen (2000-2001) und den visuellen (2008 und 2012) Zustandserfassungen auf Landesstraßen B im Land Steiermark zu vergleichen. Der exakte Verlauf der registrierten Messwerte (Spurrinnentiefe und Reibungsbeiwert) ist für einen Messabschnitt anhand von Streckenbändern darzustellen, die auch die zugehörige Farbdarstellung der Zustandsklassen gemäß Bewertungshintergrund enthalten. Die Auswirkungen einer visuellen Erfassung werden anhand eines zweiten Abschnittes mit vergleichbarer Länge veranschaulicht.



Abbildung 8: Vergleich von Normierungsfunktionen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit auf Basis von erfasster Zustandsdaten (Abschnittsebene)

2.4.5 Ausfallskriterien und Lebensdauer

Die bestehenden Erhaltungsmanagementsysteme definieren die untere Grenze der schlechtesten Zustandsklasse als Schwellenwert oder Ausfallsgrenze. Nach Überschreitung dieses Zustandes kann der Straßenabschnitt die ihm zugedachte Funktion nicht mehr erfüllen, d.h. der Abschnitt fällt aus und es sind Erhaltungsmaßnahmen erforderlich, um die Gebrauchstauglichkeit wiederherzustellen. Dabei kann zwischen strukturellem (Setzungen, Netzrisse, etc.) und funktionellem (Griffigkeits-, Ebenheitsmängel, etc.) Ausfall unterschieden werden.

Bei einem bekannten Zustandsverlauf bestimmt die Ausfallsgrenze automatisch auch die mittlere Lebensdauer des Straßenoberbaus (Zeit in Jahren bis Erreichen des Schwellenwertes). Ferner erlaubt eine systematische Gegenüberstellung von Normierungs- und Zustandsfunktionen Rückschlüsse auf maßgebende Ausfallsursachen und merkmalspezifische Lebensdauer⁶⁰. Sind aber die Schwellenwerte ohne nähere Begründung festgelegt, kann dies zur Verlust an Lebensdauer führen⁶¹ (vgl. Abbildung 9). Daher sollen die fixen Ausfallsgrenzen bei nicht sicherheitsrelevanten Schäden entfallen, wobei die Ermittlung des optimalen Eingriffszeitpunktes eine ausschließlich ökonomische Aufgabe bleibt. Bei Schäden mit Auswirkungen auf die Straßennutzer sollen auch die Nutzerkosten und die gesetzlichen Mindestwerte mitberücksichtigt werden.

Die bestehenden Bewertungshintergründe und Ausfallsgrenzen unterscheiden sich erheblich nach Land und Erhaltungsmanagementsystem. Sie basieren auf Expertenbefragungen, Häufigkeitsverteilungen, gesetzlichen Grenzwerten und seltener auf wissenschaftlich fundierten Überlegungen (vgl.



Abbildung 9: Begrenzung der mittleren Lebensdauer des Straßenoberbaus durch die Festlegung von willkürlichen Schwellenwerten

Kap. 2.4.1 bis Kap. 2.4.3). Da die Zustandsverteilungen nur eine Momentaufnahme darstellen, sind die entsprechenden Quantile zeitlich instabil und je nach Land und Netz stark unterschiedlich. Die 5%-Quantile der Griffigkeitswerte aus der bundesweiten Zustandserfassung auf Landesstraßen B 2001-2002 in Österreich zum Beispiel variieren von 0,36 (Burgenland) bis 0,71 (Salzburg)⁶². Daher sind die Grenzwerte auf Basis von Häufigkeitsverteilungen willkürlich.

Bestehende Schwellenwerte für den Straßenoberbau von Autobahnen und Schnellstraßen in ausgewählten Ländern sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Die angegebenen Grenzwerte werden je nach Land entweder in den Normen bzw. Richtlinien verankert und/oder als Klassengrenzen im Rahmen des Erhaltungsmanagementsystems verwendet und besitzen somit ein unterschiedliches Maß an Verbindlichkeit. Die häufigsten Ausfallskriterien sind die Spurrinnentiefe, die Längsebenheit (IRI) und die Griffigkeit. Für die Bewertung der Risse und der Oberflächenschäden werden meistens zusammengesetzte Indizes verwendet, die nicht eindeutig in ein maximal zulässiges Schadensausmaß umgerechnet werden kön-



⁶⁰ vgl. HOFFMANN, M. (2006) S47-66

⁶¹ vgl. HOFFMANN, M. (2013a); HOFFMANN, M. (2013c)

⁶² vgl. GRUBER, J. et al. (2004) \$35-36

nen. In einigen Ländern wird allerdings die von Netz- oder Ermüdungsrissen geschädigte Fläche als Prozent von der Abschnittsfläche limitiert und als ein zentrales Kriterium für die Dimensionierung bzw. für das Erreichen der strukturellen Lebensdauer verwendet. Die Ausfallsgrenze für die Spurrinnentiefe hat eine hohe Bedeutung auf Autobahnen (Aquaplaninggefahr) und bewegt sich zwischen 13...30 mm. Der International Roughness Index (IRI) wird von den Straßenbetreibern am häufigsten zur Beschreibung der Längsebenheit verwendet, wobei die Grenzwerte zwischen 1,5 und 7,0 m/km schwanken. Die Mindestwerte für die Griffigkeit werden meistens normativ geregelt und unterscheiden nur in wenigen Ländern (z.B. Vereinigtes Königreich) zwischen verschiedenen Straßenkategorien. Die Griffigkeitswerte sind jedoch wegen der verschiedenen Messverfahren und z.T. verschiedener Messgeschwindigkeit (in der Tabelle meist 60 km/h) nicht direkt vergleichbar. Die Mindestwerte z.B. für SCRIM (vgl. Kap. 2.3.2) variieren im Bereich von 0,25 bis 0,40.

Die in diesem Kapitel beschriebene Zustandserfassung und –bewertung stellt nur eine Momentaufnahme dar. Daher ist auch die Entwicklung dazwischen (Maßnahmen gesetzt Ja/Nein) und nach der Erfassung (Zustandsprognose) sehr wichtig. Im nachfolgenden Kapitel werden ausgewählte Aspekte der Prognose der Zustandsentwicklung ohne Maßnahmen behandelt.

Tabelle 9: Bestehende Ausfallskriterien (auch: Schwellenwerte o. Auslösewerte) für Asphaltdecken von Straßen des Hauptverkehrsnetzes in verschieden Ländern⁶³

Land	Spurrinnentiefe SPT [mm]	Längsebenheit IRI [m/km]	Griffigkeit μ[-]	Ermüdung NR [%]
AUSTRALIEN (AU)	25	7,0	0,35 (SCRIM)	5
BELGIEN (BE)	16	3,8	0,40 (SCRIM)	
DÄNEMARK (DK)	15	3,5	0,40 (ROAR)	_
DEUTSCHLAND (DE)	20	Spektrale Dichte	0,37 (SCRIM)	10
FINNLAND (FI)	16 (17-19)	2,5 (2,8-3,6)	0,60 (TIE 475)	
FRANKREICH (FR)	20	Wellenlänge (APL)	0,45 (SCRIM)	10
KANADA (CA)	15	1,5	0,25 (SCRIM)	_
KROATIEN (HR)	20	5,0	(Grip Tester)	
NIEDERLANDE (NL)	18	3,5	0,37 (DWW-Trailer)	30
NORWEGEN (NO)	20	3,5	0,40 (ROAR)	30
ÖSTERREICH (AT)	20	4,5	0,38 (RoadSTAR)	10
POLEN (PL)	30	5,7	0,29 (SRT-3)	_
SERBIEN (RS)		5,5	0,50 (SRT)	
SCHWEDEN (SE)	13	2,4	0,50 (Skiddo BV 11)	10
SCHWEIZ (CH)	12	STDEV Winkelwert	0,39 (Skiddometer)	_
SLOWENIEN (SI)	18	3,1	0,39 (SCRIM)	_
TSCHECHISCHE REPUBLIK (CZ)	22	5,1	0,34 (TRT)	
UNGARN (HU)	18	4,5	(RST)	25
VEREINIGTE STAATEN (US)	18	2,7	0,30 (ASTM E 274)	20
VEREINIGTES KÖNIGREICH (GB)	20	Varianz des Längsprofils	0,35 (SCRIM)	

⁶³ Eigene Darstellung u.a. auf Basis von COST 354 WP 2 (2007); HÅNDBOK R610 (2014) S29,30; OECD (2005) S21; VAN DER SLUIS, S.(2002) S33; WRA (2012); JACOT, A. et al. (2007)

3 Zustandsprognosemodelle

3.1 Überblick Zustandsprognosemodelle für den Straßenoberbau

Die Prognose oder Prädiktion ist eine mit Unsicherheit behaftete Aussage über die Zukunft, die diskrete Ereignisse oder kontinuierliche Entwicklung betreffen kann. Äußerungen über Ereignisse, die schon vergangen aber unbekannt sind, werden als Retrognose oder Retrodiktion bezeichnet. In Abhängigkeit von der Systemlebensdauer können die Prognosen kurz-, mittel- und langfristig orientiert sein. Die Anforderungen an eine relevante Prognose sind⁶⁴:

- Nichttrivialität: Keine evidenten oder beliebigen Aussagen ohne qualitative oder quantitative Ausprägung; Angabe von Zeithorizont(en)
- **Objektivität:** Beschreibung der ausgewählten Methoden, Rahmenbedingungen und Ergebnissen möglichst unabhängig von subjektiven Meinungen oder Präferenzen
- **Reliabilität:** Berechnung von (ex ante) Prognoseintervallen und Risikobewertung
- Validität: Bestimmung der Güte der Prognose für den aufgestellten Zweck

Im Erhaltungsmanagement spielt die Prognose eine zentrale Rolle. Der Straßenzustand verschlechtert sich durch die Beanspruchung über die Zeit in der Nutzungsdauer, was die Planung und Durchführung von Maßnahmen zur Erhaltung der bestehenden Infrastruktur erfordert. Die Zustandsentwicklung und Erhaltungsgeschichte in der Vergangenheit sind unumkehrbar. In der Gegenwart können nicht alle Straßenabschnitte aus Zeit-, Kosten- und Ressourcengründen saniert werden. Deshalb wird für die Ermittlung des optimalen Eingriffszeitpunkts sowie für die Beurteilung von verschiedenen Handlungsalternativen eine Zustandsprognose benötigt. Die wesentlichen Einflussfaktoren bei diesen Entscheidungen sind Lebensdauer, Restlebensdauer, Zeitpunkt und Ausmaß der Investitionen bzw. resultierende Erträge. Die Prognose des Straßenzustandes erfolgt auf Projekt- (Einzelabschnitt) und Netzebene. Auf Projektebene ist die für ein Bauprojekt optimale Maßnahme oder Maßnahmenkombination zur vorhanden Schadenskombination zu ermitteln, auf Netzebene ist das gesamte Maßnahmenbedarf (Art und Ausmaß der Maßnahmen) zu schätzen. In der Literatur und Praxis des Erhaltungsmanagements erfolgen Prognosen des Straßenoberbaus auf unterschiedlicher Basis:

- Prognose eines Einzelmerkmals auf Basis von Zustandsgrößen
- Prognose eines Einzelmarkmals auf Basis von Zustandswerten
- Prognose des Gesamtzustandes auf Basis aggregierter Zustandsindizes

Der zweite Ansatz macht die Zuordnung von Maßnahmen schwierig (vgl. Kap. 3.2.2) und der dritte Ansatz unmöglich, da der Zusammenhang Ursache \rightarrow Schaden \rightarrow Maßnahme verloren geht. Die Anwendung der Prognose auf den Gesamtzustand auf Basis von zusammengesetzten Indizes (z.B. Pavement Condition Index PCI, etc.) ist vor allem in den USA verbreitet. Da der Verschlechterungsprozess für die unterschiedliche Schadenstypen nach verschiedenen physikalischen Mechanismen (verschiedene Einflussfaktoren) abläuft, ist es vielmehr zweckmäßig, getrennte Modelle für die einzelnen Schadenstypen (z.B. Risse, Griffigkeit, Spurrinnen, etc.) zu entwickeln. Außerdem kann das Alter (Zeit seit der letzten Maßnahme) für die verschieden Schadensmerkmale verschieden sein. Wechselwirkungen zwischen den Schadensarten und gemeinsame Lebensdauer lassen sich nach speziellen Methoden berücksichtigen (z.B. Competing Risks Theory).

Generell weist die Entwicklung der Spurrinnen einen degressiv bis linearen Charakter auf. Der Anstieg bei Oberflächenschäden und Längsebenheit ist linear bis leicht progressiv. Bei Netz- und Längsrissen ist einen mit der Zeit progressiven Zustandsverlauf zu erwarten. Über die zeitliche Entwicklung der Tragfähigkeit und der Griffigkeit sind in der Literatur keine einheitlichen Aussagen zu finden. Diese Merkmale sind stark von anderen Schadenstypen abhängig weshalb ihre Entwicklung theoretisch schwierig zu beschreiben ist⁶⁵.

⁶⁴ vgl. HOFFMANN, M. (2014); ARMSTRONG, J.S. (2001) S679-732; GREENE, W.H. (2012) S80

⁶⁵ vgl. u.a. BECKEDAHL, H.-J. (2010) S196-198; HOFFMANN, M. (2013)

Die Zustandsentwicklung von Straßenanlagen basiert auf komplexen physikalischen Prozessen, die nicht direkt beobachtbar sind. Beobachtbar sind die Auswirkungen dieser Prozesse – die Zustandsdaten, die Bedingungen bei denen die Prozesse verlaufen – Klimadaten, Eigenschaften, die die Prozesse beschleunigen oder verzögern (Strukturdaten), andere Faktoren, die Prozesse beeinflussen – Verkehrsdaten. Um diese Informationen und die Zusammenhänge systematisch zu behandeln und für Prognosen über die Zustandsentwicklung zu verwenden, braucht man ein Modell. Ein Modell ist im Allgemeinen vereinfachte Darstellung der Realität um diese einfacher handhaben zu können. Eine spezifische Form der Darstellung sind mathematische Modelle – z.B. eine Gleichung oder System von Gleichungen. Im Modell muss zumindest eine Variable "von Interesse", die prognostiziert werden soll enthalten sein. Dabei werden Annahmen über die funktionelle Form der Beziehung, über die Variablen und über die Parameter in den Gleichungen getroffen.

Im Zusammenhang mit dem Prozess der Zustandsveränderung von Straßenanlagen und nach dem Zweck des Modells wird zwischen Erklärungsmodellen und Prognosemodellen unterschieden. Erklärungsmodelle versuchen das Systemverhalten möglichst vollständig zu beschreiben, um Erkenntnisse für die Dimensionierung, die Verkehrsführung und/oder die Optimierung von Materialien zu gewinnen. Die weiteren Betrachtungen beziehen sich auf die Prognosemodelle, die für Lebenszyklusbetrachtungen wichtig sind. An Prognosemodellen in einem Erhaltungsmanagementsystem können folgende Anforderungen gestellt werden:

- **Prognoseeignung:** Das Modell soll nicht nur eine bestmögliche Anpassung an die vorhandenen Daten im Wertebereich gewährleisten, sondern auch eine gute Prognosekraft besitzen.
- **Physikalische Plausibilität:** Die Vorzeichen der berechneten Parameter und die Stärke des Einflusses der entsprechenden Größen sollen dem physikalischen zugrundeliegenden Zusammenhang zwischen den Variablen nicht widersprechen (besonders bei mehr als eine Einflussvariable zu beachten vgl. Kap. 3.3.3).
- **Robustheit & Simplizität:** Das Modell soll möglichst wenig Variablen enthalten, wenn deren Erfassung und Prognose mit großer Unsicherheit oder mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden ist. Bei Verletzung der Modellannahmen, bei fehlenden oder zensierten Daten soll das Modell immer noch nützliche Ergebnisse liefern.
- **Probabilität:** Das Modell soll Rücksicht auf der stochastischen Natur der Prozesse nehmen und Unsicherheit im theoretischen Wissen und Modellbildung zu einem Konfidenzniveau berücksichtigen. Verschiedene "what-if" Szenarien sollen mit den Modellen durchgespielt werden können, um Optimierungsaufgaben zu lösen.
- Entscheidungsorientierung: Die Ergebnisse der Prognose sollen die Ingenieure bei der Entscheidungsfindung unterschützen.
- **Datenerfordernis:** Das Modell soll mit möglichst wenig Daten kalibriert werden und beim Vorhandensein von neuen Messungen soll die Prognosegenauigkeit erhöht werden.

Der erste Teil der letzten Anforderung steht im Widerspruch mit dem Anspruch an Genauigkeit. Im allgemeinem ist ein Optimum zwischen Aufwand für Datenerhebung und dem zusätzlichen Nutzen (Kostenersparung, Risikominderung) durch bessere Prognosen zu finden.

Mathematische Modelle können nach verschiedenen Merkmalen klassifiziert werden⁶⁶. Eine für Zustandsprognosemodelle von Infrastrukturobjekten relevante Einteilung ist:

- Empirische vs. mechanistische Modelle
- Deterministische vs. stochastische Modelle
- Stetige vs. diskrete Modelle
- Zeitinvariante (stationäre) vs. zeitvariante (instationäre) Modelle
- Statische (steady state) vs. dynamische Modelle

⁶⁶ vgl. VELTEN, K. (2009) S39-44; REDDY, T.A. (2011) S5-10

3.1.1 Empirische vs. mechanistische Zustandsprognosemodelle

Mechanistische Modelle

Mechanistische Modelle kombinieren Laborversuche (Materialverhalten) und numerische Modellierung (Responseverhalten) um den Prozess der Zustandsverschlechterung physikalisch zu beschreiben. Sie werden oft in der Literatur⁶⁷ als "white-box"-Modelle bezeichnet, da die zugrundeliegenden Mechanismen in der Modelbeschreibung erkennbar sind. Einerseits sind diese Modelle mit der kostspieligen Feststellung von vielen Parametern verbunden, andererseits lassen sich die komplexen Verschlechterungsprozesse nur schwer analysieren. Die getroffenen Modellannahmen und die geringeren Streuungen unter Laborbedingungen führen zu Abweichungen von den empirischen Daten. Aus den oben genannten Gründen sind zurzeit rein mechanistische Modelle für ein Erhaltungsmanagementsystem kaum geeignet.

Empirische Modelle

Die weltweit am meisten verbreiteten Modelle sind empirisch aus Erfassungen des Ist-Zustandes des Straßenoberbaus abgeleitet. Die Modellformulierung erfolgt nur aufgrund von experimentalen Daten und der Schädigungsprozess wird als "black-box" behandelt. Die Bezeichnung impliziert, dass der physikalische Prozess unbekannt oder mathematisch schwierig zu beschreiben ist. Es wird versucht, üblicherweise durch Regressionsanalyse einen Zusammenhang zwischen Schadensausmaß und verschiedenen Einflussgrößen (erklärenden Variablen) festzustellen. Diese Einflussgrößen sind entweder in einer PMS-Datenbank enthalten (Schichtdicke, strukturelle Kennzahl) oder werden extern (Verkehrs- und Klimadaten) gesammelt. Der errechnete empirische Zusammenhang wird dann als Basis für die Prognose verwendet. Die Auswahl der im Modelle enthaltenen Variablen erfolgt durch statistische Prüfkriterien (z.B. t-Statistik). Das kann zur Folge haben, dass relevante Einflussfaktoren aufgrund niedriger statistischer Signifikanz vernachlässigt werden. Ähnlich werden physikalisch nicht relevante Variablen, die in der Stichprobe statistisch signifikant sind, im Regressionsmodell einbezogen. Damit kommt es unvermeidlich zu unvollständigen oder verzerrten Modellformulierungen. Die meisten Modelle beruhen auf einer stetigen deterministischen Zustandsentwicklung, die von einem Faktor (Verkehr oder Zeit) abhängig ist. Gewählt wird anschließend die Modelform, die die beste Anpassung an die Daten ermöglicht (z.B. mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß R^2). Alternativ zur Regressionsanalyse werden bei Modellen auf Basis von Markov-Ketten weder Modellform noch Einflussgrößen bestimmt. Alle lokalen Effekte sollen indirekt über die Schadensverschlechterung abgebildet werden. Da die empirischen Modelle für spezifische Bedingungen abgeleitet werden, ist ihre Gültigkeit nicht ohne weiteres auf andere Bedingungen übertragbar.

Mechanistisch-empirische Modelle (M-E)

Während in Deutschland und Österreich Modelle auf empirischer Basis bevorzug werden, haben mechanistisch-empirische Modelle in den USA stark an Bedeutung gewonnen. Sie werden als "greybox"-Modelle bezeichnet und beruhen z.T auf empirischen und mechanistischen Prinzipen. Unter Eingabe von Geometrieparameter, Materialeigenschaften und Belastungsbedingungen (Verkehr) werden durch Response-Modelle (linear-elastische Schichtmodelle oder Finite Elementen-Modelle) die resultierende Spannungen und Dehnungen analytisch berechnet. Die Materialeigenschaften werden normalerweise aus Laborversuchen abgeleitet. Klimaeinflüsse können durch ihre Auswirkungen auf das Material mit berücksichtigt werden. Liegen saisonale FWD-Tragfähigkeitsmessungen vor, können Umwelteinflüsse alternativ durch die Variation der E-Moduli der verschiedenen Schichten abgebildet werden. Die berechneten kritischen Parameter nach Schadenstyp werden dann über Transferfunktionen in zulässige Anzahl an Lastwechsel umgewandelt. Die Transferfunktion sind somit die Verbindung zwischen das Gebrauchsverhalten des Oberbaus und seine theoretische Lebensdauer. Eine Möglichkeit diese in Laborbedingungen abgeleitete Funktion auf einen konkreten Abschnitt zu übertragen ist die Verwendung von "shift"-Faktoren auf Basis von empirischer Korrelation zwischen ermittelte zulässige Lastwechsel und dem tatsächlichem Schadensbild. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, Erfassungsdaten direkt für die Kalibration der Koeffizienten der Transferfunktion zu verwenden. Auf diese Methode wird hier nicht näher eingegangen⁶⁸.

⁶⁷ vgl. HANGOS, K. et al. (2001) S10, 23-14; VELTEN, K. (2009) S34-38

⁶⁸ vgl. TIMM, D.H. et al. (2003)

Empirisch-mechanistische Modelle (E-M)

Wenn der physikalische Prozess hinter einer Schadensentwicklung schwierig zu beschreiben oder unbekannt ist, treten empirisch-mechanistische Modelle in den Vordergrund. Bei diesen Modellen werden Zustandsfunktion (Form) und Zustandsprädiktoren (erklärende Variablen) anhand von theoretischen Überlegungen gewählt. Die Modellparameter werden aus empirischen Zustandsdaten durch statistische Verfahren ermittelt. Der Vorteil dieser Modelle ist, dass sie wenige Inputgrößen voraussetzen, die ohnehin gewöhnlich aus Erfassungen vorhanden sind. Das bestimmt ihre Eignung zur Zustandsprognose auf Netzebene. Auf Projektebene, wo die Sammlung detaillierter Information zumutbar ist, können mechanistisch-empirische Modelle (M-E) gewisse Vorteile haben⁶⁹.

Ein Überblick über die Prognosemodelle nach der Herleitung wird in Abbildung 10 gegeben bzw. findet sich in der weiterführenden Literatur⁷⁰. Empirische Modelle erfordern weniger Zeit, Aufwand und Kosten und sind theoretisch immer anwendbar. Der Vorteil der mechanistischen Modelle besteht darin, dass ihre Parameter meist eine physikalische Bedeutung haben. Mechanistische Modelle erlauben im Prinzip bessere Aussagen über die Zukunft, da sie auf Stoffgesetzen beruhen, wobei die Gültigkeit der empirischen Modelle meist im Wertebereich der Erfassungsdaten begrenzt ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Kombination aus mechanistischen und empirischen Prinzipen nach dem Stand des Wissens derzeit die höchste Zuverlässigkeit in den Prognosen ermöglicht.





⁶⁹ vgl. MADANAT, S. et al. (2005)

vgl. NAKAT, Z. et al. (2006) S63-67; PROZZI, J.A. (2001) S18-21; WENINGER-VYCUDIL A. et al.(2009) S65; UDDIN, W. (2006) 18-26; SOCINA, M. (2007) S154-156

3.1.2 Deterministische vs. stochastische Zustandsprognosemodelle

Deterministische Modelle beruhen auf die Annahme, dass alle Faktoren, welche die Zustandsentwicklung des Straßenoberbaus beeinflussen, bekannt, quantifizierbar und genau messbar sind. Die Sequenz von Zuständen, die der Verschlechterungsprozess annimmt, ist vorbestimmt und immer gleich. Damit ist das Modell komplett durch die Inputinformation definiert. Wird für die abhängige Variable auch ein Konfidenzintervall berechnet, werden die Modelle als deterministisch-stochastisch bezeichnet.

Stochastische Modelle beruhen auf der Annahme, dass sowohl die der Schädigung zugrunde liegenden Prozesse, als auch die Beobachtung der aufgetretenen Schäden mit Unsicherheit behaftet sind. Weiters können einzelne Faktoren gemeinsam eine Schädigung bewirken, wobei der jeweilige Teil des Einflusses nicht mehr eindeutig zuordenbar ist (Multikollinearität). Zudem sind die Einflussfaktoren allein Zufallsvariablen mit einer Verteilung (z.B. Verkehr). Es handelt sich um Prozesse, die ein Maß an Zufälligkeit aufweisen, und mit Unsicherheit in der Modellierung verbunden sind. Diese Unsicherheit hat verschiedene Quellen⁷¹:

- Aleatorische Unsicherheit: Nicht vorhersehbare dem physikalischen Prozess inhärente Streuung, Variabilität in den Materialkennwerten, Bauausführung, Untergrundverhältnisse und Belastung
- Epistemische Unsicherheit: Unvollständiges Wissen, Modellfehler, fehlende Variablen, Modellannahmen und Vereinfachungen
- Unsicherheit in den Daten: Messfehler und Ungenauigkeit bei der Erfassung der erklärten und der erklärenden Variablen, Auswahlfehler (Repräsentativität der Stichprobe), beschränkte Anzahl von Messwerten, Diskretisierung (Notenskala), qualitative Bewertung (Nominalskala)
- Kognitive Vagheit: Subjektive Benotung

Die aleatorische Unsicherheit kann nicht in den Griff bekommen werden oder nur sehr begrenzt durch strengere Kontrolle und Qualitätssicherung. Die anderen Unsicherheiten können durch verfeinerte Messmethoden, Sammlung zusätzlicher Messwerte, Entwicklung von besseren Modellen reduziert werden. Alle Arten von Unsicherheit können in den stochastischen Modellen berücksichtigt werden. Im Allgemeinen ist die Unsicherheit auch eine Funktion der Zeit und erhöht sich mit Verlängerung des betrachteten Zeitintervalls in die Zukunft oder in die Vergangenheit.

	Merkmal		Deterministische Modelle		Stochastische Modelle
1.	Modellspezifikation	1.	Alle Faktoren, die den Zustand beeinflussen, sind bekannt und messbar	1.	Die Faktoren, die den Zustand beeinflussen, sind nie vollständig bekannt oder genau messbar
2.	Bestimmbarkeit der unabhän- gigen Variablen	2.	Unabhängige Variablen haben keine Verteilung	2.	Unabhängige Variablen sind Zufallsgrößen mit Verteilung
3.	Modellparameter	3.	Modellparameter sind bekannt und haben keine Verteilung	3.	Modellparameter sind stochastisch verteilt
4.	Wiederholte Anwendung	4.	Gleiche Bedingungen \rightarrow immer das gleiche Ergebnis	4.	Gleiche Bedingungen \rightarrow verschiedene Ergebnisse
5.	Anzahl Zustände zum Zeit- punkt <i>t</i>	5.	Genau ein Prognosezustand zum Zeitpunkt t	5.	Verschiede Zustände mit Eintrittswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t
6.	Berücksichtigung von Zensur	6.	Berücksichtigung von Ereignissen, die nur während der Beobachtungsperiode auftreten \rightarrow Bias	6.	Möglichkeiten zur Berücksichtigung von zensierten Daten
7.	Modelprämisse	7.	Sicherheit & Gewissheit	7.	Sicherheit & Ungewissheit

Taballa	10.	C	111 a	11		1	: l	l	at a al.		- N/L.	- 1-11	1
гарене	10:	tregen	inpersie	iiiing '	von	deferminist	ischen	una	stocn	isnschei	1 1/1/10	oner	ien
I usene	T O.	Cogen	acerste.	mang	, 011	acterminot	noenen	ana	broom	abtibellel	1 111	Juch	1011

⁷¹ vgl. REDDY, T.A. (2011) S18-19



Abbildung 11: Überblick stochastische und deterministische Zustandsentwicklung in diskretem bzw. stetigen Zeitund Zustandsraum

Eine genereller Überblick und Gegenüberstellung von ausgewählten deterministischen und stochastischen Modellen ohne Anspruch auf Vollständigkeit ist in Tabelle 10 bzw. graphisch in Abbildung 11 gegeben. Die Menge an Zuständen, die ein Prozess aufnehmen kann, wird als Zustandsraum bezeichnet. Wenn die Zustände diskret sind, wird der Prozess als Kette bezeichnet. Diskrete Zustände ergeben sich durch Bewertung des Zustandes mit Noten z.B. bei der Prüfung einer Brücke oder bei dichotomen Variablen, die nur zwei Ausprägungen haben, z.B. Entwässerung funktionsfähig {ja, nein}. Modellen mit diskreten Zeitschritten sind durch die Länge des Erfassungsintervalls geprägt.

Die Modelle können dem Verlauf nach weiters in diskrete und stetige geteilt werden. Können Ereignisse zu jedem Zeitpunkt auftreten, so spricht man von zeitstetigen Modellen. Wenn das System neue Zustände nur zu bestimmten Zeitpunkten annehmen kann, so spricht man von zeitdiskreten Modellen. Der Zustandsraum kann auch als diskret (abzählbare Zustände) oder stetig (unendlich viele Zustände) charakterisiert werden.

Instationäre Modelle sind abhängig von der Zeit t_0 , zu der der beobachtete Prozess beginnt. Wenn der Prozess invariant gegenüber eine Verschiebung in der Zeit ist, dann kann ein stationäres Modell verwendet werden. Ein statisches Modell beschreibt den Zustand eines Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dynamische Modelle enthalten die Zeit oder andere variable erklärende Größen.

Die Beurteilung der Modelle in ihrer praktischen Anwendbarkeit bestehen aus folgenden Teilen:

- Verifizierung: Prüfung der Plausibilität des Modells durch Experten mit Erfahrung in der Praxis
- Sensitivitätsanalyse: Empfindlichkeit gegen Veränderung der Eingangsgrößen
- Kalibrierung: Ansätze zur Anpassung des Modells am Einzelabschnitt (z.B. Verschiebung, Skalierung, Regression) oder Anpassung des Modells an einem anderen Netz
- Validierung: Vergleich der Ergebnisse des Modells mit der Realität

3.1.3 Zustandsfunktionen

Eine Zustandsfunktion (auch: Verhaltensfunktion)⁷² repräsentiert eine funktionale Abhängigkeit zwischen einer quantitativen Ausprägung eines Schadensmerkmals und einem oder mehreren Einflussfaktoren. Für die Entscheidungen und Maßnahmenoptimierung ist die zeitliche Veränderung des Zustandes von Interesse. Je nachdem, ob die Zeit als erklärende Variable in der Funktion vorkommt, wird zwischen direkten und indirekten Zustandsfunktionen unterschieden. Bei den indirekten Zustandsfunktionen muss eine bekannte Beziehung zwischen dem Einflussfaktor und der Zeit bestehen. Bei solchen Modellen wird meistens der Verkehr als erklärende Variable verwendet. Die Zustandsfunktion, die die mittlere Zustandsentwicklung am Netz beschreibt, wird Masterfunktion genannt. Für eine Anwendung auf Projektebene ist jedoch eine Transformation dieser Masterfunktion notwendig, damit sie den lokalen Bedingungen entsprechen kann. Die Prozedur wird abschnittsbezogene Anpassung genannt und ausführlich in Kapitel 3.3 behandelt.

Eine systematische Zustandserfassung der Schadensmerkmale erfolgt nach zwei Indikatoren (Schadensausmaß und Schadensschwere). Mit der Zeit aber vergrößert sich nicht nur der Ausmaß des Schadens (z.B. die Risslänge), sondern es ist auch mit einer erhöhten Schadensschwere (Rissbreite) in der Zukunft zu rechnen. Die bestehenden Modelle berücksichtigen diese Tatsache nicht (oder nur teilweise in HDM). Daher ist eine getrennte Betrachtung von sicherheitsrelevanten Schäden (Risse > x mm) begrenzt möglich. Der Maßnahmenumfang kann geschätzt werden, die Untersuchung von verschiedenen Maßnahmenkombinationen ist jedoch nicht realisierbar.

Abbildung 12 zeigt einen Überblick der häufig für die Beschreibung des Straßenzustandes verwendeten mathematischen Funktionen. Die Funktionen unterscheiden sich in der Anzahl der frei wählbaren Parameter sowie in ihrer Flexibilität in der Anpassung an vorhandenen Daten. Zu ihrer Ableitung wird meistens die Regressionsanalyse verwendet. Je nach Land, Netz und Erfassungsverfahren sind die Funktionen stark unterschiedlich. Die Unterschiede erklären sich zum Teil durch die lokalen Einflüsse (messbar und nicht messbar), spiegeln landspezifische Traditionen in den Erhaltungsstrategien sowie verschiedene Qualitätsanforderungen an den Straßenoberbau wider. Die Unterschiede in der Form der Funktionen bestätigen weiters, dass die Ableitung von Funktionen allein durch statistische Verfahren im Einzelfall zu kontradiktorischen Ergebnissen führen kann.



Abbildung 12: Häufig verwendete Masterfunktionen für Zustandsprognosemodelle für den Straßenoberbau

⁷² vgl. MAERSCHALK, G. (1997) S32-34; WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S195-198; HOFFMANN, M. (2014)

3.2 Empirisch-deterministische Zustandsfunktionen (AT, DE, CH)

3.2.1 Zustandsprognosemodell in Österreich

Seit dem Jahr 2000 wird in Österreich ein Pavement Management System⁷³ flächendeckend für den Straßenoberbau verwendet. Die computergestützte Umsetzung erfolgt auf Basis des kanadischen Softwareprodukts VIAPMS (dTIMS). Das System wird derzeit für das hochrangige Netz Österreichs (Autobahnen und Schnellstraßen) sowie für die Landesstraßen in den Bundesländern Burgenland, Niederösterreich, Tirol, Vorarlberg, Salzburg und Oberösterreich angewendet.

Die erste Ableitung von deterministischen Zustandsfunktionen erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojekts⁷⁴ auf empirischer Basis. Verwendet wurden Daten von der ersten bundesweiten messtechnischen Zustandserfassung 1991 bis 1996, von der visuellen Zustandserfassung 1995, von den österreichischen SHRP-Strecken (Strategic Highway Research Programs) und Expertenbefragungen. Mit der Information der weiteren Zustandserfassungen (1999/2000, 2004-2005, etc.) wurden die Modelle seitdem nur unwesentlich verändert. Die Modelle unterscheiden nach Bauart und Straßenkategorie (vgl. Tabelle 11). Für das Schadensmerkmal Griffigkeit wurde keine Zustandsfunktion entwickelt. Stattdessen wird das 50%-Perzentil aus der Verteilung der jährlichen Änderung des Reibungsbeiwerts von dem Erfassungswert für jedes Analysejahr subtrahiert.

Die Prognosemodelle wurden mittels multipler Regression abgeleitet und mit einen Ansatz auf Grundlagen der Bayes-Statistik beim Vorhandensein von neuer Information aktualisiert. Als Basis für die Prognose werden die Zustandsgrößen (vgl. Kapitel 2.1) verwendet. Die Zustandswerte werden nachfolgend anhand der prognostizierten Zustandsgrößen ermittelt. Neben dem Alter werden als erklärende Variablen kumulierte Normalastwechsel, Verkehrsbelastungskoeffizient und Frostindex verwendet. Die kumulierten Normlastwechsel werden nach der Richtlinie zur Bemessung des Straßenoberbaus⁷⁵ berechnet und sind eine zeitveränderliche Größe. Die Eignung des Frostindexes als Prädiktor wird in Kapitel 3.3.3 diskutiert. Der Verkehrsbelastungskoeffizient ist definiert als Quotient aus zulässigen und

Bsp.: Deterministische Zustandsprognose mittels Verhaltensfunktionen im österreichischen PMS

Betrachtet werden zwei neugebauten Abschnitten eines Autobahnnetzes. Die Verkehrsbelastung des ersten Abschnittes ist während des ersten Jahres nach der Freigabe bekannt. Auf den zweiten Abschnitt ist beispielhaft mit zweifach größerer Verkehrsbelastung zu rechnen. Bei der Prognose des Schwerverkehrs wird von einer konstanten Zuwachsrate von 3% (p=3%) über den betrachteten Zeitraum ausgegangen. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass der erste Abschnitt richtig dimensioniert wurde (VBI=1,0).

Wie wirkt sich aus eine Verdoppelung des Verkehrs auf die Schadensentwicklung und auf die Lebensdauer nach den Zustandsfunktionen für Risse, Spurrinnen und Längsebenheit in VIAPMS AT aus?

Die kumulierten Normlastwechsel werden vereinfacht nach RVS 03.08.63 berechnet, wobei für die Bedeutung der Parameter auf die einschlägige Literatur hingewiesen wird.

$$NLW_{kum} = JDTLV_{ges}.\ddot{A}_{JDTLV}.R.V.S.365.n.z$$

($\ddot{A}_{IDTLV} = 1,0; R = 1,0; V = 1,0; S = 0,8$)
 $z = \frac{(1+p)^n - 1}{n.((1+p)-1)}$

 Relativer Anteil der Regressoren an der

 Spurrinnen
 Erklärung des Schadens zum Ausfallszeitpunkt



Abbildung 13: Einfluss des Verkehrs und deterministische Zustandsprognose im österreichischen PMS

⁷⁵ vgl. RVS 03.08.63 (2005)

⁷³ vgl. SOCCINA, M. (2007) S162-165; WENINGER-VYCUDIL, A. et al. (2009)

⁷⁴ vgl. MOLZER, C. et al. (2000) S196-2002

kumulierten Normlastwechseln und damit als eine Größe der Dimensionierung, die sich innerhalb des Prognosehorizonts nicht zeitlich verändert. Trotz der Berücksichtigung von anderen Einflussgrößen ist bei allen Modellen das Alter die entscheidende Einflussgröße, was anhand eines Beispiels veranschaulicht wird (Abbildung 13). Zum einen ist die relative Bedeutung des Verkehrs zur Erklärung des Schadensausmaßes gering, zum anderen bewirkt eine Verdoppelung des Verkehrs bei gleichem Aufbau kaum Auswirkungen auf die Lebensdauer (Reduktion um 2 Jahre). Dies widerspricht der Dimensionierung zu Grunde gelegten Prinzipen sowie der Auffassung, dass die meisten Schäden hauptsächlich von der Verkehrsbelastung abhängig bzw. verursacht sind. Eine Ausnahme im betrachteten Beispiel bis zu einem gewissen Maße stellt die Längsebenheit dar, die aber kein wesentliches Kriterium für die Lebensdauer ist.

Weiterhin sind die Modelle aus statistischer Sicht mit systematischen Verzerrungen (Bias) behaftet. Einerseits nahm die Analyse keine Rücksicht auf die Zensur der Daten (vgl. Kap. 3.4.1). Zensierte Daten liegen vor, wenn der Schaden bei der Zustandserfassung noch nicht aufgetreten ist. Wird die Zensur nicht durch geeignete statistische Methoden berücksichtigt, ist mit Bias in den berechneten Modellparametern zu rechnen. Andererseits werden offensichtlich relevante Einflussgrößen wie Klimadaten vernachlässigt. Die Tragfähigkeit des Oberbaus, ausgedrückt durch die Tragfähigkeitszahl Tz, findet ebenfalls keinen Eingang in das Prognosemodell. Aufgrund dieser Spezifikationsfehler (vgl. Kap. 3.3.3) dürfen nur die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten in den derzeit verwendeten Ansätzen als zuverlässig bezeichnet werden.

Die Entwicklung von allen Schadensmerkmalen mit Ausnahme der Risse ist durch lineare Funktionen gegeben. Die Zusammenhänge, die auf Basis von Langzeitbeobachtungen (z.B. Long-Term Pavement Performance – LTPP⁷⁶) abgeleitet wurden, weisen eine nicht lineare Natur auf, die sich durch die einfacheren bezüglich ihrer empirischen Schätzung und praktischen Anwendbarkeit linearen Modelle nur begrenzt approximieren lässt. Allgemein lässt sich die Form der Funktion wesentlich zuverlässiger über eine Zeitreihe von Messungen auf den Einzelabschnitt als über eine Punktwolke von Messungen am Netz bestimmen (vgl. Kap. 3.5.1). Die letzte Vorgehensweise unterscheidet nicht zwischen einzelnen Abschnitten und mehrmaligen Erfassungen und werden daher nicht zu wesentlichen Erhöhungen der Prognosegenauigkeit führen. Die Aktualisierung der Modelle durch das Bayes-Verfahren erlaubt nur eine Veränderung der Schätzungen der Parameter, sofern die neue Information eine höhere Zuverlässigkeit und Qualität aufweist. Dabei werden die neuen Erkenntnisse zur Aktualisierung des alten Ergebnisses verwendet - eine gleichzeitige Analyse der alten und neuen Daten findet nicht statt.

Die abschnittsspezifische Anpassung⁷⁷ erfolgt durch Verschiebung oder Skalierung der Masterfunktion durch die letzte Erfassung. Die Auswirkungen der verschiedenen Möglichkeiten zur Kalibrierung von Prognosemodellen werden näher in Kapitel 3.3 erläutert. Für jedes Merkmal wird ad hoc auf Basis von verschiedenen Überlegungen ein Verfahren zwischen Verschiebung und Skalierung gewählt. So werden die Zustandsfunktionen der Oberflächenschäden und der Längsebenheit durch Verschiebung angepasst. Die Begründung dafür ist, dass auf diese Weise die Neigung der linearen Funktion unverändert bleibt. Diese Anforderung setzt eine während der Nutzungsdauer gleichbleibende Verschlechterungsrate voraus, die auf allen Abschnitten identisch ist. Die Anpassung für die Merkmale Risse und Spurrinnen erfolgt durch Skalierung. So wird garantiert, dass die Anfangsschädigung für Funktionen ohne Konstante immer Null ist. Dies ist für Spurrinnen z.B. infolge anfänglicher Verdichtung nicht immer erfüllt (vgl. HDM-4⁷⁸). Der Vergleich von nur zwei schon nicht sehr geeigneten Methoden zur Anpassung greift zu kurz und führt nicht zu einer mathematisch optimalen Lösung. Weiter werden untere und obere Grenze für die berechneten Skalierung- und Verschiebungsfaktoren eingeführt. Diese Grenzwerte werden als 10%- und 90%-Perzentile aus der empirischen Verteilung der Kalibrierungsfaktoren für jedes Merkmal abgeleitet. Dadurch sollen nicht plausible kurze bzw. lange Lebensdauer in der Prognose vermieden werden. Die Prognose auf Netzebene erfolgt, in dem die auf den Einzelabschnitten aus der Prognose ermittelten Werte für alle Abschnitte aufsummiert werden.

⁷⁶ vgl. VON QUINTUS, H.L. et al. (2005)

⁷⁷ vgl. WENINGER-VYCUDIL, A. et al. (2001) S205-216

⁷⁸ vgl. MOROSIUK, G. et al. (2004) SB8-2

Tabelle 11: Verwendete Zusta	ndsfunktion	en für d	en Stral	Senober	bau in	Osterre	ich (Sys	stem V	IAPMS)''		
Beschreibung		Fo	rmeln					Dars	tellung	,		
Generelle Beschreibung:	Mathematiscl	Mathematische Beschreibung Masterfunktionen:						Zustande	sfunktio	1 Risse*		
Die bestehenden Zustandsfunktionen werden mit den Methoden der Bayes- Statistik aufgrund von aufeinanderfolgen- den Zustandserfassungen abgeleitet und mit neuen Daten aktualisiert. Die Zu- standsprognose erfolgt auf der Grundlage von Zustandsgrößen. Als erklärende Variablen (Einflussfaktoren) kommen neben Alter auch Verkehrsbelastungskoef- fizient, Frostindex und kumulierte Last- funktion Risse sind alle Modelle linear in den Variablen. Für jede Masterfunktion sind Variationen der Parameter nach Straßenkategorie (Autobahren und	Zustandsfunkt $ZG_{RI} = \exp[$ $+ \ln (A$ Zustandsfunkt $ZG_{OS} = -12$, Zustandsfunkt $ZG_{SR} = a.Ah$	BI + 0,01)] BI + 0,01) BI						I = 1,0 $(A+S)$ $(A+S)$ $(A+S)$ $(B+L)$ $(B+L)$ $45 50$ eit t [a] häden* $200 kb$				
Schnellstraßen, Bundesstraßen B und L) und nach Bautyp (Asphalt, Beton, Neukon- struktion, Erhaltungsmaßnahme) gegeben. Die Masterfunktionen werden nach Merk- mal durch Skalierung oder Verschiebung durch die zuletzt erfasste Zustandsgröße auf einen Einzelabschnitt angepasst. Aus praktischen Erfahrungen sind Grenzwerte für den Kalibrierungsfaktor bzw. –vektor gegeben.	$ZG_{LE} = 1 + a$ Zustandsfunkt $ZG_{GR,t} = ZG$ Abschnittsbez Kalibrierung d	$Alter + \frac{b.}{1}$ ion Griffig _{GR,t-1} - a cogene Ka lurch Skalie	<u>NLW_{kum}</u> 00.000 keit (GR): libration: erung Riss	e (RI):		ZG Oberflächens. [9 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	Bet	ion Neu (A+ phalt Neu (B+ con Neu (B+	S) S+L) L) 20 25 30	*F1 = 192	45 50 ceit t [a]	
Beispiele:	$ZG_{RI,k,j} = K$	$F_{RI,j}.ZG_{RI}$	$g_{g,j} \to KF_R$	$I_{I,j} = \frac{ZG_{I}}{ZG_{IJ}}$	$\frac{RI,t,j}{\cdot(t)}$	- 40	Zu	standsfu	nktion S	purrinne	en*	
Empirisch-deterministische Zustands- funktionen für den Straßenoberbau im System VIAPMS in Österreich.	Kalibrierung d $ZG_{OS,k,j} = K$	lurch Shifti $V_{OS,j} + ZC$	ng Oberflä	ichenschäc	,g,j(l) len (OS):	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$						
Legende:	$KV_{OS,j} = ZG$	OS,t,j – ZG	$G_{OS,g,j}(t)$			iund 15			/			
 ZG Zustandsgröße A+S Abkürzung Autobahnen und Schnellstraßen B+L Abkürzung Landesstraßen 	Kalibrierung o $ZG_{SR,k,j} = K$	lurch Skali F _{SR, j} .ZG _{SR}	erung Spur $g_{,g,j} \to KF_S$	rinnen (SI $_{R,j} = \frac{ZG}{ZG_{SI}}$	R): $\frac{f_{SR,t,j}}{R,g,j}(t)$	0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 Stetige Zeit t [a]						
SR Abkürzung Spurrinnentiefe [mm] LE Abkürzung Längsebenheit	Kalibrierung d	lurch Shifti	ng Längse	benheit (L	E):		Zusta	andsfunl	ktion Läi	ngsebeni	heit*	
[m/km] <i>GR</i> Abkürzung Griffigkeit [-] <i>OS</i> Abkürzung Oberflächenschäden [%]	$ZG_{LE,k,j} = K$ $KV_{LE,j} = ZG$ Kalibrierung ($V_{LE,j} + ZG$ $U_{LE,t,j} - ZG$ Griffigkeit	$G_{LE,g,j}$ $G_{LE,g,j}(t)$ (GR): nich	t erforder]	ich	[m/km] 4,5 4,0 3,5 4,0 3,0			*NLWkum = 6.000.000			
RI Abkürzung Risse [%]	Crongworto L	alibrianu	nacfaktore	n und w	ktoron	so 2,5 2,0				- Asphalt Ne	u (A+S)	
Alter Alter der Decke [a] VBI Verkehrsbelastungskoeffizient NLW _{kum} Kumulierte Normlastwechsel	Merkmal Risse	Min 0,005 0,8 1	Max 3 (BT56_N 7,0 (sonst)	Mitt 0,1 (B 0,7 (elwert T56_N) sonst)	1 1,5 5 1,0 N 0,5 0,0	T 1,5 - - Beton Neu (A+S) D 1,0 - Asphalt Neu (B+L) N 0,5 - - Beton Neu (B+L) 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50					
<i>a, b</i> Funktionsparameter	Oberfläch.	- 06	- 5 (BT56_N) 0.4 (B	0 T56 N)		7	etandefu	nktion (Sicuge Z	it*	
$ZG_{i,k,j}$ Kalibrierte Zustandsgröße für	Längseb	0,3 3	3,1 (sonst)	1,2 (sonst)	⊥ ^{1,0}		stanusiu	*ZG	m = 0.75 (11 Asphalt)	
$KF_{i,k,j}$ Kalibrierfaktor auf Abschnitt j	Tustond-f-	tioner -	-		.,	6,0 8,0 7			ZG _{GI}	$R_{r,t=0} = 0,70$ (Beton)	
$KV_{i,k,j}$ Kalibriervektor auf Anschnitt j	Zustandsfunktionen nach Bautypen*:											
ZG _{<i>i</i>,<i>g,j</i>} Zustandsgröße für Merkmal i nach Masterfunktion	B114_N Bautype 1-4 Neubau (A) BT56_N Bautype 5-6 Neubaukonstruktion (B)											
$ZG_{i,t,j}$ Gemessene Zustandsgröße zu t auf Abschnitt j $ZG_{i,g,j}(t)$ Zustandsgröße zu t auf Abschnitt j nach Masterfunktion	u t (A Asphalt; B Beton) *Die RVS-Bautypen wurden auf 9 PMS-Typen (mit Berücksichtigung von durchgeführten Maßnahmen) erweitert. Andere Bautypen mit ihren Funktionspara- meter in der Literatur.						20 25 30	- Aspahlt N Beton Neu 35 40 Stetige Z	eu (A+S) (A+S) 45 50 ceit t [a]			
Funktionsparameter Zustandsfunktioner	nach Straßenty	p	63			ID	-	E	C.D.	63	P.	
Bautyp SR (A+S)	LE (A+S)	GR (A+S)	OS (A+S)	RI (A+S)	(B	ык +L)	(B-	Е +L)	GR (B+L)	OS (B+L)	RI (B+L)	
a b BT14 N 0.6349 0.0159 0	a b	a 0.0018	a 1.0000	a 0.2008	a 0.8316	b	a 0.0663	b 0.0067	a 0.0018	a 1.5000	a 0.2210	
BT56_N 0,3175 0,0079 (,0437 0,0032	0,0018	0,6667	0,1916	0,3325	0,0168	0,0497	0,0067	0,0018	1,1667	0,2151	

ä 70

⁷⁹ Eigene Darstellung auf Basis von WENINGER-VYCUDIL, A. et al. (2009) S66-71; WENINGER-VYCUDIL, A. et al. (2004); MOLZER, C. et al. (2000)

3.2.2 Zustandsprognosemodell in Deutschland

Die erste bundesweite Anwendung⁸⁰ eines PMS in Deutschland begann im Jahr 1999 in 12 Ländern. Verwendet wird wie in Österreich die kanadische Software VIAPMS, die ebenfalls an die Richtlinien und lokale Verhältnisse angepasst wurde. Die Verhaltensfunktionen werden durch statistische Verfahren auf Basis der ersten flächendeckenden Erfassung, Expertenwissen und -erfahrungen abgeleitet, wobei vorab Annahmen über den Schadensverlauf getroffen werden. Obwohl seit dem Jahr 1992 der Zustand auf den Bundesfernstraßen regelmäßig alle 4 Jahre erfasst wird, findet eine laufende Aktualisierung der bestehenden Funktionen nicht statt. Derzeit wird das System in fast allen Bundesländern eingesetzt.

deutschen PMS⁸¹ Die Prognose im (VIAPMS 6.1) erfolgt deterministisch in folgenden Schritten: Bestimmung der Verhaltensklasse \rightarrow vertikale Verschiebung der bestimmten Verhaltensfunktion \rightarrow Berechnung der Prognosezustandswerte \rightarrow Bildung von Teil- und Gesamtwerten \rightarrow Bestimmung der Mängelklasse (Tabelle 12). Das Prognosemodell enthält nur eine erklärende Variable - das Deckschichtalter, definiert als Zeit seit der letzten Maßnahme oder seit dem Neubau. Prognostiziert werden im Unterschied zu dem System in Österreich nicht die Zustandsgrößen, sondern die Zustandswerte. Eine Umrechnung auf Zustandsgrößen ist nach der Prognose problematisch, da mit der Normierungsfunktion in den Bereichen ZW < 1,5und ZW > 4,5 keine Zustandsgrößen ermittelt werden können. Andererseits sind die Zustandswerte keine physikalischen Größen, die bei der Maßnahmenwahl zu berücksichtigen sind. Diese Methodik führt zu Bias in der Prognose, da die Normierungsfunktionen willkürlich festgelegt sind und Unstetigkeiten aufweisen, d.h. der Schadensverlauf ist durch die Normierungsfunktion beeinflusst. Eine Zusammenfassung durch Gewichtung von Merkmalen wie z.B. Netzrisse und Flickstellen (bei Asphaltbefestigungen) und Eckabbrüche und Längsund Querrisse (bei Betonbefestigungen) erst bei der Prognose wird ähnlich wie eine Zusammenfassung noch bei der Bewertung die optimale Maßnahmenwahl erschweren (vgl. Kap. 2.3.4). Ferner ist eine Erklärung, warum die abgeleiteten Funktionen für Spurrinnen (Beton) und allgemeine Unebenheit zusammenfallen, in der Literatur nicht zu finden.

Bsp.: Deterministische Zustandsprognose mittels Verhaltensfunktionen im deutschen PMS

Aus Zustandserfassung der Spurrinnen ist für zwei Straßenabschnitte mit Asphaltbefestigung folgende Information vorhanden:

	MSPT [mm]	Alter [a]	Funktionsklasse
Abschnitt 1	5	7	FK1
Abschnitt 2	6	7	FK1

Auf Basis dieser Daten soll die Lebensdauer berechnet werden, wobei der Ausfall bei Erreichen des Zustandswertes 4,5 eintritt.

Berechnung des Zustandwertes (gemäß Tabelle 7):

- Abschnitt 1: ZWSPT = 1,5 + 2.(5-4)/(10-4) = 1,83
- Abschnitt 2: ZWSPT = 1,5 +2.(6-4)/(10-4) = 2,17

Bestimmung der Verhaltensklasse (gemäß Tabelle 12): Für t = 7 Jahre; VK1: ZSPT=1,64; VK2: ZSPT=2,20;

- VK3: ZSPT= 2,92; VK4: ZSPT=4,14
- Abschnitt 1: ZWSPT = $1,83 \rightarrow VK1$
- Abschnitt 2: $ZWSPT = 2,17 \rightarrow VK2$



Bestimmung des Schift-Faktors und Prognose (Curve-Shifting):

• Abschnitt 1: Shift = $ZW_t - ZW_{SOLL,t} = 1,8333 - 1,6402 = 0,1931$ • Abschnitt 2: Shift = $ZW_t - ZW_{SOLL,t} = 2,1666 - 2,2041 = -0,0374$

Deterministische Lebensdauer (ZW=4,5 \leftrightarrow MSPT=20 mm):

Abschnitt 1: $x_a = 115,89 a$

• Abschnitt 2: $x_a = 38,52 a$



Abbildung 14: Ermittlung der Verhaltensklasse und deterministische Prognose im deutschen PMS

⁸⁰ vgl. KNEPPER, S. (2001); MAERSCHALK, G. (2000)

⁸¹ vgl. SOCINA, M. (2007) S159-161; MAERSCHALK, G. et al. (2008) S61-73; KRAUSE, G. (2001) S30-34

Eine Besonderheit des Modells in Deutschland ist die Verwendung von unterschiedlichen Standardfunktionen zur Prognose eines Schadenstyps, die sich sowohl in den Skalierungs- als auch in den Formparameter unterscheiden. Auf Basis der letzten Erfassung und des Alters wird jedes Merkmal und jeden Abschnitt eine von vier Verhaltensklassen bzw. Verhaltensfunktionen zugeordnet. Für das Schadensmerkmal gilt diese Funktion, zu der der Zustandswert den geringsten vertikalen Abstand aufweist. Die Verhaltensklasse dient als erster Schritt der abschnittsbezogenen Anpassung und soll die verschiedene Schadensprogressivität (langsam, mittel, schnell, sehr schnell) angeben. Die zugewiesene Verhaltensklasse bleibt für den betrachteten Prognosezeitraum erhalten und kann sich nur bei einer Maßnahme verändern. Ein unberücksichtigter Effekt dieser Vorgehensweise wird anhand eines Beispiels (Abbildung 14) illustriert. Nach einer Zustandserfassung unterscheidet sich die gemessene Spurrinnentiefe auf zwei angrenzenden Abschnitten nur um 1 mm – 5 mm und 6 mm. Nach der Zustandswerttransformation werden für die Abschnitte verschiedene Verhaltensklassen ermittelt - VK1 und VK2. Nachdem die individuellen Standardfunktionen vertikal in die erfassten Zustände verschoben werden, ergeben sich eine Lebensdauer von 115,89 Jahre im ersten Fall und 38,52 Jahre im zweiten. Eine andere Auswirkung, nämlich die Konzentration der Ergebnisse auf Streifen um die Standardverhaltensfunktionen, wird im Kapitel 3.3.1 behandelt.

Die zweite Komponente der abschnittsbezogenen Anpassung erfolgt durch die vertikale Verschiebung der bestimmten Standardverhaltensfunktion in den letzten ermittelten Zustandswert – Curve-Shifting-Verfahren. Anhand der prognostizierten Zustandswerte werden Teil- und Gesamtwerte für jedes Jahr ermittelt, die weiter für die Bestimmung des Maßnahmennutzens, Strategieauswahl und Darstellungszwecke verwendet werden. Die Verknüpfung zu Teil- und Gesamtwerten nach der Prognose erfolgt nach verschiedenen Formeln und Regeln im Vergleich zu der Bewertung nach der Zustandserfassung. Auf die Unterschiede wird hier nicht näher eingegangen. Die Bestimmung einer weiteren Kenngröße – die Mängelklasse – soll die Maßnahmenwahl zusätzlich unterstützen. Die Mängelklassen werden anhand von den Zustandswerten und definierten Bedingungen ermittelt und liefern Hinweise auf mögliche Schadensursachen. Zum Beispiel Zustandswerte für allgemeine Unebenheiten und Risse über 3,5, d.h. (3,5 < ZAUN) \cap (3,5 < ZRIO) bestimmen Mängelklasse 10 und mögliche Oberflächenschäden.

Das Modell in Deutschland entspricht dem Kenntnisstand nach der ersten bundesweiten Anwendung, d.h. bis zum Jahr 2001. Seit dieser Zeit sind einige Forschungsprojekte zur Weiterentwicklung des Systems abgeschlossen worden, deren Ergebnisse auf die praktische Anwendbarkeit geprüft werden sollen⁸². Die Zustandsfunktionen wurden für die Zustandsgrößen abgeleitet, wobei für die Autobahnen die kumulierten Achsübergänge als unabhängige Variable vorgeschlagen werden. Die Prognose erfolgt auf Basis von Potenzfunktionen. Für jedes Merkmal sind verschiedene verhaltenshomogene Gruppen nach Längsneigung, Deck- und Tragschichtart, Bemessungsindex, Fahrstreifen und Bauweise definiert. Die abschnittsspezifische Anpassung erfolgt wieder auf Basis der letzten Erfassung mit dem Unterschied, dass der Formkoeffizient (Potenzzahl) konstant bleibt. Lokale Verhältnisse, die durch die verhaltenshomogene Gruppe nicht abgedeckt werden, werden durch den Skalierungskoeffizient berücksichtigt. Der Ausgangszustand wird durch eine Konstante (Interzept) in den standardisierten Zustandsfunktionen abgebildet, die ebenfalls angepasst wird. Im Unterschied zu den Autobahnen hat die statistische Auswertung der auf die Bundesstraßen erhobenen Schäden dem Alter eine höhere Erklärungskraft als die kumulierte Verkehrsbelastung zugeordnet. Für die Längsebenheit wurde sogar keine eindeutige Abhängigkeit von dem Schwerverkehr festgestellt. Für die Zukunft wird jedoch die Entwicklung eines einheitlichen Konzepts für Autobahnen und Bundesstraßen mit den kumulierten Achsübergängen als unabhängige Variable sowie die Implementierung der neuen Zustandsfunktionen und Anpassungsverfahren in PMS vorgesehen. Für eine einhergehende Diskussion der verwendeten Methoden und Einflussvariablen wird auf Kapitel 3.3.2 und Kapitel 3.3.3 verwiesen.

⁸² vgl. KRAUSE, G. et al. (2010) S26-30

Tabelle 12: Derzeit verwendete Zustandsfunktionen im deutschen PMS-Modell⁸³

Beschreibung		Fo	rme	ln		Darstellung					
Generelle Beschreibung:	Mathemat	tische Besch	reibung	g Masterfunktionen	ı:		Zustandsfunktion	n Risse/Oberflächens.			
Die bestehenden Zustandsfunktionen stammen aus empirischen Auswertungen von Langzeitbeobachtungen. Die Zu- standsprognose erfolgt auf der Grundlage von Zustandswerten. Als erklärende Variable (Einflussfaktor) kommt in allen Funktionen ausschließlich das Alter. Als Masterfunktion wird eine Potenzfunktion verwendet (Griffigkeit – lineare Funktion). Die abschnittsbezogene Kalibrierung erfolgt in zwei Schritten. Jeder Abschnitt	Zustandsfunktion alle Zustandswerte mit Ausnahme der Griffigkeit: $ZW_i = 1 + a.Alter^b$ Zustandsfunktion Zustandswert Griffigkeit (ZGRI): ZGRI = $c + \frac{1}{30}$. Alter ZW Risse /Oberflächenschäden für Asphalt: ZRIO = $1 + 1, 25. \ln (0, 67.ZNRI^2 + 0, 33.ZFLI^2)$ ZW Risse /Oberflächenschäden für Beton: ZRIO = $1 + 1, 25. \ln (0, 5.ZLRQ^2 + 0, 3.ZEAB^2)$ Automatisches Curve-Shifting: Abschnittsbezogene Kalibrierung: ZW _t = ZW _{t-1} + (ZW _{SOLLs} - ZW _{SOLLs-1}) Definition Deckschichtalter: Alter = t = Jahr Prognose - Jahr letzte Maßnahme Teilwerte und Gesamtwert:				ZW Risse/Oberflächens. [-] 20 20 20 10 10 10 20 20 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12						
wird zuerst eine Verhadene Progression der Zustandsverschlechterung abbilden soll. Parameter der Masterfunktion sind für jede Verhaltensklasse gegeben. Schließlich wird die Funktion in den zuletzt ermittelten Zustandswert vertikal verschoben (Curve- Shifting-Verfahren). Nach der Prognose aller Zustandswerte werden Teil- und Gesamtwerte gebildet. Mängelklassen geben Hinweis auf mögliche Schadensur- sachen.						5,0 4,5 4,0 3,5 2,5 2,0 1,5 1,0	Zustandsfunktio	on Spurrinnen/SPH*			
Beispiele:	Berechnun	gsvorschrift 3	Substan	zwert Bestand:				Stetige Zeit t [a]			
Empirisch-deterministische Zustands- funktionen für den Straßenoberbau in Deutschland.	$ZSUB = 0,0075.Alter^{1.5}$ Berechnungsvorschrift Substanzwert Gesamt:					Zustandsfunktion Spurrinnen/SPH*					
Legende:	$ZSUG = 5 - (5 - ZSUB)^{0.6} \cdot \{5 - [max (ZAUN;$					10 4,0					
 ZAUN Abkürzung Zustandswert Allgemeine Unebenheiten [-] ZSPT Abkürzung Zustandswert Spurrinnentiefe [-] ZSPH Abkürzung Zustandswert Fiktive Wassertiefe [-] 	ZSPT).0,3 + ZRIO.0,7]} ^{0,4} Berechnungsvorschrift Gesamtwert: GW = 0,33.max (ZAUN; ZSPT) + 0,11.ZGRI + 0,56.ZSUG Mängelklassen*:					1,0 3,0 2,5 2,0 1,5 1,0	0 5 10 15 20	VK = 1 VK = 2 VK = 3 VK = 4 25 30 35 40 45 50 Stetige Zeit [a]			
ZGRI Abkürzung Zustandswert Griffigkeit [-]	klasse	schichtart	0.50	Bedeutung		7	ustandsfunktion A	Ilgomaina Unabanhait			
ZRIO Abkürzung Zustandswert Risse/ Oberflächenschäden [-]	10 20 30	Asphalt Asphalt Asphalt	OFS - SVS - TGS	 Oberflächenschäder Schubverformunger Tragfähigkeit geb. 	n n	C = 5,0 4,5 4,5					
ZNLQ Abkürzung Zustandswert Netz- risse/ Längsrisse/ Querrisse [-] ZEAB Abkürzung Eckabbrüche (Beton)	40	Asphalt	Sch TGE Scl	ichten (Spurrinnen) - Tragfähigkeit geb. hichten (Ebenheit)		4,0 3,5 3,0					
ZLQR Abkürzung Längs-Querrisse (Beton)	50	Asphalt	NSU - Setz	- Nachverdichtungs- zungsverformungen	-/	D 2,5		- VK = 1 $- VK = 2$ $VK = 3$			
ZFLI Abkürzung Flickstellen (Asphalt)	60	Beton	ungeb	b. Schichten/ Oberbai	u	× 1,5 N 1,0	1/2	VK = 4			
ZNRI Abkürzung Netzrisse (Asphalt)	70	Asphalt/ Beton	GR	O – nur Griffigkeit (Oberfläche)			0 5 10 15 20	25 30 35 40 45 50 Stetige Zeit t [a]			
<i>Alter</i> Alter der Decke [a] <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> Funktionsparameter	80	Asphalt/ Beton	GRI E	D – Griffigkeit und benheit/ Schäden			Zustandsfunl	ktion Griffigkeit			
VK Abkürzung Verhaltensklasse	85	Beton	OF	B – Schäden an der Betonoberfläche		<u>-</u> 5,0 <u>+</u> 4,5					
ZSUB Abkürzung Substanzwert Be- stand	86	Beton	EBO – pen (l	- Plattenversatz/ Pun Ebenheit ohne Risse)	n-)	.ia 4,0 3,5					
<i>ZSUG</i> Abkürzung Substanzwert Gesamt	90	Beton	EB (Et	BR – Tragfähigkeit benheit und Risse)		^{3,0}		·			
<i>ZW_{SOLL}t</i> SOLL-Wert der theoretischen Zu- standsfunktion im aktuellen Jahr	92	Beton	TG geb	BB – Tragfähigkeit oundene Schichten		A 2,5 Z 2,0 1,5		- VK = 1 $- VK = 2$ $- VK = 3$			
ZW _{SOLL,t-1} SOLL-Wert der theoretischen Zustandsfunktion im Vorjahr ZW _{t-1} IST-Zustandswert des Vorjahres	0 Asphalt/ Beton Keine Mängel *Bedingungen zur Bestimmung der Mängelklasse in der Literatur				n	1,0	0 5 10 15 20	25 30 35 40 45 50 Stetige Zeit t [a]			
Funktionsparameter Zustandsfunktionen	nach Verhal	tensklasse			1						
Vehaltensklasse (Verlauf)	ZAUN	ZSPT / Z	SPH lt)	ZSPT / ZSPH (Beton)	ZG	RI	ZRIO	ZNLQ			

			(110)		(20							
	а	b	а	b	а	b	с	а	b	а	b	
Verhaltensklasse 1 (langsam)	0,0058	1,6309	0,2051	0,5850	0,0058	1,6309	1,0	0,000088	3,542	0,000088	3,542	
Verhaltensklasse 2 (mittel)	0,0206	1,5510	0,3520	0,6320	0,0206	1,5510	2,0	0,0000356	3,419	0,0000356	3,419	
Verhaltensklasse 3 (schnell)	0,0577	1,4150	0,5246	0,6660	0,0577	1,4150	3,0	0,0004370	3,000	0,0004370	3,000	
Verhaltensklasse 4 (sehr schnell)	1,6850	1,1380	0,8394	0,6781	1,6850	1,1380	4,0	0,0051000	2,600	0,0051000	2,600	

⁸³ Eigene Darstellung auf Basis von MAERSCHALK, G. (1997); MAERSCHALK, G. et al. (2008) S61-73

3.2.3 Zustandsprognosemodell in der Schweiz

In der Schweiz ist derzeit noch kein Pavement Management System für das hochrangige Netz in Einsatz⁸⁴. Das Bundesamt für Straßenwesen (ASTRA) entwickelt seit dem Jahr 2003 das Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr (MISTRA)⁸⁵. Das System enthält verschiedene Module, die u.a. Daten bezüglich Zustandsdaten von allen Straßen, Tunnel und Brücken, sowie Unfalldaten, Verkehrsaufkommen enthalten. Nur ein Teil der Module ist bereits fertiggestellt. Zwei Fachapplikationen sind der Erhaltungsplanung gewidmet: Erhaltungsmanagement im Siedlungsgebiet (EMSG) und Erhaltungsmanagement Nationalstrassen (EMNS). Die Einführung der ersten Fachapplikation ist auf 2014 geplant, wobei das Modul für Nationalstrassen noch nicht im Betrieb ist.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts⁸⁶ werden zum ersten Mal deterministische Zustandsfunktionen für alle Zustandsindizes und alle Straßenkategorien (National-, Kanton- und Gemeindestraßen) in der Schweiz abgeleitet (Tabelle 13). Die Ergebnisse des Forschungsberichts sind weder eine vollständige und endgültige Lösung noch werden sie in einem EDV-Management-Tool implementiert. Die Modelle werden mittels einfacher Regression mit dem Deckschichtalter als erklärende Variable auf Basis von Zustandserfassungen entwickelt. Für jede Straßenkategorie werden verschiedene Zustandsfunktionen nach Verkehrslastklassen, Tragfähigkeit und Fahrstreifen (bei Nationalstraßen) abgeleitet, wobei ausschließlich Asphaltbefestigungen betrachtet werden. Die Prognosemodelle basieren auf Zustandsgrößen mit Ausnahme der Oberflächenschäden, wo nur Zustandsindex zur Verfügung steht. Bei den visuell erfassten Oberflächenschäden war die Qualität der Daten nicht sehr hoch. Als Gründe wurden die falsche Beurteilung der Schwere und des Schadensaumaßes und die falsche Zuordnung zu den einzelnen Merkmalgruppen (z.B. Verwechslung "Wilde Risse" mit "Netzrisse") genannt.

Bei der Datenbearbeitung wurde die Methodik übernommen, Ausreißer zu entdecken und zu entfernen. Die Identifikation von Ausreißer erfolgt nicht durch statistische Tests, sondern durch individuelle Schätzungen für jedes Merkmal. Es wurde angenommen, dass ein zu schlechter Zustand, der während der Gewährleistungsfrist (5 Jahre) eintritt, in Regel auf Einbau-, Material- oder Messfehler zurückzuführen ist. Weiters wurde erkannt, dass diese Fälle mit einem deterministischen Ansatz kaum vorhersagbar sind.

Es ist kritisch anzumerken, dass ein großer Teil der abgeleiteten Funktionen nicht brauchbar sind (vgl. z.B. Zustandsfunktionen für Spurrinnen, Griffigkeit, etc. in Tabelle 13). Diese Funktionen zeigen jedoch eine Zustandsverschlechterung, die aber zu gering ausfällt. Die resultierende Lebensdauer ist daher unrealistisch hoch. Es empfiehlt sich aufgrund des ungenügenden Datenumfangs in erster Linie Modelle ohne Unterteilungen nach vielen Einflussgrößen zu entwickeln, die zumindest vorübergehend in der Praxis anwendbar sind. Zusätzliche Unterscheidungen können dann aufbauend auf bestehende Zustandsfunktionen bei Vorhandensein von neuen Informationen erfolgen. Als Verfahren zur Anpassung der Prognose auf den Einzelabschnitt wurde die horizontale Verschiebung (vgl. Kap. 3.3.1) vorgeschlagen. Eine Begründung für diese Auswahl, sowie Vor- und Nachteile der anderen Methoden wurden im Forschungsbericht nicht gegeben.

⁸⁴ vgl. FASTRICH, A. (2011) S18

⁸⁵ vgl. SCHNEEBERGER, U. (2013)

⁸⁶ vgl. SCAZZIGA, I. (2008)

Tabelle 13: Erste Zusammenstellung von Zustandsfunktionen für den Straßenoberbau in der Schweiz⁸⁷

Beschreibung	Formeln	Darstellung						
Generelle Beschreibung:	Mathematische Beschreibung Masterfunktionen	Zustandsfunktion Belagsschäden*						
Generelle Beschreibung: Die Modelle werden im Rahmen eines Forschungsprojekts aufgrund von einigen Tausend Kilometer schweizerischer Straßen empirisch abgeleitet. Die sind eine erste Zusammenstellung von Zustands- funktionen und bilden die Ausgangslage für weitere Untersuchungen. Verschiedene Modelle werden nach Straßenkategorie (Nationalstraßen, Kantonstraßen, Gemein- destraßen) abgeleitet. Weitere Unterteilung erfolgt nach Vorhandensein zusätzlicher Information hinsichtlich weitere Einfluss- faktoren (hier: Verkehrsbelastung - Ver- kehrslastklasse und Tragfähigkeit - I ₅). Eine Unterscheidung nach Belagsarten ist für zukünftige Forschungsarbeiten vorge- sehen. Die Prognose erfolgt aufgrund von Zustandsindizes (visuell erfasste Schäden) oder auf Basis von Messwerten (messtech- nisch erfaste Schäden). Aufgrund von uneinheitlichen Daten, fehlenden Daten und Fehler bei der Erfassung werden nicht für alle Merkmale erfolgreich Modelle entwickelt. Als Verfahren zur abschnitts- bezogene Kalibrierung wird die horizonta- le Verschiebung empfohlen. Hier werden	Mathematische Beschreibung Masterfunktionen für Nationalstraßen: Zustandsfunktion Belagsschäden: $I_{A2} = b.Alter^c$ Zustandsfunktion Spurrinnentiefe (Ebenheit in Querrichtung I ₃): $T_{max} = a + b.ln (Alter)$ Zustandsfunktion Standardabweichung der Winkelwerte W (Ebenheit in Längsrichtung I ₂): $s_W - Wert = a + b.Alter$ Zustandsfunktion Griffigkeit, SCRIM80 (I ₄): $\mu_{SCRIM 80} = a + b.ln (Alter)$ Mathematische Beschreibung Masterfunktionen für Gemeindestraßen (Bsp.: Strukturelle Schäden – I _{A4}): Verkehrslastklasse T1, I ₅ \leq 3: $I_{A4} = a + b.Alter$	Zustandsfunktion Belagsschäden* $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \\ \hline U & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 &$						
nur die Ergebnisse für Nationalstraßen sowie ein Beispiel für Zustandsfunktionen auf Gemeindestraßen dargestellt	Verkenrstastkriasse 11, $I_5 > 5$: $I_{A4} = b.Alter^c$	Zustandsfunktion Längsebenheit*						
Beispiele:	Verkehrslastklasse T2, $I_5 \le 3$:	L 40 3,5						
Empirisch-deterministische Zustands- funktionen für den Straßenoberbau, abgeleitet aufgrund von Zustandserfassun- gen in der Schweiz.	$I_{A4} = b.Atter$ Verkehrslastklasse T2, $I_5 > 3$: $I_{A4} = b.e^{c.Atter}$	3.0 2.5 1.5 1.0 1.5 1.0 1.5 1.0 1.5 1.0 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5						
Legende:	Verkehrslastklasse T3, $I_5 \le 3$: $I_{A4} = b.Alter^c$	$\begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0 & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 \end{bmatrix}$						
<i>I</i> _{A2} Abkürzung Zustandsindex Belagsschäden [-]	Verkehrslastklasse T3, $I_5 > 3$:	Stetige Zeit t [a]						
<i>I</i> ₃ Abkürzung Zustandsindex Ebenbeit in Ouerrichtung [-]	$I_{A4} = a + b.Alter$	1,0 0,9 *Nationalstraßen (A, HLS)						
T_{max} Maximale Spurrinnentiefe aus der rechten oder linken Radspur	Abschnittsbezogene Kalibrierung:	\$ 0,8 \$ 0,7 \$ 0,7 \$ 0,6 \$ 0,7 \$ 0,6 \$ 0,7 \$ 0,6 \$ 0,7 \$ 0						
W Winkelwert [°]	$I_{i,k,j} = I_{i,g,j} + K V_{i,j}$ $K V_{i,j} = I_{i,t,j} - I_{i,g,j}(t)$	1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,						
<i>s_W-Wert</i> Standardabweichung des Winkelwertes W [‰]	Legende - Fortsetzung:	$\begin{array}{c} 60 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\$						
<i>I</i> ₂ Abkürzung Zustandsindex Ebenheit in Längsrichtung [-]	A Abkürzung Autobahnen	0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 Statiga Zeit fol						
<i>I</i> ₄ Abkürzung Zustandsindex Griffigkeit [-]	HLS Abkürzung Hochleistungsstraßen FS Abkürzung Fahrstreifen	Zustandsfunktion Strukturelle Schäden*						
μ _{SCRIM80} Reibungsbeiwert, gemessen mit System SCRIM bei 80 km/h Soll-Messgeschwindigkeit [-]	<i>STDEV</i> Abkürzung Standardabweichung <i>a,b,c</i> Funktionsparameter Zustandsfunktionen	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $						
<i>I_{A4}</i> Abkürzung Zustandsindex	$I_{i,k,j}$ Kalibrierter Zustandsindex für Merkmal i auf Abschnitt j	9 3.0 T3: 15 < 3						
<i>I</i> ₅ Abkürzung Zustandsindex Traofähigkeit [-]	<i>KV_{i,k,j}</i> Kalibriervektor auf Anschnitt j <i>I_{i,g,j}</i> Zustandsindex für Merkmal i nach Master-	1,5 1,5 1,0						
<i>T</i> Verkehrslastklasse (T1 "sehr leicht" bist T6 "sehr schwer")	funktion $I_{i,t,j}$ Ermitt. Zustandsindex zu t auf Abschnitt j $I_{i,g,j}(t)$ Zustandsindex zu t auf Abschnitt j nach Masterfunktion	\$\vec{n}\$ 0.5 \$\vec{n}\$ 10 15 20 25 30 35 40 45 50 \$\vec{N}\$ 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 Stetige Zeit t [a]						
Funktionsparameter Zustandsfunktioner	Funktionsparameter Zustandsfunktionen für Nationalstraßen Funktionsparameter Zustandsfunktionen für Nationalstraßen							

Fahstreifen	Belagss	chäden	Spurr	innen	Längse	benheit	Griffigkeit		
	b	с	а	b	a	b	а	b	
Linker FS	1,2934	0,3201	3,0613	0,5394	1,7527	0,0051	0,7337	-0,0166	
Rechter FS	1,3413	0,2692	-1,0249	3,0950	1,5448	0,0250	0,6059	-0,0213	
Kale sterrer			1.25(0)	4.0120					

ĺ		Т	'1	Т	2	Т3		
		I5 ≤ 3	I5 > 3	I5 ≤ 3	I5 > 3	I5 ≤ 3	I5 > 3	
ſ	а	0,8573	-	-	-	-	0,9626	
ſ	b	0,0615	0,4713	0,4593	0,4276	0,2767	0,0520	
ſ	с	-	0,4932	0,4496	0,0795	0,6062	-	

⁸⁷ Eigene Darstellung auf Basis von SCAZZIGA, I. (2008)

3.2.4 Zustandsfunktionen im Vergleich (AT, DE, CH)

Ein direkter Vergleich der Zustandsfunktionen kann an dieser Stelle in erster Linie nur qualitativ in Hinblick auf die Form der Funktion und die berücksichtigten Einflüsse erfolgen (Tabelle 14). Der Grund dafür ergibt sich gemäß Kapitel 2.4.4 u.a. daraus, dass die Messwerte als Grundlage der Regressionsrechnungen nicht direkt vergleichbar sind, da sie teilweise mit unterschiedlichen Verfahren erhoben, zusammengefasst und bewertet wurden. Aufschlussreich in Hinblick auf die Qualität wären vor allem eine gewisse Homogenität in Hinblick auf mittlere Lebensdauer und Progressivität des Zustandsverlaufes.

Eine Grundlage zum Vergleich ist nur bei den Spurrinnen vorhanden (vgl. Kap. 2.4.4), was bei den Zustandsfunktionen aus Deutschland eine Umrechnung auf Zustandsgrößen erforderlich macht (Abbildung 15). Eine Darstellung der österreichischen Funktion im 2D-Koordinatensystem ist streng genommen auch nicht korrekt. Bei der Ableitung von Verhaltensfunktionen in Deutschland wurde die Annahme getroffen, dass die zeitliche Entwicklung der Spurrinnen degressiv ist. Tatsächlich ergibt sich bei der Umrechnung von Zustandswerten auf Zustandsgrößen einen linear bis leicht progressiven Verlauf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im deutschsprachigen Raum standardmäßig deterministische Zustandsprognosemodelle auf empirischer Basis verwendet werden, die für eine Anwendung auf den Einzelabschnitt so transformiert werden, dass sie durch die letzte Erfassung verlaufen. Das Verfahren in Deutschland unterscheidet sich durch die Verwendung von mehreren Masterfunktionen (Verhaltensklassen) wesentlich von den Verfahren in Österreich und der Schweiz. Eine Gegenüberstellung von Prognosen mit den verwendeten Funktionen auf Basis von realen Daten (Erfassungen aus Land Steiermark) war auch für das Merkmal Spurrinnen nicht möglich, da die Zustandsfunktionen Kenntnis über das Deckschichtalter und die Verkehrsbelastung benötigen. Diese Informationen lagen für die verfügbaren Erfassungsdaten aber nicht vor.



Abbildung 15: Gegenüberstellung von Zustandsfunktionen für Spurrinnen in AT, DE und in der CH

Tabelle 14: V	ergleich der	r abgeleiteten /	Zustandsfunktionen	für Prognose in	PMS (AT, DE und CH	()

	Merkmal		Österreich (AT)		Deutschland (DE)		Schweiz (CH)
1.	Art der Prognose	1.	Deterministisch	1.	Deterministisch	1.	Deterministisch
2.	Abhängige Variablen	2.	Zustandsgrößen	2.	Zustandswerte	2.	Zustandswerte (Zustandsindizes) und Zustandsgrößen
3.	Unabhängige Variablen	3.	Deckschichtalter, Verkehrsbelas- tungskoeffizient, kumulierte Normlastwechsel, Frostindex	3.	Deckschichtalter	3.	Deckschichtalter
4.	Anpassung der Prognose auf den Einzelabschnitt	4.	Verschiebung oder Skalierung durch die letzte Erfassung	4.	Vertikale Verschiebung durch die letzte Erfassung und Verhaltensklassen	4.	Horizontale Verschiebung durch die letzte Erfassung
5.	Unterschiedliche Zustandsfunktionen nach	5.	Straßenkategorie, Bauweise, Bautyp	5.	Bauweise	5.	Straßenkategorie, Verkehrslast- klasse, Fahrstreifen, Tragfähigkeit
6.	Art des Modells; Art der Funktionen	6.	Multiples Modell; lineare Funktion, logarithmische Funktion	6.	Einfaches Modell; Potenzfunktion, lineare Funktion	6.	Einfaches Modell; lineare Funktion, Potenzfunktion, logarithmische Funktion, Exponentialfunktion

3.3 Anpassung von stetigen Zustandsprognosemodellen

Werden bei der Verwendung eines Modells Abweichungen von den empirisch gesammelten Daten registriert, ist es für die Erhöhung der Prognosegenauigkeit erforderlich, das Modell an die tatsächlich beobachtete Situation anzupassen. Dabei wird das Problem in umgekehrter Richtung betrachtet - das Ergebnis ist bekannt, gesucht werden die Parameter, die dieses Ergebnis bewirken (bei der Prognose sind die Parameter bekannt, gesucht wird das Ergebnis). Abweichungen der Messwerte von den Prognosewerten und Erfordernis zur Anpassung können sich generell in folgenden Fällen ergeben (Abbildung 16):

- Räumliche/funktionelle Variabilität: Der Erfassungsbereich der Zustandsdaten stimmt nicht dem Anwendungsbereich des PMS-Modell überein. Das Modell wiederspiegelt andere klimatische Einflüsse oder ist für ein Netz mit hohem/niedrigem Anforderungsniveau entwickelt. Ist das Anforderungsniveau hoch und wird es tatsächlich erreicht, so ist es unwahrscheinlicher, dass schlechte Zustände gemessen bzw. prognostiziert werden.
- Zeitliche Variabilität: Sind Daten nur ausgewählter Altersklassen bekannt (Zensur), ist die ermittelte Zustandsfunktion mit Bias behaftet. Neue Daten können außerdem Hinweise auf Tendenzen in der Erhaltungspraxis, Verkehrsaufkommen, Bautypen, Achslasten und Klimawandel liefern.
- Heterogenität des Systems: Alle Ein-• flussgrößen, die im Modell nicht enthalten oder nicht erfassbar sind, bewirken verschiede Abweichungen von dem mittleren Zustandsverlauf. Diese Art Variation kann durch Sammlung zusätzlicher Information nicht entfernt werden.

Ein Prognosemodell in Bezug auf den Zustand des Straßenoberbaus kann sich sowohl auf das ganze Netz, als auch einen einzelnen Straßenabschnitt beziehen. Der Standardweg bei Ableitung von Modellen ist eine Charakteristik auf Netzebene zu finden, die für alle Abschnitte gültig ist. Das Modell wird durch gleichzeitige Betrachtung aller Datensätze der verschiedenen Anlagen abgeleitet. Wenn sich alle Straßenabschnitte gleich mit der Zeit verhalten, dann kann das Netzmodell ohne weiteres auf den Einzelfall angewendet werden. Nachdem das in der Realität nicht der Fall ist, muss das bestehende Modell so verändert oder angepasst werden, dass es auch für den Einzelabschnitt/Anlage zuverlässige Prognosen liefert. Bei dieser Veränderung oder Kalibrierung soll die Modellspezifikation (Art und Anzahl der Variablen) beibehalten werden. Variiert werden entweder alle Parameter (z.B. Regression) oder nur bestimmte Parameter (z.B. Skalierung). Für diese Anpassung steht aber nur die abschnittsspezifische Information zur Verfügung, die oft unzureichend ist, alle Parameter eines Modells zuverlässig zu bestimmen (z.B. Modell mit 3 Parameter und nur 2 Erfassungen). Auch wenn eine Schätzung möglich ist, ist sie nie effizient, d.h. die Standardfehler der Parameter sind groß, die Konfidenzintervalle - breit. Von großer

Bedeutung ist dann die Entscheidung, ob ein oder mehr Parameter fix gehalten werden können. Um einen Parameter einen fixen Wert (oder Grenzen) zuzuordnen müssen zusätzliche Information vorhanden sein, z.B. eine Ähnlichkeit in dem Verhalten der Einzelabschnitte, die auf Netzebene festgestellt wurde (z.B. Form der Zustandsfunktion). Solche Informationen können auch Experimente, mechanistische Modelle, Randbedingungen (bekannter Zustand zu t=0) und theoretische Kenntnisse liefern.



Abbildung 16: Erfordernis zur Anpassung von Modellen aufgrund verschiedener Systemeigenschaften

Ist theoretisch ein komplettes Model vorhanden, das alle Einflussfaktoren samt erwartungstreuen Parametern enthält, dann ist die Eingabe der Werte der erklärenden Variablen im Modell für die Anpassung ausreichend. Da die Verwendung von solchen Modellen in absehbarer Zukunft nicht als realistisch erscheint, werden eine Reihe von Verfahren zur Kalibrierung im PMS⁸⁸ entwickelt (Abbildung 17)⁸⁹:

•

•

- Deterministisch stetig/shift: Ist nur eine Erfassung vorhanden und das Alter unbekannt, so kann die Anpassung durch horizontale oder vertikale Verschiebung erfolgen. Die prognostizierte Lebensdauer hängt wesentlich von der Art der Masterfunktion und der Art der Verschiebung und berücksichtigt nicht die Entwicklungsgeschichte.
- Deterministisch stetig/family curves & shift: Bei Modellen mit einer Funktionenschar sind Kenntnis über das Alter und eine Erfassung für Anwendung der Prognose erforderlich. Die Anpassung erfolgt durch vertikale Verschiebung der für den Abschnitt zutreffenden Zustandsfunktion.
- Deterministisch stetig/scale: Voraussetzung für Anwendung dieser Methode sind zwei Erfassungen oder eine Erfassung und Alter samt den Ausgangszustand. Durch Verwendung eines Skalierungsfaktors wird die Kontinuität nicht unterbrochen und zumindest theoretisch die Nachvollziehbarkeit der Vergangenheit gegeben.
- Deterministisch stetig/Regression: Liegt eine Reihe von Messwerten vor, kann die Masterfunktion durch Regression angepasst werden. Die Parameterschätzung erfolgt z.B. durch OLS (vgl. Kap. 3.3.2), wobei die Anzahl der Messwerte größer als die Anzahl der unbekannten Parameter sein soll. Auf Kosten von schlechterer Anpassung können Parameter fest gehalten werden, um die Form der Funktion zu behalten.
- Stochastisch stetig/Regression: Durch Eingabe von Konfidenzintervallen wird die Wahrscheinlichkeit für Auftreten eines Zustands zu jedem Zeitpunkt berechnet (Zustandsverteilung). Durch die Definition einer Ausfallsgrenze ergibt sich die Ausfallsverteilung. Enthält das Modell mehr als eine erklärende Variable können die Parameter durch multiple Regression geschätzt werden oder im Fall von diskreten Zuständen (Noten) durch logistische Regression.



Abbildung 17: Anpassung von stetigen Zustandsprognosemodellen über Verschiebung, Skalierung und Regression der Masterfunktion⁸⁹

88 vgl. HOFFMANN, M. (2014); WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S201-210

⁸⁹ Eigene Darstellung auf Basis von HOFFMANN, M. (2014)

3.3.1 Anpassung durch Verschiebung und Skalierung

Eine Zustandsprognose auf Basis einer horizontalen bzw. vertikalen Verschiebung ist deterministisch, da der Verlauf der Masterfunktion keiner Variationen unterliegt. Die Anpassung durch vertikale Verschiebung benötigt eine Zustandserfassung, Abschnittsalter und bekannte Masterfunktion. Bei der Prognose auf Basis horizontaler Verschiebung ist das Alter nicht notwendig. Diese Prognosemethode findet oft Verwendung bei Vorhandensein von nur einer netzweiten Erfassung. Ihre Anwendung aber bewirkt eine Verzerrung des Ausgangszustandes und der Altersverteilung. Mehrmalige Erfassungen führen zu keiner Erhöhung der Prognosegenauigkeit, da die Verschiebung immer durch den letzten Zustand erfolgt. Die Anpassung mit Skalierung kann erst bei Vorliegen von zwei Erfassungen oder eine Erfassung und Alter jeweils mit dem Ausgangszustand erfolgen. Abbildung 18 zeigt die Anpassung von Zustandsprognosen mit horizontaler und vertikaler Verschiebung sowie Skalierung und einer Kombination zwischen Verschiebung und Skalierung am Beispiel einer Potenzfunktion. Diese Art der Anpassung ist mit anderen Masterfunktionen auch möglich, auf deren Spezifika jedoch Rücksicht genommen werden sollte.

Die Anpassung der deterministischen Prognose auf den Einzelabschnitt kann durch die horizontale Verschiebung der Masterfunktion in den letzten Messwert erfolgen. Dabei werden die Parameter der Masterfunktion nicht wertmäßig verändert. Die Erfassungen auf den Einzelabschnitten, die von der Masterfunktion abweichen, werden als zeitversetztes Erreichen des gemessenen Zustandes erklärt. Wenn die erfasste Schädigung über der Masterfunktion liegt, wird der deterministisch prognostizierte Zustand vorzeitig erreicht bzw. verzögert, wenn sie darunter liegt. Der Verschiebungsvektor Δt hat die Dimension der erklärenden Variable (hier: Zeit) und kann nur auf Basis des erfassten Zustandes und der Parameter der Masterfunktion ohne Kenntnis über das tatsächliche Alter berechnet werden. Die Verschlechterungsrate (Inkrement bzw. Dekrement bei der Griffigkeit) bleibt





Abbildung 18: Anpassung von der Zustandsprognose über vertikale und horizontale Verschiebung bzw. Skalierung der Masterfunktion (Potenz) und resultierende Anlagealter und Ausfallszeitpunkt

für jeden Zustand konstant. Diese von dem Alter unabhängige Entwicklung bewirkt gleiche Prognosewerte für alle Abschnitte, auf die gleiche Messwerte erfasst sind. Dies hat bei einer visuellen Erfassung (Diskretisierung der Erfassungszustände z.B. bei Spurrinnen) und definierten Ausfallsgrenze der gleichzeitige Ausfall von großem Prozent der Anlagen zur Folge.

Die Zustandsprognose auf Basis einer vertikalen Verschiebung besteht darin, die Masterfunktion in den letzten auf einen Abschnitt beobachteten Zustand vertikal zu verschieben. Die Funktionsparameter bleiben wie bei der horizontalen Verschiebung unverändert. Die Verschiebungsvektor Δy hat dieselbe Dimension wie der erfasste Zustand und entspricht der Differenz zwischen dem Messwert und den Wert der Masterfunktion zum betrachteten Zeitpunkt. Um den letzten zu ermitteln ist Kenntnis über das Alter des Abschnitts vorausgesetzt. Liegt der erfasste Zustand über dem Wert der Masterfunktion zum Zeitpunkt der Erfassung, wird die Funktion nach oben verschoben. Die daraus resultierende Schädigung zu t=0 kann unzulässig sein, aber nicht z.B. durch die Anforderungen der Abnahmeprüfung begrenzt werden, denn dann würde die Durchführung der Anpassung nicht in allen Fällen möglich sein. Liegt der Messwert unter dem Wert der Masterfunktion zum betrachteten Zeitpunkt, wird die Funktion nach unten verschoben und damit der kontinuierliche Verlauf vom Zeitpunkt t=0 unterbrochen. Die Entwicklungsgeschichte auf diesen Abschnitt ist nicht nachvollziehbar. Darüber hinaus ergibt sich zu diesem Zeitpunkt (gemäß der nicht verschobenen Masterfunktion) kommen Kurvenabschnitte zur Anwendung, die sonst außerhalb des üblichen Wertebereichs liegen (dieser Effekt tritt bei horizontaler Verschiebung nicht auf).

Die Zustandsprognose auf Basis eines Satzes von Zustandsfunktionen wird in Deutschland verwendet und unterscheidet sich durch die Verwendung von mehreren Masterfunktionen, die die unterschiedliche Geschwindigkeit des Verschlechterungsprozesses auf den Einzelabschnitt wiedergeben sollten. Für den konkreten Abschnitt ist diese Funktion in Kraft, die den geringsten Abstand von dem Erfassungswert aufweist. Die Anpassung erfolgt dann wie oben mit vertikaler Verschiebung. Die Überlegung für verschiedene Progressivität scheint auf den ersten Blick plausibel zu sein. Doch erst bei der Anwendung und Vergleich der Ergebnisse werden die Schwachstellen dieser Methodik erkennbar. Abbildung 19 zeigt die Prognose auf Basis eines Satzes von progressiven Verhaltenskurven. Der Zustand ist zuletzt zum t_{NUN} erfasst, wobei der Messwert an der Grenze zwischen zwei Verhaltensklassen liegt. Die beiden Verhaltensfunktionen werden vertikal in diesen Zustand verschoben. Ist der Messwert geringfügig höher oder

niedriger, gilt die jeweilige Verhaltensfunktion. Für Abschnitte mit ähnlichen Schadensbildern ergeben sich erhebliche Unterschiede in der Lebensdauer (vgl. auch Abbildung 14). Unabhängig von dem Ausmaß der erfassten Schädigung zum betrachteten Zeitpunkt, können keine Werte in den eingekreisten Bereichen prognostiziert werden. Ist dieser Effekt auf Abschnittsebene nicht so spürbar, bewirkt er auf Netzebene je nach Art der Masterfunktion eine erhebliche Verzerrung der prognostizierten Zustandsverteilung. Anstatt einer stetigen Verteilung ergibt sich eine Diskretisierung in unregelmäßigen Klassen mit Lücken.



Abbildung 19: Konzertration der Ergebnisse bei Anpassung der Prognose über Satz von Verhaltenskurven und vertikale Verschiebung

Die Zustandsprognose auf Basis einer Skalierung erfolgt indem die Parameter der deterministischen Masterfunktion so verändert werden, dass sie durch einen (den letzten) gemessen Zustand verläuft. Das Verfahren basiert auf die Überlegung, dass ein schnellerer bzw. langsamer Schadenfortschritt in der Vergangenheit unter selben Bedingungen auch in der Zukunft zu erwarten ist – selbst wenn diese nicht im Detail bekannt sind (sie werden implizit berücksichtigt). Diese Annahme ist nur dann erfüllt, wenn die Form der Masterfunktion (z.B. Potenzzahl) beibehalten wird. Zudem soll der Skalierungsfaktor das Vorzeichen des zu skalierenden Modellparameters nicht verändern.

Ausgewählte Nachteile dieser Methodik werden anhand von Beispielen, die in der Praxis vorkommen, in Abbildung 20 dargestellt. Ist der Ausgangszustand eines Abschnittes z.B. auf Basis einer Abnahmeprüfung nicht bekannt, wird das Interzept der Masterfunktion verwendet. Ist der erfasste Zustand besser als der Ausgangszustand (β_0), so ergibt sich ein negativer Skalierungsfaktor. Eine Prognose auf Basis der so skalierten Funktion wird eine mit der Zeit abnehmende Schädigung ergeben. In diesem Fall ist auch die horizontale Verschiebung nicht anwendbar, sodass nur die vertikale Verschiebung als einzige Möglichkeit bleibt. Wenn der tatsächliche Ausgangzustand auf den Abschnitt bekannt ist, sind solche Fälle auf Messfehler zurückzuführen, da eine Zustandsverbesserung für die meisten Schadensmerkmale nicht stattfindet. Gemäß Literaturangaben⁹⁰ ist eine Verbesserung der Griffigkeit in den ersten Jahren nach der Maßnahme zu erwarten, die durch Abfahren des Bindemittelfilms und Freilegung der Gesteinsoberfläche verursacht wird. Von größerer Bedeutung in der Praxis ist das zweite Beispiel, bei dem der erfasste Zustand gleich dem Ausgangszustand ist (im Einzelfall $\beta_0=Y_{t,0}=Y_{t,NUN}=0$). Ein großer Anteil der Abschnitte mit visuell erfassten Schadensmerkmalen Risse, Oberflächenschäden und Spurrinnen aus Land Steiermark fallen in dieser Kategorie. In diesem Fall ist der Skalierungsfaktor gleich Null, wobei sowohl vertikale als auch horizontale Verschiebungen möglich sind. Im dritten Beispiel ist der Abschnitt trotz des fortgeschrittenen Alters noch in einen relativ guten Zustand. Die Skalierung ist zwar möglich, aber die resultierende Lebensdauer ist unrealistisch hoch. Ähnlich ergibt sich eine unrealistisch kurze Restlebensdauer, wenn einen relativ schlechten Zustand relativ früh in der Lebensdauer erfasst wird. Eine wissenschaftlich begründete Abgrenzung der hier betroffenen Abschnitte ist nicht möglich. Diese Gründe haben die Einführung einer unteren und oberen Grenze für die Skalierungsfaktoren in der Praxis geführt. Liegen zwei Messungen mit gleichbleibendem Zustand vor, und ist das Alter unbekannt, wird die Skalierung nicht durchführbar sein (das letzte Beispiel in Abbildung 20).



Abbildung 20: Ausgewählte Beschränkungen bei der Anpassung der Prognose auf den Einzelabschnitt über Skalierung der Masterfunktion

Die Skalierung ist nicht mit jeder Masterfunktion gleichermaßen anwendbar. Bei einer exponentiellen Funktion z.B. wird ein multiplikatives Skalierungsparameter die Anfangsschädigung β_0 verändern. Durch Multiplikation mit dem exponentiellen Modellparameter und beibehalten des Vorzeichens verändert sich die Form nicht (vgl. Abbildung 12). Die Multiplikation der gesamten Funktion mit einem Parameter kann als eine Kombination von vertikaler Verschiebung und Skalierung angesehen werden (bei $\beta_0 \neq 0$), die bei einigen von den vorgestellten Beschränkungen der Skalierung angewendet werden kann.

Die Regression wird ausführlich in den folgenden Kapiteln betrachtet und dient hier nur als Vergleichsbasis (Abbildung 21), da die Regressionsfunktion die beste Anpassung an die Messreihe im Einzelfall erlaubt. Die Ergebnisse von vertikaler und horizontaler Verschiebung stimmen nur im Fall eines linearen Schadensverlaufes (β_2 =1,0) überein. Mit einer Ausnahme (x_a =30; β_2 =4,0) ergibt die Skalierung immer die schlechteste Anpassung an die Messwerte. Obwohl bei dieser Methode das Alter unverzerrt bleibt, ist die Abweichung der Restlebensdauer von der Regression in allen Fällen am Größten. Mit zunehmender Progressivität wird die Anpassung über vertikale Verschiebung immer schlechter, das Alter nicht berechenbar. Das Beispiel zeigt noch, dass wenn die Masterfunktion die Schadensentwicklung möglichst gut beschreibt ($x_a=30$; $\beta_2=2,0$ und $x_a=45$; $\beta_2=0,7$), sind die Ergebnisse von Verschiebung und Skalierung ziemlich gleich. Unabhängig davon, ob die Masterfunktion den tatsächlichen Verlauf gut beschreibt, erlaubt die horizontale Verschiebung bessere Anpassung bei progressivem Verlauf, die vertikale - bei degressivem Verlauf. In Bezug auf die Schätzung der (Rest-)Lebensdauer ist das genau umgekehrt. Obwohl für die Erhaltungsplanung die Ermittlung der Lebensdauer wichtiger als die Anpassung an der geschichtlichen Entwicklung ist, kann keiner der drei Methoden an dieser Stelle den Vorzug gegeben werden. Eine Anwendung dieser Methoden auf Netzebene ist anhand einer Simulation und anhand realer Daten in Kapitel 3.5 gegeben.

⁹⁰ vgl. WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) S183, 184

Zusätzlich sollen die Anpassungsfähigkeit der verschiedenen

Ansätze an die geschichtliche Entwicklung der Abschnitte,

ausgedrückt durch die Summe der quadrierten Abweichungen (SSE), die resultierende Restlebensdauer und das Anlagenalter

Seite 66

Bsp.: Vergleich deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie mit Skalierung der Masterfunktion durch die letzte Erfassung und Regression der Messreihe (Einzelfall)

bestimmt werden.

Für zwei Straßenabschnitte sind das Alter und der Zustand in Form von 4 Erfassungen bekannt. Eine Prognose soll über horizontale und vertikale Verschiebung sowie Skalierung der Masterfunktion $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{-1} \beta_2$ für verschiedene Progressivität $\beta_2 = 0.5/0.7/1.0/2.0/3.0/4.0$ und über Regression als Vergleichsbasis erfolgen.



Abbildung 21: Deterministische Zustandsprognose aus Anpassung einer Masterfunktion über vertikale und horizontale Verschiebung bzw. Skalierung und Vergleich mit nicht linearer Regression auf den Einzelabschnitt

3.3.2 Prognose mittels bivariater Regression

Die bivariate (einfache) Regression beschäftigt sich mit der Analyse von zwei Variablen, zwischen denen ein vermuteter Zusammenhang besteht. Dabei wird unterstellt, dass die eine Variable (unabhängige Variable) eine Auswirkung auf die andere Variable (abhängige Variable) hat. Das Ziel ist, diese Beziehung durch mathematische Mittel (in Form einer Gleichung) auszudrücken, sodass die Schätzung bzw. Prognose der abhängige Variable Y für gegebene Werte der unabhängigen Variable x möglich wird. In der Erhaltung sind die Zusammenhänge nicht exakt (deterministisch), sondern vielfach stochastisch, wobei der Regressionsgleichung nur im Durchschnitt stimmt. Die Abweichungen werden durch alle verschiedenen von x Faktoren, die Y beeinflussen und nicht beobachtet bzw. berücksichtigt werden, verursacht und in der Modellgleichung durch den Störterm berücksichtigt.

Die Berechnungsgrundlagen für bivariate Regression mit und ohne Interzept sind in Tabelle 15 zusammengefasst und in der Literatur⁹¹ ausführlich erörtert. Beziehungen, bei denen die abhängige Variable von mehreren Einflussfaktoren abhängig ist, lassen sich durch multiple Regression behandeln (vgl. Kap. 3.3.3). Zur Modellierung von komplexen interdependenten und mehrstufigen Zusammenhängen sowie Schätzung von indirekten Effekten werden Strukturgleichungsmodelle⁹² verwendet, deren Behandlung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Keines von den oben erwähnten statistischen Verfahren aber erlaubt Aussagen über Kausalität bzw. Richtung des Einflusses.

Die unbekannten Koeffizienten der Regressionsfunktion werden anhand von einer Stichprobe (vom Umfang n) aus der Grundgesamtheit geschätzt, wofür verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen. Die Methode der Kleinsten Quadrate (OLS) minimiert die quadrierten Abweichungen der Beobachtungswerte von den Schätzwerten. Bei der Maximum-Likelihood-Methode (MLE) werden die Parameter so geschätzt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Beobachtungswerte ein Maximum wird. Diese Verfahren werden in Tabelle 16 zusammengefasst und anhand von einfachen Beispielen demonstriert. Ein Maß zur Beurteilung der Güte des so geschätzten Modells ist das Bestimmtheitsmaß R², ausgedrückt als Verhältnis der Varianz der gefitteten Werte zur Varianz der beobachteten Werte von Y. R² zeigt den Anteil der Streuung von Y, die durch die Regression erklärt wird und ist somit eine normierte Größe, die für Modelle mit Interzept Werte zwischen 0 (kein Zusammenhang) und 1 (exakter Zusammenhang) aufnehmen kann.

Unter der Einhaltung von bestimmten Annahmen (Gaus-Markov Annahmen) sind die Schätzungen der Regressionskoeffizienten erwartungstreu und effizient. In den meisten Fällen ist auch die Genauigkeit dieser Schätzungen von Interesse. Wird zusätzlich eine Annahme über die Verteilung der Störterme getroffen, lassen sich Intervallschätzer bzw. Konfidenzintervalle für die Parameter berechnen. Werden theoretisch wiederholt Stichproben gezogen und Konfidenzintervalle jedes Mal berechnet, so ist bei einem Signifikanzniveau von 5% zu erwarten, dass 95% der berechneten Intervalle den wahren Parameterwert enthalten. Anhand von Intervallschätzern kann auch eine Vermutung (Hypothese) für die Grundgesamtheit geprüft werden. Es wird z.B. vermutet, dass zwischen x und Y ein Zusammenhang besteht. Die Nullhypothese wird als das Gegenteil formuliert (H₀ – kein Zusammenhang). Sie wird als richtig angenommen und erst wenn sie nicht bestätigt wird, kann sie zugunsten der Alternativhypothese (H_1 – Zusammenhang) verworfen werden. Konfidenzintervalle lassen sich ähnlich auch für den Erwartungswert (nachfolgend nur als Konfidenzintervall bezeichnet) und für künftige Einzelbeobachtungen der abhängigen Variable (Prognoseintervall) berechnen. Werden diese Intervalle für alle Werte der unabhängigen Variablen berechnet, so ergibt sich ein Konfidenz- bzw. Prognosestreifen um die Regressionsfunktion. Die Breite des Prognoseintervalls ist ein Maß für die Zuverlässigkeit der Prognose und hängt u.a. von folgenden Parametern ab⁹³:

⁹¹ vgl. STOCKER, H. (2014); BACKHAUS, K. et al. (2011a) S55-118; WOOLDRIDGE, J.M. (2013) S22-59

⁹² vgl. BACKHAUS, K. et al. (2011b) S63-116; WOOLDRIDGE, J.M. (2013) S554-575; WEIBER, R. et al. (2014)

⁹³ vgl. BORTZ, J. et al. (2010) S195-197; STOCKER, H. (2014); HAYTER, A. (2012) S569-57

- Signifikanzniveau: Je niedriger die geforderte Irrtumswahrscheinlichkeit α bzw. höher das entsprechende Konfidenzniveau 1-α, desto größer ist das entsprechende Quantil der studentschen t-Verteilung und breiter das Konfidenz- bzw. Prognoseintervall.
- Anzahl an Messwerten: Je größer die Anzahl der Erfassungen n ist, desto kleiner wird das Konfidenzintervall.
- Standardfehler der Regression: Je größer der Standardfehler der Regression s bzw. die Schätzung der Fehlervarianz s², umso schlechter ist die Anpassung und umso breiter ist das Konfidenzintervall.
- Varianz der unabhängigen Variable: Mit Zunahme der Varianz des Regressors ist das Modell über einen größeren Wertebereich abgesichert und der Konfidenzintervall wird kleiner.
- Abstand vom Mittelwert: Konfidenz- und Prognoseintervalle sind an der Stelle x₀=x̄ am schmalsten. Mit zunehmendem Abstand vom Mittelwert der unabhängigen Variable wird die Zuverlässigkeit geringer und das Intervall breiter.
- Anzahl an Modellparametern: Mit der Anzahl der zu bestimmenden Parameter, verringern sich die Freiheitsgraden und das Konfidenzintervall wird breiter.

Ein Überblick über den Einfluss der einzelnen Parameter liefert noch Abbildung 22. Die beste Anpassung an den Daten wird in allen Fällen durch dieselbe lineare Funktion erreicht. Variiert wird jeweils ein Faktor, während die anderen konstant gehalten werden. Mit der Anzahl der Messwerte verändert sich zwangsläufig auch die Varianz des Regressors. So wird mit Zunahme der Anzahl von Messwerten das Konfidenzintervall immer enger. Das Prognoseintervall verändert sich aber nicht vorhersehbar und soll nicht unbedingt enger werden. Bei einer unendlich großen Anzahl von Erfassungen konvergiert die Breite des Konfidenzintervalls für den Erwartungswert gegen Null. Das Konfidenzintervall an der Stelle x₀=0 gibt den Vertrauensbereich für die Regressionskonstante β_0 an. Der Einfluss der Freiheitsgraden auf die Quantile der t-Verteilung ist bei df =1 am größten, nimmt mit Vergrößerung des Stichprobenumfangs rasch ab und konvergiert ab ca. df ≥10 langsam gegen einen endlichen Wert. Für n>30 kann die t-Verteilung durch die Standardnormalverteilung approximiert werden.

Bsp.: Bedeutung von Anzahl Daten, der Streuung, Anzahl Parameter und Standardfehler der Regression für die Zuverlässigkeit von Prognosen



Abbildung 22: Einfluss von Datenmenge, Varianz des Regressors, Parameteranzahl und S.E. der Regression auf die Breite des Konfidenz- und Prognoseintervalls

Wird ein Modell ohne Interzept spezifiziert, so sind Konfidenz- und Prognosebänder nicht mehr hyperbolisch sondern trichterförmig. Bei der Regression durch den Ursprung (RTO) erfolgen die Berechnungen in üblicher Weise aber ohne Mittelwertkorrektur (vgl. Tabelle 15). Die Vernachlässigung der Konstante kann negative Folgen für das Modell haben. Sind z.B. die Werte der abhängigen Variable im Modell ohne Interzept mit systematischen Messfehlern behaftet, dann kann der Funktionsverlauf nicht mehr erwartungstreu geschätzt werden. In einem Modell mit Interzept hat solche Verzerrung eine Auswirkung nur auf die Konstante. Wenn das konstante Glied Null ist, dann ist das Modell auch weniger flexibel, die Anpassung in der Regel schlechter. In der Literatur⁹⁴ wird betont, dass Modelle durch den Ursprung nur dann verwendet werden sollten, wenn eine klare Begründung für Nullsetzen der Konstante vorhanden ist. So darf das Ausmaß der Rissschäden gleich nach einer Maßnahme oder nach dem Neubau nicht von Null verschieden sein. Andere Schadensmerkmale wie Griffigkeit und Längsebenheit weisen ein positives Interzept auf. Da in der Literatur und Software-Produkten verschiedene Formeln für die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes verwendet werden, ist der Vergleich mit Modellen mit Interzept nicht immer gegeben bzw. erschwert.

Eine Regression ohne Interzept kann auch für die Verkehrsprognose verwendet werden, da eine Belastung in Form von NLW_{kum} erst nach der Verkehrsfreigabe kumuliert werden kann. Sind am Einzelabschnitt neben Alters- auch Verkehrsdaten gemäß Abbildung 23 vorhanden, dann kann mittels bivariater Regression nur die eine Größe berücksichtigt werden. Auch wenn der Verkehr ein besserer Prädiktor als das Alter ist, führt das nicht zu genaueren Prognosen, da auch in diesem Fall eine Umrechnung auf Zeit bzw. eine Prognose des Verkehrs erforderlich ist. Im vorliegenden Beispiel wird durch Regression QR vs. Alter eine durchschnittliche Lebensdauer von 19,25 Jahre ermittelt, wobei die Prognose über Verkehr und Zeit 19,19 Jahre ergibt. In der Regel ist der Zustandsverlauf über die Zeit geringfügig progressiver als über den Verkehr, da der Verkehr selbst leicht progressiv mit der Zeit zuwächst.

Mit der Eingabe von Konfidenz- und Prog-

Bsp.: Zustandsprognose auf Basis von Alters- und Verkehrsdaten am Einzelabschnitt

Für einen Abschnitt aus der LTPP-	QR	Alter	NLW _{kum}
Datenbank liegen Erfassungsdaten zu	[%]	t [-]	[Mio]
Querrissen (11x) sowie die Anzahl der	0,00	0	0,00
kumulierten Normlastwechsel (NLW)	-	1	0,85
vor. Auf Basis dieser Grundlagen sind	0,00	2	1,72
folgende Aufgaben zu lösen:	-	3	2,50
• Zustandsprognose & Lebensdauer	0,00	4	3,28
aus bivariatar Pagrassion über Alter	-	5	4,01
aus bivariater Regression über Alter	0,00	6	4,68
• Zustandsprognose & NLW bis zum	4,41	7	5,44
Ausfall aus bivariater Regression	5,86	8	6,44
• Verkehrsprognose NLW mittels	21,97	9	7,67
bivariater Regression und	35,59	10	8,98
Bestimmung Ausfallszeitpunkt	36,84	11	10,27
• Vergleich der Ergebnisse zur	40,66	12	11,54
Lebensdauer aus der Berechnung	-	13	12,66
über die Zeit bzw. NLW	-	14	13,58
	52.24	15	14 53

Zustandsfunktion Zeit vs. Schäden







Abbildung 23: Zustandsprognose mittels bivariater nichtlinearer Regression über Alter und kumulative Verkehrsbelastung am Einzelabschnitt

noseintervallen werden die Grundlagen für den Übergang von einer deterministischen zu einer stochastischen Prognosen gegeben. Mit der Annahme für normalverteilte Störterme ($\epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$) ist die Zu-

⁹⁴ vgl. WOOLDRIGE, J.M. (2013) S57-58; BACKHAUS, K. et al. (2011a) S88

standsverteilung gemäß in Abbildung 24 dargestellten Formeln zu jedem Zeitpunkt definiert. Bei einer gegeben Ausfallsgrenze kann die kumulative Ausfallsverteilung als das Komplement der Überlebenswahrscheinlichkeit berechnet werden. Der symmetrischen Zustandsverteilung entspricht eine linkssteile Dichtefunktion der Ausfälle. So finden Anzahl und Streuung der Messwerte ihre Widerspiegelung in einer Prognose, die das Erreichen von verschiedenen Zuständen zum Zeitpunkt t erlaubt.

Folgend werden die Auswirkungen der Datenmenge und der Anzahl der frei wählbaren Parameter von Potenzfunktionen unterschiedlicher Progressivität untersucht. Angepasst werden Modelle mit und ohne Interzept auf Basis von n=3 bis 7 aufeinanderfolgenden Erfassungen am Einzelabschnitt. Die Anpassung einer degressiven Masterfunktion $(\beta_2=0,5)$ ist in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt. Die Zuverlässigkeit steigt mit der Anzahl der berücksichtigten Erfassungen und mit der Abnahme der zu bestimmenden Parameter. Trotzdem zeigt das Modell ohne Interzept eine schlechtere Anpassung und nicht plausible durchschnittliche Lebensdauer. Die Nullhypothese für Signifikanz der Regression kann erst bei n=5 (mit Interzept) und n=7 (ohne Interzept) verworfen werden. Der Einfluss der gewählten Masterfunktion auf die Lebensdauer und Zustandsverteilung zeigt sich im Vergleich zu einer linearen Masterfunktion mit $\beta_2=1,0$ (Abbildung 27 und Abbildung 28), die eine wesentlich bessere Anpassung an den vorhanden Daten ermöglicht. Der Einfluss der Anzahl an Erfassungen und der frei wählbaren Parameter auf die Breite der Ausfalls- und Zustandsverteilung zeigt eine ähnliche Tendenz wie bei dem degressiven Verlauf. Die Nullhypothese im F-Test kann bereits bei n=5 (mit Interzept) und n=3 (ohne Interzept) verworfen werden. Die beste Anpassung wird durch eine progressive Masterfunktion mit $\beta_2=2,0$ gemäß Abbildung 29 und Abbildung 30 erreicht. In Abbildung 31 wird eine Funktion ohne Parameterrestriktionen geschätzt. Die Konfidenz- und Prognoseintervalle sind im Vergleich zu den Beispielen, wo die Funktionsform (β_2) a priori bekannt ist, we sentlich breiter, die berechneten Parameter instabil. Die resultierende Zustandsverteilung (nicht dargestellt) weist eine sehr große Streuung auf, die Ausfallsverteilung bei der vorgegeben Grenze ist auch bei n=7 nicht definiert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine zuverlässige Schätzung der Lebensdauer am Einzelabschnitt auf Basis von Potenzfunktion Kenntnis über die Schadenscharakteristik (β_2) und eine Anzahl an Erfassungen n≥5 voraussetzt.

Bsp.: Ermittlung der Ausfallsverteilung mittels Regression aus dem t-verteilten Konfidenzintervall (Zustandsverteilung) am Einzelabschnitt

Aus der bivariaten linearen Regression mit der Zustandsfunktion y(t) = $\beta_0 + \beta_1 * t^2 \beta_2$ ergibt sich unmittelbar der prognostizierte Schädigungsverlauf bis zum Ausfallszeitpunkt. Das ebenfalls berechnete t-verteilte Konfidenzintervall repräsentiert auch die mögliche Zustandsverteilung (nicht-standardisiert t-verteilt). Die Ausfallsverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt t lässt sich aus dieser t-Verteilung als jenem Anteil zu t ableiten, der einen Zustandswert $\geq y_a$ aufweist (vgl. auch Tabelle 15 und Tabelle 21).





Bsp.: Zustandsprognose durch Anpassung einer degressiven Masterfunktion mit Interzept auf Basis n erfasster Zustände mittels bivariater Regression mit Konfidenzintervall, Ausfalls- & Zustandsverteilung

Die charakteristische Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2} mit \beta_2 = 0.5$ gegeben. Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung mit freiem Interzept $\beta_0 \neq 0,0$ prognostiziert werden.



Abbildung 25: Zustandsprognose mit Anpassung einer degressiven Masterfunktion mit Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung

100

100

100

100

300%

300%

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Mit Abnahme der Anzahl der Erfassungen bzw. Zunahme der Prognosezeit steigt die Unsicherheit der Aussagen
- Schlechte Anpassung mit $\beta_2=0,5 \rightarrow$ breites Konfidenzintervall
- Die Ø Lebensdauer variiert durch schlechte Anpassung stark und stabilisiert sich bei einer höheren Anzahl von Erfassungen

Schlechtere Anpassung mit $\beta_2=0,5$ ohne Interzept \rightarrow breites

Ohne Interzept ist die Abweichung zwischen Messwerten und

Bsp.: Zustandsprognose durch Anpassung einer <u>degressiven</u> Masterfunktion <u>ohne Interzept</u> auf Basis n erfasster Zustände mittels bivariater Regression mit Konfidenzintervall, Ausfalls- & Zustandsverteilung

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

Konfidenzintervall

Die charakteristische Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^2 \beta_2$ mit $\beta_2 = 0.5$ gegeben. Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung ohne Interzept ($\beta_0 = 0.0$) prognostiziert werden.



Abbildung 26: Zustandsprognose mit Anpassung einer degressiven Masterfunktion ohne Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung
Die charakteristische Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2} \text{ mit } \beta_2 = 1,0$ gegeben. Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung mit freiem Interzept $\beta_0 \neq 0,0$ prognostiziert werden.



Abbildung 27: Zustandsprognose mit Anpassung einer linearen Masterfunktion mit Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung

■ Note 5

■Note 4 ■Note 3

■Note 2

□Note 1

90 100

■ Note 5

■ Note 4 ■Note 3

■Note 2

□ Note 1

90 100

Note 5

■Note 4

■Note 3

■Note 2

□Note 1

90 100

Note 5

■Note 4

■Note 3

■Note 2

□Note 1

90 100

300%

300%

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Bei linearem Zustandsverlauf $\beta_2=1,0$ mit Interzept ist die Anpassung deutlich besser als bei degressivem Verlauf B2=0,5
- Das Konfidenzintervall aus der Ausfallsverteilung wird mit Abnahme der Anzahl von Erfassungen immer breiter
- Das Bestimmtheitsmaß kann aufgrund von Abweichungen einzelner Erfassungen bei n<< zunehmen oder abnehmen

100

Bsp.: Zustandsprognose durch Anpassung einer linearen Masterfunktion ohne Interzept auf Basis n erfasster Zustände mittels bivariater Regression mit Konfidenzintervall, Ausfalls- & Zustandsverteilung

Die charakteristische Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2} \text{ mit } \beta_2 = 1,0$ gegeben. Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung ohne Interzept ($\beta_0 = 0,0$) prognostiziert werden.



Abbildung 28: Zustandsprognose mit Anpassung einer linearen Masterfunktion ohne Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Ohne Interzept ist die Anpassung mit $\beta_2=1,0$ ungünstiger \rightarrow die unerklärte Streuung ist größer, breiteres Konfidenzintervall
- Da nur β_1 als Skaliervariable zu bestimmen ist, steigt die Anzahl der Freiheitsgrade um 1 (im Vergleich mit Interzept)
- Ein linearer Zustandsverlauf liefert im vorliegenden Fall ein

Bsp.: Zustandsprognose durch Anpassung einer progressiven Masterfunktion mit Interzept auf Basis n erfasster Zustände mittels bivariater Regression mit Konfidenzintervall, Ausfalls- & Zustandsverteilung

Die charakteristische Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2}$ mit $\beta_2 = 2,0$ gegeben. Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung mit freiem Interzept $\beta_0 \neq 0,0$ prognostiziert werden.



Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Höheres Bestimmtheitsmaß bei progressivem Verlauf im Vergleich zu linearem oder degressivem Verlauf
- Die Charakteristik von Zustandsverteilung und Ausfallsverteilung wird stabiler, der Konfidenzintervall instabiler
- Das Interzept ist für $\beta_2=2$ positiv (Anfangsschaden >0), für $\beta_2=0,5$ bzw. 1,0 dagegen negativ (erste Schäden bei t>0)



Schadensausmaß [%]

Abbildung 29: Zustandsprognose mit Anpassung einer progressiven Masterfunktion mit Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung

■Note 5

■Note 4

■Note 3

■Note 2

□Note 1

80 90 100

■Note 5

■Note 4

■ Note 3

■Note 2

□Note 1

90 100

Note 5

■Note 4

■Note 3

■Note 2

□ Note 1

90 100

■ Note :

■ Note 4

■ Note 3

■ Note 2

□ Note 1

Stetige Zeit t [-]

250%

Schadensausmaß [%]

*Häufigkeitsdichte

Schadensausmaß um 90° zu Ausfallszeitpunkt gedreht

250%

Schadensausmaß [%]

300%

300%

Stetige Zeit t [-]

80

Stetige Zeit t [-]

Bsp.: Zustandsprognose durch Anpassung einer progressiven Masterfunktion ohne Interzept auf Basis n erfasster Zustände mittels bivariater Regression mit Konfidenzintervall, Ausfalls- & Zustandsverteilung

Die charakteristische Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2} mit \beta_2 = 1,0$ gegeben. Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung ohne Interzept ($\beta_0 = 0,0$) prognostiziert werden.



Abbildung 30: Zustandsprognose mit Anpassung einer progressiven Masterfunktion ohne Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Ohne Interzept verändert sich das Konfidenzintervall auch bei Abnahme von Messwerten kaum noch
- Dasselbe gilt auch für die Ausfallsverteilung \rightarrow Das gewählte $\beta_2=2$ entspricht ~ dem Wert aus Regression ($\beta_2=1,51$ bis 2,29)
- Zuverlässige Prognosen im Abschnitt mit Regression nur bei einem hohen Bestimmtheitsmaß der Masterfunktion am Netz

60 70

70

60

60 70 80 Stetige Zeit t [-]

60 70 80 90 100

200%

200%

Bsp.: Zustandsprognose durch Anpassung einer Zustandsfunktion mit frei bestimmbaren Parametern auf Basis n erfasster Zustände mittels bivariater Regression mit/ohne Interzept

Die Zustandsfunktion eines zum Zeitpunkt t=0 gebauten Straßenabschnittes ist durch $y(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2}$ gegeben, wobei alle Parameter durch OLS zu bestimmen sind. Im ersten Fall ist β_0 frei zu bestimmen und im zweiten Fall ist $\beta_0=0$ (keine Anfangsschädigung). Der Zustand soll auf Basis von n aufeinanderfolgenden Erfassungen bei einer Ausfallsgrenze von 100% Schädigung prognostiziert werden.



Abbildung 31: Zustandsprognose mit Anpassung einer Zustandsfunktion ("best fit") mittels bivariater Regression an erfasste Zustände

Bei der Berechnung der üblichen Konfidenz- und Prognoseintervalle wird vorausgesetzt, dass die Werte der unabhängigen Variable in dem Prognosezeitraum bekannt sind. Eine Prognose, die bedingt auf eine Annahme über die Werte der x-Variable erfolgt, wird als bedingte oder ex post Prognose bezeichnet. In der Erhaltung weisen die Ausprägungen der unabhängigen Variable nicht deterministische, sondern stochastische Natur auf und müssen für Werte außerhalb des Stichprobenumfangs prognostiziert werden. Eine Prognose, die auf Basis von stochastischen erklärenden Variablen erfolgt, wird als unbedingte oder ex ante Prognose bezeichnet. Dieses Problem wird in der Literatur mit wenigen Ausnahmen⁹⁵ nicht diskutiert. Ex ante Prognoseintervalle berücksichtigen drei Typen von Unsicherheit:

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Mit Interzept \rightarrow Beste Übereinstimmung (R² > 0,92) im Vergleich zu der a priori bekannten Masterfunktion (β_2 fix)
- Potenzfunktion mit freien Parametern nicht linearisierbar Konfidenzintervall & Verteilung nicht analytisch berechenbar
- Die berechneten Koeffizienten verändern sich wesentlich, als die Anzahl der Erfassungen um 1 abnimmt/zunimmt
- Die zuverlässige Schätzung der Lebensdauer am Abschnitt •

vgl. MCCULLOUGH, B.D. (1996) S293-304; FELDSTEIN, M.S. (1971) S55-60

- Stichprobenfehler: Unsicherheit bei der Schätzung der Regressionskoeffizienten oder Unsicherheit bei der Berechnung des Erwartungswerts der abhängigen Variable. Übliche Konfidenzintervalle (Konfidenzintervalle für den Erwartungswert) nehmen Rücksicht auf den Stichprobenfehler (sampling error).
- **Zufallsfehler:** Variabilität in den Störterm. Der Zufallsfehler (random error) wird durch klassische Prognoseintervalle (Konfidenzintervalle für Einzelwerte) berücksichtigt.
- Fehler bei der Prognose der unabhängigen Variable: Ex ante Prognoseintervalle erfassen alle drei Typen von Unsicherheit.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, die ex ante Prognoseintervalle zu berechnen. Ein einfacher Versuch, diese Unsicherheit zu berücksichtigen, wäre in der Regressionsgleichung einmal die untere und einmal die obere Grenze des Prognoseintervalls (Prognose von x) einzusetzen. Diese Lösung ist aber mathematisch nicht begründet und geht ebenfalls aus deterministischen Werten aus. Die klassische Regression setzt eine Normalverteilung des Regressionskoeffizienten β voraus. Ist die unabhängige Variable auch normalverteilt, dann sind das Produkt β *x und damit auch die abhängige Variable Y nicht mehr normal- bzw. t-verteilt. Die Prognoseintervalle sind nicht unbedingt symmetrisch und die traditionelle Methodik nicht mehr gültig.

McCullough (1996) hat ein Verfahren zur Berechnung von ex ante Prognoseintervallen anhand von Bootstrapping vorgeschlagen, auf dessen Grundlagen hier ein Beispiel (Abbildung 33) berechnet wird. Das Bootstrapping wird vor allem dort angewendet, wo die analytische Berechnung nicht möglich oder kompliziert ist, oder wenn sie nicht zufriedenstellende Ergebnisse liefert. So können mit Bootstrap z.B. Prognoseintervalle für nicht lineare Funktionen, für unbekannte Verteilungen der Störterme oder für stochastische Regressoren berechnet werden. Ist die Verteilung der unabhängigen Variablen bekannt bzw. durch eigene Regression berechenbar, so können mittels Monte Carlo Simulation ausreichend viele Werte aus dieser Verteilung erzeugt werden, um die stochastische Natur der Variable zu berücksichtigen. Ein kurzer Überblick des Bootstrapping und der Monte Carlo Simulation findet sich in Abbildung 32 mit weiterführenden Hinweisen zur einschlägigen Literatur⁹⁶.

Kurzüberblick Monte Carlo Simulation und Bootstrap in Regressionsmodellen

Monte Carlo Simulation

- Numerische Methode für statistische Simulation mittels Generierung von Zufallszahlen
- Für Lösung von Problemen, die analytisch nicht oder mit sehr hohem Aufwand berechnet werden können
- Beruht auf das Gesetz der großen Zahlen und den Zentralen Grenzwertsatz
- Erzeugung von Stichproben aus einer bekannten Verteilung
- Wiederholung dieses Vorganges sehr oft (z.B. 10.000 Mal)

Bootstrap in Regressionsmodellen



Grundprinzip:

Wiederholte Ziehung (Resampling) mit Zurücklegen aus einer gegebenen Stichprobe und Ermittlung der Verteilung des untersuchten Stichprobenkennwertes.

itterlwert der Verteilung: Varianz des Schäzwertes:

$$b^* = \frac{1}{B} \cdot \sum_{i=1}^{B} b^*(i)$$
 $Var(b^*) = \frac{1}{B-1} \cdot \sum_{i=1}^{B} (b^*(i) - b^*)^2$

Varianten:

Μ

- \rightarrow Paarweise Bootstrap (wie oben)
- → Parametrischer Bootstrap-Verteilungsannahme für die Fehler
- \rightarrow Bootstrap der Residuen Algorithmus:
 - Regression von Y auf x (NLW) \rightarrow gefittete Werte \hat{Y} und skalierte Residuen $\hat{e} = \sqrt{n/df} \cdot (Y \hat{Y}) \rightarrow (n \times 1)$ Vektor \hat{F}_e empirische Verteilung der Fehler
 - Erzeugung von $Y^* = \hat{Y}_i + \hat{e}_i^*$, i = 1,...,nwobei \hat{e}_i^* zufällig mit Zurücklegen von \hat{F}_e gezogen wird
 - Regression von Y^* auf x liefert Bootstrap-Schätzungen b_0^* und b_1^*
 - Berechnung der Pivot-Statistik (hängt nicht vom wahren Wert *b* ab): *... $b^*(i) - b$

$$t^{*}(i) = \frac{b(i) - b}{s.e.(b^{*}(i))}$$

s.e. $(b^*(i))$ und $b^*(i)$ werden von der *i*-ten Bootstrap-Regression berechnet, *b* - von der orignalen Stichprobe

- Die Prozedur wird *B* Mal wiederholt
- Perzentile-t (1-α) Konfidenzintervall:

$$[b-s.e.(b).t^*_{1-\alpha/2}, b-s.e.(b).t^*_{\alpha/2}],$$

wobei $t^*_{1 \cdot a/2}$ und t^*_a obere und untere Perzentile der Verteilng von $t^*(i)$ sind

Abbildung 32: Kurzüberblick Monte Carlo Simulation und Bootstrapping in Regressionsmodellen

⁹⁶ vgl. MCCULLOUGH, B.D. et al. (1998); CAMERON, A.C. et al. (2005) S357-383

Bsp.: Bedingte (ex post) vs. unbedingte (ex ante) Prognose auf Basis von Verkehrsdaten mittels Bootstrapping und Monte Carlo Simulation am Einzelabschnitt

Für einen Abschnitt aus der LTPP-Datenbank soll der Zustand auf Basis von n=8 aufeinanderfolgenden Erfassungen und Verkehrsdaten prognostiziert werden. Unsicherheit bezüglich der künftigen Werten der kumlierten NLW soll mittels Bootstrapping und Monte Carlo Simulation in die Prognoseintervalle berücksichtigt werden. Für die Zustands- und Verkehrsprognose sind jeweils lineare Modelle zu verwenden.

Vorgehensweise:

- Regression von $\operatorname{NLW}_{\operatorname{kum}}$ über die Zeit und Berechnung der Verteilung von NLWkum auf Basis von Prognoseintervallen
- Regression von Y über x (NLW_{kum}): Schätzung der Koeffizienten erfolgt nach Bootstrap der Residuen mit B=10.000 Replikationen (vgl. Abb. 32) $\rightarrow b_0^*$ und b_1^* Fehler bei der



Prognosestandardfehler, untere, obere Grenze und Länge der Prognoseintervalle bei 95% Zuverlässigkeit:

NLW _{kum}	E(Y)	Asym	ptotisch t-V	Verteilung	(95%)	Bootst	rap bedingt	e Prognose	(95%)	Bootstra	np unbeding	gte Prognos	e (95%)
		s.e.	u. Grenze	o. Grenze	Breite	s.e.	u. Grenze	o. Grenze	Breite	s.e.	u. Grenze	o. Grenze	Breite
0	-0,0437	0,0580	-0,1856	0,0983	0,2839	0,0581	-0,1723	0,0829	0,2553	0,0684	-0,2269	0,1445	0,3714
10	0,4493	0,0556	0,3133	0,5854	0,2722	0,0554	0,3324	0,5733	0,2409	0,0658	0,2745	0,6261	0,3516
20	0,9424	0,0851	0,7341	1,1506	0,4165	0,0848	0,7400	1,1512	0,4112	0,1012	0,6516	1,2223	0,5707
30	1,4354	0,1258	1,1276	1,7431	0,6155	0,1245	1,1315	1,7422	0,6107	0,1484	1,0034	1,8411	0,8377
40	1,9284	0,1698	1,5130	2,3438	0,8307	0,1692	1,5182	2,3435	0,8253	0,2023	1,3390	2,5050	1,1660
50	2,4214	0,2150	1,8952	2,9475	1,0523	0,2145	1,8970	3,9545	1,0575	0,2545	1,6776	3,1204	1,4428
60	2,9144	0,2609	2,2760	3,5529	1,2769	0,2596	2,2760	3,5579	1,2819	0,3098	2,0126	3,7727	1,7601
70	3,4074	0,3072	2,6558	4,1590	1,5032	0,3057	2,6506	4,1731	1,5225	0,3663	2,3424	4,4106	2,0682
80	3,9004	0,3536	3,0352	4,7657	1,7305	0,3519	3,0306	4,7752	1,7446	0,4195	2,6880	5,0917	2,4037
90	4,3934	0,4002	3,4142	5,3727	1,9585	0,3983	3,4135	5,3870	1,9735	0,4735	2,9701	5,7006	2,7305
100	4,8865	0,4469	3,7930	5,9799	2,1869	0,4451	3,7830	5,9956	2,2126	0,5335	3,3501	6,4177	3,0676

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

Ist für die Prognose der abhängigen Variable vorerst die Prognose der unabhängigen Variablen erforderlich, lassen sich Konfidenz- und Prognoseintervalle nicht mehr nach der traditionellen Methodik berechnen. Ein möglicher Ausweg stellt das Bootstrapping dar

Im Vergleich zu der analytischen Berechnung (ex post) liefert der Boostrap annährend gleiche Ergebnisse, obwohl bei dem Bootstrap keine Annahme über die Verteilung der Störterme getroffen wurde

Übliche ex post Prognoseintervalle berücksichtigen nicht die Unsicherheit bei der Erfassung und Prognose der unabhängigen Variable und unterschätzen somit die Streuung der abhängigen Variable, auch wenn der Regressor ziemlich zuverlässig prognostiziert werden kann (R²=0,9831). Die sich ergebenden ex ante Prognoseintervalle sind nicht symmetrisch, die Störterme sind nicht normal- bzw. t-verteilt.

Abbildung 33: Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Prognose der unabhängigen Variable in das Prognoseintervall der abhängigen Variable mittels Bootstrapping und Monte Carlo Simulation am Einzelabschnitt

 Tabelle 15: Kurzzusammenfassung der einfachen linearen Regression⁹⁷

Beschreibung Darstellung & Formeln Darstellung & Formeln Bivariate lineare Regression Variable Y Variable Die Regressionsanalyse ist ein Verfahren Prognosestreifen Prognosestreifen zur Analyse der Zusammenhänge von Merkmalen. Bei zwei untersuchten Merkmalen spricht man von bivariater, sonst 0 von multipler Regression. Im Unterschied zu funktionalen deterministischen Zusammenhängen wird ein stochastischer Zusammenhang durch eine Regressionsgleichung abgebildet. Die Güte des Zusam-Konfidenzstreifen Konfidenzstreifen menhangs bzw. die mögliche Präzision daraus abgeleiteter Vorhersagen wird ≯ durch den Regressionskoeffizient bzw. das Variable x Variable x Bestimmtheitsmaß angegeben. Mit der Regression ohne Interzept (RTO-Regression Through Regression mit Interzept (OLS): Methode der kleinsten Quadrate (ordinary least squares OLS) werden die Parameter the Origin): Zusammenhang in der Grundgesamtheit: der Regressionsgleichung so bestimmt, Zusammenhang in der Grundgesamtheit: $Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \mathbf{x}_i + \varepsilon_i$ dass die Summe der unerklärten Abweichungsquadrate ein Minimum wird. Bei $Y_i = \beta_1 \cdot \mathbf{x}_i + \varepsilon_i$ Minimierungsproblem: bivariater Korrelation können folgende Schätzung des Wertes und des Standardfehlers bzw. der $SSE = \min \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \min \sum_{i=1}^{n} (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2$ Fälle vorliegen, wobei die Regressions-Varianz des Regressionskoeffizienten; Konfidenzintervall: rechnung darüber keine Auskunft gibt: Varianzzerlegung: $b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \qquad s_{b_1}^2 = \frac{s^2}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$ • x beeinflusst Y kausal $b_1 \pm t_{1-\alpha/2,n-1}.s_{b_1}$ $\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \overline{Y})^2 =$ · Y beeinflusst x kausal • x,Y von Variablen Z beeinflusst Schätzer für die Varianz der Grundgesamtheit σ^2 bzw. $\sum_{i=1}^{n} (b_0 + b_1 x_i - \overline{Y})^2 + \sum_{i=1}^{n} (Y_i - b_0 - b_1 x_i)^2$ Standardfehler der Regression: • x,Y wechselseitig kausal abhängig Schätzer für die Koeffizienten $s^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - b_{1} \cdot x_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - b_{1} \cdot x_{i})^{2}}$ Kausalzusammenhänge sind kaum empi $b_{1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x}) \cdot (Y_{i} - \overline{Y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2}} = \frac{Cov(Y, x)}{Var(x)} = \frac{S_{xY}}{S_{xx}}$ risch, sondern in erster Linie logisch n-1begründbar und bilden auch die Begründung für das jeweils den Daten hinterlegte $R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - b_{i}.x_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} Y_{i}^{2}}; \qquad R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - b_{i}.x_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - \overline{Y})^{2}}$ Modell. $b_0 = \overline{Y} - b_1$ **Beispiele:** Bestimmtheitsmaß: $R^{2} = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} e_{i}^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - \overline{Y})^{2}}$ Bestimmung beliebiger Zusammenhänge Konfidenzintervall (KI für den Erwartungswert) an der zwischen zwei Merkmalen Stelle x₀: $b_1 x_0 \pm t_{1-\alpha/2,n-1} \cdot s \cdot \sqrt{\frac{x_0^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}}$ Legende: Korrigiertes Bestimmtheitsmaß: $x_i, Y_i...$ Realisierte Zufallsvariablen $R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2).(n - 1)}{n - k - 1}$ df = n - k - 1Realisierte Einzelwerte von X_i , Y_i $x_i, y_i...$ Prognoseintervall (KI für Einzelwerte) an der Stelle x0: Schätzer für die Varianz der Grundgesamtheit σ^2 Störgröße, Abweichung *e*_{*i*}.... $b_1 x_0 \pm t_{1-\alpha/2,n-1} \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{(x_0)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}}$ Regressionsfaktor bzw. Standardfehler der Regression s: β₀... (konstanter Term) $s^{2} = \frac{SSE}{n-2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_{i}^{2}}{n-2}$ $\beta_1...$ Regressionsfaktor (Steigung) Standardabweichung der Ausgewählte linearisierbare Formen: σ... Schätzung für die Varianz der Koeffizienten: Zufallsvariablen $s_{b_0}^2 = \frac{s^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x})^2} \qquad s_{b_1}^2 = \frac{s^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \overline{x})^2}$ Lineare Transformation & Rücktransformation Standardfehler für ba *s*_{b0}... $y = \beta_0 + \frac{\beta_1}{x} \qquad x_i = \frac{1}{u} \to y_{(u)}^* = \beta_0 + \beta_1 u$ $\to \beta_0; \beta_1 \qquad \to u = \frac{1}{x} \qquad \to y = \beta_0 + \frac{\beta_1}{x}$ Standardfehler für bi Sb1 ... $\overline{x}, \overline{Y}$ Mittelwert Zufallsvariable x_i : Y_i Konfidenzintervalle für die Koeffizienten: Varianz der Zufallsvariablen xi S.... $b_1 \pm t_{1-\alpha/2,n-2}.s_{b_1}$ $b_0 \pm t_{1-\alpha/2,n-2}.s_{b_0}$ $y = \beta_0 \beta_1^x \longrightarrow \ln y = \beta_0^* + \beta_1^* x$ Varianz der Zufallsvariablen Y_i S_{yy}... Konfidenzintervall (Konfidenzintervall für den Kovarianz Zufallsvariablen x_i; S_{xy} ... $\rightarrow \beta_0^{*}; \beta_1^{*} \rightarrow \beta_0 = e^{\beta_0^{*}} \quad \rightarrow \beta_1 = e^{\beta_1^{*}} \quad \rightarrow y = \beta_0 \beta_1^{*}$ Erwartungswert) an der Stelle x₀: $b_0 + b_1 \cdot x_0 \pm t_{1-\alpha/2, n-2} \cdot s \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \overline{x})^2}{S_{xx}}}$ $y = \beta_0 x^{\beta_1} \quad x = e^u; y = e^w \rightarrow w_{(u)} = \beta_0^* + \beta_1^* u \quad \rightarrow \beta_0^*; \beta_1$ *n*... Anzahl der Beobachtungen Anzahl der Regressoren $\beta_0^* = \ln \beta_0 \quad w = \ln y \quad u = \ln x \quad \longrightarrow y = e^{\beta_0^*} * x^{\beta_1}$ *k*... Prognoseintervall (Konfidenzintervall für df... Freiheitsgrade $y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$ $y = e^w \rightarrow w_{(x)} = \beta_0^* + \beta_1 x \rightarrow \beta_0^*, \beta_1$ Einzelwerte) an der Stelle x₀: $R^{2}...$ Bestimmtheitsmaß $\rightarrow y = e^{\beta_0} * e^{\beta_1 x}$ $\beta_0^* = \ln \beta_0 \quad w = \ln y$ $b_0 + b_1 \cdot x_0 \pm t_{1-\alpha/2, n-2} \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \overline{x})^2}{S_{xx}}}$ $adjR^2...$ Korrigiertes Bestimmtheitsmaß SST Gesamtsumme der quadrierten Abweichungen Einfache Hypothesentests: SSR Gesamtsumme der erklärten F-Test Bestimmtheitsmaß R2 $F_n = \frac{(n-2).SSR}{1.SSE} > F_{1;n-2;\alpha}$ (H0 verwerfen für F_n>F_1; mit p aver Varteilung E Abweichungen $y = \frac{\beta_0}{(\beta_1 + x)} \quad \beta_0^* = \frac{\beta_1}{\beta_0} \quad \beta_1^* = \frac{1}{\beta_1} \quad \rightarrow \left(\frac{1}{y}\right) = \beta_0^* + \beta_1^* x$ $\rightarrow \beta_0^*, \beta_1^* \quad \beta_0 = \frac{\beta_1}{\beta_0^*} \quad \beta_1 = \frac{1}{\beta_1^*} \quad \rightarrow y = \frac{\beta_0}{(\beta_1 + x)}$ SSE Gesamtsumme der nicht mit p aus F-Verteilung F_n , 1; n-2) erklärten Abweichungen **t-Test** Signifikanz β_1 H0: β_1 =0; H1: $\beta_1 \neq 0$ (H0 verwerfen für $t_0 > t_{n-2;1}$. $t_{i} = \frac{b_{i} - \beta_{i}}{s_{b_{i}}} > t_{n-2;1-\alpha/2}$ b,sErwartungstreue Schätzer t, F Prüfgrößen für t-test und F-test mit p aus t-Verteilung to, n-2) 97 Eigene Darstellung auf Basis von BORTZ, J. et al. (2010) S183-202; HARTUNG, J. et al. (2009) S569-595; MONTGOM-

²⁷ Eigene Darstellung auf Basis von BORTZ, J. et al. (2010) S183-202; HARTUNG, J. et al. (2009) S569-595; MONTGOM ERY, D.C. et al. (2014) S427-467; STOCKER, H. (2014); WOOLDRIGE, J.M. (2013) S57-58; HOFFMANN, M. (2014)

Tabelle 16: Kurzzusammenfassung Methoden: Kleinste Quadrate (OLS) und Maximum-Likelihood (MLE)⁹⁸

Beschreibung	Formeln	Darstellung & Beispiele
Kleinste Ouadrate / Ordinary	Stichprobenregression:	Methode der Kleinsten Quadrate (schematische Darstellung):
Least Squares (OLS):	$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i + e_i \rightarrow e_i = Y_i - b_0 - b_1 \cdot x_i$	
Die OLS-Methode schätzt die unbekannten	Minimierung der Quadratsumme der Residuen:	
Parameter einer Funktion, durch die	$\min \sum_{i=1}^{n} e_{i}^{2} = \min \sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - b_{0} - b_{1} \cdot x_{i})^{2} = SSE$	$\begin{array}{c} \mathbf{P} \\ $
Abweichungen (Residuen) zwischen IST –	$b_0, b_1 \xrightarrow{i=1} i b_0, b_1 \xrightarrow{i=1} i c_1 = 0$	
Ergebnissen und Modellergebnissen.	Bedingungen erster Ordnung für ein Minimum:	
werden im Einzelfall höhere Abweichungen	$\frac{\partial \sum_{i} e_{i}^{2}}{\partial e_{i}} = -2.\sum_{i} (Y_{i} - b_{0} - b_{1} \cdot x_{i}) = -2.\sum_{i} e_{i} = 0$	Y_1
gen stärker gewichtet und zudem ein möglicher Ausgleich von negativen und	$\partial p_0 \qquad i \qquad i$	e_1^2 e_2
positiven Abweichungen vermieden. Dies	$\frac{\partial \sum_{i} e_{i}}{\partial b} = -2 \cdot \sum (Y_{i} - b_{0} - b_{1} \cdot x_{i}) \cdot x_{i} = -2 \cdot \sum x_{i} \cdot e_{i} = 0$	
macht die Anpassung jedoch anfällig für den Einfluss einzelner Ausreißer. Unter	Normalgleichungen:	Variable x
den Gauss-Markov Annahmen sind OLS-	$\sum Y_i = n.b_0 + b_1.\sum x_i;$ $\sum Y_i.x_i = b_0.\sum x_i + b_1.\sum x_i^2$	OLS-Schatzer für einfaches Regressionsmodells:
Estimator).	OLS-Schätzer für das bivariate Regressionsmodell:	$Y = \beta_0 + \beta_1 x$
Beispiele:	$\frac{1}{2}$, $\sum (x, -\overline{x}) (\overline{Y}, -\overline{Y})$	H 100
Lineare Regressionsanalyse	$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1$	
Legende:	$\frac{1}{n}\sum_{i}(x_{i}-x)^{2}$	S 0,60
x Regressor, erklärende Variable	$b_0 = \overline{Y} - b_1 . \overline{x}$	end 0,40
Y Regressand, erklärte Variable	Schätzung für die Varianz des OLS-Schätzer für b_1 :	5 0,20
n Anzahl der Beobachtungen	$s_{b_1}^2 = \frac{s^2}{\sum (x - \overline{x})^2}$	
<i>b</i> ₀ , <i>b</i> ₁ Schatzung der Regressionskoeffizienten	$\sum_{i} (x_i - x)$	0,00 -0,05 -0,10 -0 12 0,000 JSC
s^2 Schätzer für die Varianz der	Schatzung für die Varianz des OLS-Schatzer für b_0 : $\sum r^2$	Interzept R
r Grundgesamtheit σ^2	$s_{b_0}^2 = s^2 \cdot \frac{\sum x_i}{n \sum (x_i - \overline{x})^2}$	
\overline{x} Mittelwert	Kovarianz zwischen b_0 und b_1 :	$x = \{0, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$
SSE Sum of Squared Errors	$\operatorname{Cov}(b_0, b_1) = -\overline{x}.\operatorname{Var}(b_1)$	$Y = \{0\%, 3\%, 8\%, 15\%, 24\%, 26\%, 32\%, 57\%, 62\%, 71\%\}$ OLS: $b_0 = -0.119$; $b_1 = 0.060$; SSE = 0.075
Maximum Likalihaad Estima	Zufallsstichprobe:	ML-Schätzer für Fehlerrate von exponentiell verteilter
tion (MLE):	y ₁ , y ₂ ,, y _n	Lebensdauer (ein Parameter):
Die MI Methode schötzt die unbekannten	Gemeinsame Dichtefunktion:	3,00 -10
Parameter so, dass die Realisierung der	$f(y_1, y_2, \dots, y_n \boldsymbol{\theta}) = f(y_1 \boldsymbol{\theta}) \cdot f(y_2 \boldsymbol{\theta}) \dots f(y_n \boldsymbol{\theta})$	
Werte einer beobachteten Stichprobe am wahrscheinlichsten werden. Die Vertei-	Likelihoodfunktion:	\times 2,00 $L(\lambda)$ -20 Ξ
lung, aus die Stichprobe gezogen wird,	$f(y \mid \theta) = f(y \mid \theta) - f(y \mid \theta) - \prod_{n=1}^{n} f(y \mid \theta) - I(\theta \mid y)$	
unterschied zu OLS gibt die Likelihood-	$\int (y_1 0) \int (y_2 0) \dots \int (y_n 0) - \prod_{i=1}^{n} \int (y_i 0) - L(0 \mathbf{y})$	$rac{1}{2}$ $rac{$
funktion keine Information über die Güte	Log-Likelihoodrunktion:	
Berechnung wird oft der Log-Likelihood	$\ln L(\theta \mid \mathbf{y}) = \ln f(y_1 \mid \theta) + \ln f(y_2 \mid \theta) + \dots + \ln f(y_n \mid \theta)$	
der Strichprobe maximiert. Im Fall der bivariaten linearen Regression führen MLE	$\ln L(\theta \mid \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n} \ln f(\mathbf{y}_i \mid \theta)$	
und OLS zum selben Ergebnis. Generell ist	Bedingungen erster und zweiter Ordnung für ein	Fehlerrate λ
MLE ein sehr effizienter Schätzer bei großen Stichproben. Bei kleinen Stichpro-	Maximum:	Stichprobe $x_a = \{19, 11, 12, 6, 12, 9, 15, 17, 21, 12\}$ MLF: $\lambda = 0.075$: $L = 2.43^{-16}$: ln $L = -35.95$
ben sind andere Schätzer gemäß zentralem	$\frac{\partial L}{\partial a} = 0; \qquad \frac{\partial^2 L}{\partial a^2} < 0$	
daher bessere Ergebnisse.	Varianz der ML-Schätzer:	ML-Schätzer für Form und Skalierung von log-logistik- verteilter Lebensdauer (zwei Parameter):
Beispiele:		()
Schätzung nichtlinearer Zusammenhänge	$\operatorname{Var}(\theta) = \frac{1}{-E[\ln L(\theta \mid \mathbf{y})'']}$	
Legende:	MI-Schätzer für das bivariate Regressionsmodell.	-28
L Likelihoodfunktion		P -30
In L Log-Likelihood Funktion	$L(\boldsymbol{\beta}_0,\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\sigma}_{\varepsilon}^2;\boldsymbol{Y},\boldsymbol{x}) = \frac{1}{(2-2)^{N/2}} e^{\frac{1}{2(\sigma_{\varepsilon}^2)\sum_{i=1}^{N/2} (Y_i - \boldsymbol{\beta}_0 - \boldsymbol{\beta}_1, x_i)^2}$	-32 -34
J Dichtefunktion, pdf (im diskretem Fall –	$(2.\pi.\sigma_{\epsilon})^{m-1}$	9× -36
Wahrscheinlichkeitsfunktion)	ML-Schätzer für das multivariate Regressionsmodell:	
<i>θ</i> unbekannter Parameter	$L(\boldsymbol{\beta}, \sigma_{\varepsilon}^{2}; \boldsymbol{Y}, \boldsymbol{X}) = \frac{1}{(2 - \sigma^{2})^{n/2}} e^{-[(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}, \boldsymbol{\beta})'.(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}, \boldsymbol{\beta})/2, \sigma_{\varepsilon}^{2}]}$	30
n Anzahl Beobachtungen	$(2.\pi.\sigma_{\varepsilon})^{m^{2}}$	25 20 15 10 % LOR
∂ Partielle Ableitung	$\ln(L) = -\frac{n}{2} . \ln(2.\pi) - \frac{n}{2} . \ln(\sigma_E^2)$	Skalierung α
$\hat{\theta}$ ML-Schätzer für θ	$-\frac{1}{(\mathbf{Y}-\mathbf{X},\boldsymbol{\beta})'(\mathbf{Y}-\mathbf{X},\boldsymbol{\beta})}$	
<i>E</i> Erwartungswert	$2\sigma_E^2$	Stichprobe $x_a = \{19, 11, 12, 6, 12, 9, 15, 17, 21, 12\}$ MLE: $\beta = 4,986$; $\alpha = 12,866$; ln $L = -29,21$

⁹⁸ Eigene Darstellung auf Basis von STOCKER, H. (2014); GREENE, W.H. (2012) S26-107

3.3.3 Prognose mittels multipler Regression

Bei der bivariaten Regression wird angenommen, dass der Prozess der Schadensentwicklung von einer erklärenden Variable (Alter oder Verkehr) abhängig ist. Das Modell besteht dann aus einer erklärenden x und einer erklärten Variablen Y sowie einem Störterm, der den unerklärten Anteil der Varianz von Y beinhaltet. Weiters wird für die bivariate Regression vorausgesetzt, dass die unabhängige x-Variable mit dem Störterm nicht korreliert ist. Ist diese Annahme verletzt, dann ist mit einer systematischen Verzerrung der berechneten Koeffizienten zu rechnen. Nehmen wir an, dass das Schadensausmaß nicht nur von der Verkehrsbelastung (Normlastwechsel) sondern auch von der Dimensionierung (strukturelle Kennzahl) abhängig ist. Bei der einfachen Regression nur über Normlastwechsel, bleibt die strukturelle Kennzahl in dem Störterm. Damit die Regressionskoeffizienten noch erwartungstreu geschätzt werden können, sollen die Normlastwechsel und die strukturelle Kennzahl nicht miteinander korreliert sein. Das letzte scheint nicht realistisch zu sein, nachdem die Dimensionierung des Straßenoberbaus über die prognostizierte Verkehrsbelastung erfolgt. Diese Überlegung bezieht sich nicht nur auf die Strukturdaten, sondern auf alle relevanten Einflüsse, die nicht berücksichtigt werden und mit zumindest einer in das Modell einbezogene Variable korrelieren. Bei empirischen Daten ist ein gewisser Grad an Korrelation in der Regel immer vorhanden. Nachdem es praktisch nur selten möglich ist, alle relevanten Einflussfaktoren einzubeziehen, ist ein Spezifikationsbias in diesen Fällen nicht vermeidbar. Wird nur eine Prognose angestrebt und nicht Kenntnis über die Zusammenhänge, sind die Regressionskoeffizienten weniger wichtig. Durch Erweiterung des einfachen Regressionsansatzes und Einbeziehung von mehreren Variablen wird der erklärte Anteil der Streuung erhöht und der nicht erklärte Anteil reduziert, wodurch sich auch das Bestimmtheitsmaß R^2 entsprechend erhöht. Vielfach wird davon ausgegangen, dass dadurch auch die Zuverlässigkeit der Prognose erhöht wird. Tatsächlich sind die Erfassung und Prognose von zusätzlichen Variablen mit Unsicherheit verbunden, die rechne-

risch nur schwer erfassbar ist 99 (vgl. Kap. 3.3.2).

Auf Netzebene ist die Einbeziehung von mehreren erklärenden Variablen deshalb vorteilhaft, da die große Streuung nie ausreichend gut durch einen Faktor abgebildet werden kann. Sind am Einzelabschnitt die vorhanden Erfassungen ausreichend, um den Verlauf der Zustandsfunktion auf Basis von einer erklärenden Variable zuverlässig zu schätzen, dann ist die bivariate Regression vorteilhaft, sofern der Erklärungsgrad hoch ist und der Zusammenhang zwischen Regressor und nichtberücksichtigten Faktoren relativ konstant bleibt. Ist am Einzelabschnitt mit geringer Anzahl von Erfassungen zu rechnen, kann dieser Informationsmangel durch Information in anderen Einflussfaktoren kompensiert werden. So sind für gegebene Verkehrsbelastung auf schwächer dimensionierte Abschnitte höhere Verschlechterungsraten zu erwarten.

Abbildung 34 zeigt einige Darstellungsmöglichkeiten von Zusammenhängen zwischen Variablen. Eine Beziehung zwischen 3 Variablen ist mittels einer Fläche im 3D-Raum abbildbar. 4-D Hyperflächen¹⁰⁰ lassen sich darstellen, indem sie mit Ebenen geschnitten und auf die Schnittflächen die Isolinien gezeichnet werden. Die unabhängigen Variablen werden auf die 3 Koordinatenachsen aufgetragen, die abhängige - durch diskrete Werte im Raum vertreten.



Abbildung 34: Zusammenhänge zwischen 2,3 und 4 Variablen am Beispiel von linearer Funktion und diskreten Zustandsklassen

⁹⁹ vgl. GREENE, W.H. (2012) S80,87

¹⁰⁰ vgl. HARBAUGH, J.W. (1964)

Seite 83

Sollen mehrere erklärende Variablen in einem multiplen Regressionsmodell einbezogen werden, dann ergeben sich die Fragen, welche Faktoren einen Einfluss auf die Entstehung und Entwicklung eines Schadenstyps haben und durch welche Kennzahlen diese in einem Prognosemodell berücksichtigt werden können. Nicht alle Einflussfaktoren sind aber bekannt und von den bekannten können nicht alle (oder mit erheblichen Kosten und Aufwand) systematisch erfasst werden. Im Folgenden werden auf Basis der Literatur¹⁰¹ je nach Schadenstyp wesentliche Mechanismen und Wirkungsfaktoren kurz zusammengefasst:

- **Spurrinnen:** Spurrinnen werden hauptsächlich durch Verkehrslast und hohen Temperaturen bei flexiblen bituminösen Befestigungen verursacht. Die klimatischen Einflüsse (Temperatur, Niederschlag) werden bei Vorliegen von saisonalen Schwankungen ein wesentlicher Faktor. Wird nach langen Kälteperioden Frost in der Struktur angesammelt und folgt danach plötzlicher Anstieg in die Temperatur, führt das zu Wasseranreicherung und Verminderung der Tragfähigkeit. Deshalb werden im Frühjahr oft hohe Zuwächse der Spurrinnentiefe gemessen. Neben der Untergrundtragfähigkeit, Schichtaufbau und Einbauqualität (z.B. Einbau beim kalten Wetter und ungenügende Verdichtung) haben auch die Materialparameter einen wesentlichen Einfluss. Folgende Mischguteigenschaften erhöhen die Anfälligkeit gegen Bildung von Spurrinnen: hoher Bindemittelgehalt, hoher Fülleranteil, unzulässiger Anteil gerundete Körner, hoher Feuchtigkeitsgehalt der Gesteinskörnung.
- **Griffigkeit:** Die Griffigkeit wird durch die Mikro- und Makrotextur der Fahrbahn charakterisiert. Die Mikrotextur wird durch die Eigenschaften der Mineralkörner bestimmt und wird durch die polierende Wirkung des Verkehrs reduziert. Die Makrotextur ist eine Funktion der Oberflächenbeschaffenheit (Korngröße, Kornform, Bautyp, Technologie). Nach langen Trockenperioden wird die Makrotextur durch Abrieb, Staub und Öl verschlossen. Starke Niederschläge hingegen hinterlassen eine saubere Oberfläche und führen zu Erhöhung der Reibungsbeiwerte. Die zeitliche Entwicklung der Griffigkeit ist auch stark von dem Auftreten anderer Schadenstypen (Spurrinnen, Bluten, etc.) abhängig, was die Modellierung zusätzlich erschwert.
- Risse: Die Risse können generell in Ermüdungsrisse und Temperaturrisse unterteilt werden. Die Ermüdungsrisse treten hauptsächlich im Mitteltemperaturbereich (von -10 bis +30 °C) auf und werden durch widerholte Belastungszyklen verursacht. Die kritischen Spannungen (Zug) sind am unteren Rand der Tragschicht und die Risse entwickeln sich von unten nach oben (down-top). Bei ausreichenden Schichtdicken und Materialfestigkeit werden die Ermüdungsprozesse verzögert. Mit zunehmendem Bindemittelgehalt kommt es zu Erhöhung der Ermüdungsbeständigkeit. Tieftemperaturrisse erscheinen bei extremen Abkühlraten als Querrisse in regelmäßigen Abständen an der Deckschichtoberfläche. Längsrisse entstehen bei Kombination von tiefen Temperaturen und Verkehrsbelastung und entwickeln sich von oben nach unten (top-down). Infolge von Alterungsprozessen (Oxidation mit dem Luftsauerstoff) verändern sich die viskoelastischen Eigenschaften des Bitumens es wird härter. Deshalb sind ältere Abschnitte anfälliger gegen Rissbildung. Weitere Einflussfaktoren sind Feuchtigkeit, Bindemittelart, Fühlergehalt und Kornform.
- **Oberflächenschäden:** Die Oberflächenschäden betreffen hauptsächlich die Deckschicht und werden durch Einbaufehler (unzureichende Verdichtung, Entmischung), falsche Mischgutrezeptur (höher Bindemittelgehalt, unzureichender Haftvermögen des Bindemittels an dem Gestein) und Versprödung des Bindemittels verursacht. Die Verkehrsbelastung wird hier hauptsächlich durch seine mechanische Einwirkung (Abrieb) vertreten. Die restlichen Schäden sind relativ früh in der Lebensdauer zu erwarten, da sie hauptsächlich durch vordefinierte Mängel verursacht werden.
- Längsebenheit: Die Bedeutung der Längsebenheit bezieht sich nicht nur auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit. Bei großen Unebenheiten erhöht sich die dynamische Einwirkung des Verkehrs mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Lebensdauer. Höhere Werte der Längsebenheit sind meistens auf Einbaufehler (Neubau und Erhaltungsmaßnahmen), Setzungen und Frostwirkung zurückzuführen.

¹⁰¹ vgl. MADANAT, S. et al. (2001) S9, 29-31; OH, S. et al. (2010); BLAB, R. (2012); MOLZER et al. (2000) S34-69; HOFF-MANN, M. (2014)

Die für die Prognose verwendeten multiplen Regressionsmodelle unterscheiden sich erheblich in die Anzahl und Art der berücksichtigten Faktoren. Die Einflussgrößen lassen sich grob in vier Hauptkategorien zusammenfassen: verkehrsbedingte Einflüsse, umweltbezogene Einflüsse, strukturelle Eigenschaften, Anfangszustand. Um diese Einflüsse quantitativ im PMS zu erfassen, sind nach Land und Entscheidungsebene verschiedene Kenngrößen vorhanden. Im deutschsprachigen Raum stehen folgende Variablen teilweise oder vollständig zur Verfügung bzw. können abgeleitet werden:

- Verkehrsbedingte Einflüsse: Jährlich durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke JDTV [Kfz/24h]; Jährlich durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke JDTLV [Lkw/24h]; Kumulierte Normlastwechsel NLW_{kum} [-]; Verkehrsbelastungskoeffizient VBI [-] (berücksichtigt auch Dimensionierung)
- Umweltbezogene Einflüsse: Minimal- und Maximaltemperatur [°C]; Frostindex [°C*d]; Jahresniederschlagssumme [mm]; Feuchtigkeitsindex k-Index [-]; Anzahl an Tagen mit Frost-Tau-Wechsel jährlich [d]
- Strukturelle Eigenschaften und Bestandsdaten: Schichtdicken D_i [mm]; Verformungsmodulen der Schichten E_v [MPa]; Modifizierte Strukturelle Kennzahl SNC [-]; Längsneigung [%]; Drainage funktionsfähig/ nicht funktionsfähig; Untergrundindikator UI [μm]; California Bearing Ratio CBR [%]
- Anfangszustand: Rücksetzwerte und Messungen aus Abnahmeprüfungen

Auf die Berechnungsformeln und Bedeutung der einzelnen Kenngrößen wird hier nicht eingegangen. Ihre Erfassung ist meistens mit statistischer Verarbeitung und große Unsicherheit verbunden. Zum Beispiel werden Verkehrsdaten durch automatische kontinuierliche und händische periodische Zählungen erhoben. Die händischen Zählungen dauern nur einige Stunden und sind somit nur eine Stichprobe. Automatische Zählstellen werden in der Regel nur an eine begrenzte Anzahl von Straßenabschnitten angeordnet. Die Normlastwechsel können entweder aus JDTLV berechnet oder mit Achslastwiegesystemen (Weight-in-Motion WIM) erhoben.

Die Ausprägungen einiger Einflussfaktoren verändern sich nicht bedeutend mit der Zeit (z.B. Schichtdicken) oder sind durchschnittliche Werte für den betrachteten Zeitraum und Abschnitt (z.B. Ø jährliche Temperatur). Andere Kenngrößen weisen diskrete jährliche oder tägliche Werte auf (z.B. JDTLV, Frostindex) oder werden über die Nutzungsdauer kumuliert (z.B. Normlastwechsel, kumulierte Anzahl an Frost-Tau-Wechsel). Im Rahmen des Erhaltungsmanagements soll eine Prognose nur Inkremente (bzw. Dekremente bei der Griffigkeit) in dem Schadensausmaß ergeben. Deshalb ist die Ableitung von monoton steigenden (fallenden) Zustandsfunktionen zweckmäßig. Folglich sind Kenngrößen, die diskrete (momentane) Werte darstellen, nicht für eine zeitbezogene Prognose geeignet (vgl. Abbildung 35). Die Schädigung zu einem Zeitpunkt ist nicht Funktion von JDTLV, sondern ein Ergebnis von der kumulativen Wirkung von Belastungszyklen. Durchschnittliche Kenngrößen haben nur eine relative Bedeutung, z.B. in Regionen mit durchschnittlich höherer Temperatur erfolgt die

Bsp.: Zustandsprognose am Einzelabschnitt auf Basis von JDTLV und FI

Für drei zufällig aus LTTP-Datenbank ausegwählte Abschnitte sind die Kenngrößen jährliche durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke (JDTLV) und Frostindex (FI) anhand von Langzeitbeobachtungen bekannt. Um einen Eindruck über ihren zeitlichen Verlauf und Streuung zu vermitteln, sollen die Werte gegen die Zeitachse aufgetragen und Boxplot-Diagramme erstellt werden.



- Prognose auf Basis von JDTLV oder FI eine Zustandsverbesserung mit der Zeit ergeben (aufgrund der zeitlichen Fluktuation dieser Faktoren)
 Eine kurz- bis mittelfristige Prognose von der zukünftigen
- Eine kurz- bis mittelfristige Prognose von der zukünftigen Werte von JDTLV und FI ist im Rahmen des Erahltungsmanagements mit großer Unsicherheit verbunden

Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf und Streuung der Werte von Frostindex und Lastverkehrsstärke (JDTLV) Spurrinnenbildung mit höheren Raten. Die Einbauqualität oder Anfangszustand kann durch das Interzept (β_0) oder als separate Variable berücksichtigt werden, wenn diese auch langfristig Auswirkungen auf den Schadensprozess hat.

Neben der Selektierung der relevanten Variablen, ist die Wahl der Modelform von entscheidender Bedeutung für die Erstellung von brauchbaren Prognosen. Dieser Schritt wird bei multipler Regression oft übersprungen und den aus Statistikprogrammen einfach nutzbaren und zu interpretierenden linearen Modellen der Vorzug gegeben. Der andere Extremfall ist die Wahl einer sehr komplizierten Modelform, die möglichst gut an die Daten passt. Tatsächlich sollte die Wahl der Funktion auf theoretische Überlegungen zu der Art des Zusammenhangs beruhen und nicht durch willkürliches "Curve Fitting" ersetzt werden. Die lineare Beschränkung in OLS bezieht sich dabei nur auf die Parameter. Wenn der Störterm entsprechend formuliert ist, lassen sich auch mehrere Funktionsformen linearisieren. Die Linearisierung erfolgt durch Variablentransformation - meistens durch Logarithmieren. Logarithmische Modelle werden aufgrund des oft höheren Bestimmtheitsmaßes vorgezogen, ohne dass die Effekte der Transformation berücksichtigt werden. Mit der Regression wird eine Normalverteilung der Residuen und damit der abhängigen Variablen unterstellt, d.h. Y ~ $\mathcal{N}(\mathbf{X}.\boldsymbol{\beta}, \sigma^2)$. Ist die tatsächliche Verteilung von Y schief, dann kann die logarithmische Transformation einen positiven Einfluss auf die Symmetrie der Verteilung haben. Ist die ursprüngliche Verteilung aber annährend normalverteilt, dann ist das Logarithmieren nicht zu empfehlen. Als abhängige Variable wird meistens das Schadensausmaß modelliert, das natürlich nur positive Werte annehmen soll. Da der Logarithmus aus einer negativen Zahl nicht definiert ist, werden nur positive Werte der abhängigen Variable erzwungen. Folglich dürfen erklärende Variablen, die auch negative Ausprägungen aufweisen können (z.B. Temperatur), nicht logarithmiert werden. Ist Y=0 ein möglicher Wert, dann kann unter gewissen Beschränkungen ln (Y+1) verwendet werden.

Ein weiterer Effekt der logarithmischen Transformation ist die Veränderung der Position der Beobachtungswerte im 3D-Streudiagramm. Durch eine Logarithmierung der Prognosevariable verändern sich die vertikalen Ordinaten der Messpunkte. Ist die abhängige Variable Y (Schadensausmaß) in Prozent, ausgerückt oder nimmt sie Werte ≤ 1 an (z.B. Griffigkeit), so bewirkt die Logarithmierung eine Spreizung der Werte, bzw. in dem anderen Fall – eine Stauchung. Eine Stauchung ist gewöhnlich mit Reduktion der Varianz der Variable und Verringerung der Anfälligkeit gegen Ausreißer verbunden. Modelle, bei denen alle Variablen logarithmisch transformiert werden, werden Log-Log Modelle genannt. Wird nur die abhängige bzw. nur die unabhängigen Variablen transformiert, heißen die Modelle Log-Lin bzw. Lin-Log. Bei Modellen mit ln Y als abhängige Variable ist die Berechnung der Y-Werte aus den prognostizierten ln (Y) nicht so einfach, wie es angeblich aussieht. Auf mögliche Lösungswege kann hier nur verwiesen werden¹⁰². In Bezug mehr auf die unabhängigen Variablen ist die Logarithmierung dadurch vorteilhaft, dass der Regressionskoeffizient einer logarithmierten Variable unabhängig von ihrer Dimension ist (z.B. NLW in Millionen oder Hunderttausende).

Verändert sich der Einfluss einer unabhängigen Variable mit den Werten einer anderen unabhängigen Variablen, lässt sich dieser Effekt durch Interaktionsmodelle berücksichtigen. Solche Interaktionen sind für die Modellierung der Zustandsveränderungen des Straßenoberbaus nicht fremd, da sich eine Verkehrsbelastung in Kombination mit Klimabeanspruchung und nicht ausreichender Dimensionierung anders auswirkt als ohne diese. Wenn die Auswirkung eines Regressors mit der Zunahme seiner Werte stärker/schwächer wird (zunehmender/abnehmender Marginaleffekt), können polynomische Funktionen verwendet werden. Die sind aber meistens nicht monoton und liefern nicht plausible Prognosewerte, auch wenn die Übereinstimmung in der Stichprobe sehr gut ist.

Wobei bei dem Vergleich von Modellalternativen das Verhalten außer der Stichprobe eine sehr wichtige Rolle spielt, ist die Anpassungsfähigkeit in der Stichprobe auch nicht so einfach zu vergleichen. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß (adj R^2) erlaubt die Gegenüberstellung von Modellen, die verschiede Anzahl von Regressoren enthalten. Weder R^2 noch adj R^2 können aber für den Vergleich von Modellen, die verschieden abhängige Variable haben, verwendet werden. So können z.B. Modelle mit ln Y nicht mit Modellen mit Y verglichen werden. Der Grund dafür ist, dass die Gesamtsumme der quadrierten Ab-

¹⁰² vgl. WOOLDRIGE, J.M. (2013) S212-215

weichungen (SST) für ln Y und Y verschieden ist. In solchen Fällen kann manchmal das Quadrat der Korrelationskoeffizient zwischen den realen und den gefitteten Werten - Corr (Y, X.b) – als Vergleichsbasis verwendet werden.

In Tabelle 17 sind einige ausgewählte Funktionsformen im 3D-Raum und durch Höhenliniendiagramme dargestellt, wobei die Möglichkeiten im multiplen Regressionsmodell unendlich sind. Alle Modelle sind auf Basis von denselben Daten gefittet. Das Höhenliniendiagramm zeigt, wie verschiedene Kombinationen der unabhängigen Variablen x_1 und x_2 gleiche Werte von Y ergeben. Obwohl die einzelnen Modelle komplett verschiedene Zusammenhänge unterstellen, ist das Bestimmtheitsmaß und somit die Anpassung in der Stichprobe sehr ähnlich. Sollen die Modelle für Prognosen außer der Stichprobe verwendet werden, sind die Abweichungen erheblich. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wahl der Modellform nicht allein durch Anpassungscharakteristiken (Goodness of fit) begründet werden darf, ohne dass die dahinter liegenden mechanistischen Zusammenhänge adäquat berücksichtigt werden.

Für die beispielhafte Anwendung des multiplen Regressionsmodells auf reale Daten, wird wieder auf LTPP-Daten zugegriffen (Abbildung 37). Der Berechnungsvorgang in Matrixschreibweise findet sich in Tabelle 18 bzw. in der dort verwiesenen Literatur. Durch die Einbeziehung des Aufbaus über SNC als erklärende Variable wird R² wesentlich erhöht (von 0,2890 auf 0,4399). Trotzdem ist das Bestimmtheitsmaß bei allen Modellen niedrig, was durch die fehlenden maßgebenden Einflussgrößen (Verkehr und Klima) und den geringen Umfang der Stichprobe (Repräsentativität) erklärbar ist. Für das Modell mit zwei Regressoren werden drei Alternativen graphisch im 3-dimensionalem Raum für die Analyse dargestellt. Die beste Anpassung wird durch das Log-Log Modell erreicht, wobei die Ergebnisse angeblich vergleichbar aussehen. Eine Darstellung der Modelle im 2D-Konturdiagramm erlaubt die Erkennung der Unterschiede. Die zwischen den Höhenlinien liegenden Intervallflächen werden eingefärbt, damit sie den fünf diskreten Noten entsprechen. Das lineare Modell sagt voraus, dass es in den ersten 20 Jahren der Lebensdauer unabhängig von der Dimensionierung zum Ausfall keines Abschnitts kommen würde. Das Log-Lin Modell hingegen prognostiziert, dass kein Abschnitt mehr als 23 Jahren überleben würde. Au-Berdem verweilen die Abschnitte nur 5 Jahren in Zuständen 3 und 4 bevor sie ausfallen. Das Log-Log Modell zeigt eine stärkere Abhängigkeit von der strukturellen Kennzahl – nach 20 Jahren sind je nach Dimensionierung noch 4 Zustände möglich. Wie die Graphik unten links zeigt, resultiert eine Erhöhung der strukturellen Kennzahl um das doppelte in einer ca. dreimal höheren Lebensdauer. Werden noch zusätzlich klimatische Einflüsse über FTW_{kum} im Modell einbezogen, führt das bei einer Konfidenz von 95% nicht zur Verbesserung des Modells (keine Signifikanz). Darüber hinaus liefert das Modell physikalisch nicht nachvollziehbare Ergebnisse - die Querrisse nehmen mit der Anzahl von Frost-Tau-Wechsel ab. Allerdings ist aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs, der Erfassungsart, fehlender Verkehrsinformationen, Materialparameter etc. und des niedrigen Bestimmtheitsmaßes die Aussagekraft limitiert.

In einem weiteren Schritt wird das multiple lineare Modell aus Teil 1 des Beispiels mit einem bivariaten linaren Modell auf Basis der selben Daten in Bezug auf Zuverlässigkeit der Prognose verglichen (Abbildung 36). Es ist nicht überraschend, dass das bivariate Modell im Durchschnitt (für SNC=15,27) sehr ähnliche Ergebnisse wie das multiple Modell liefert (z.B. ca. 1% Unterschied in Erwartungswert zum t=15). Die Konfidenz- und Prognoseintervalle sind im multiplen Fall etwas schmaler, was auf die bessere Anpassung zurückzuführen ist. Für die folgenden Betrachtungen wird angenommen, dass das multiple Modell mit Alter und SNC dem "wahren" Modell entspricht. Dann hat das bivariate Modell einen Spezifikationsfehler – die Variable SNC hat einen signifikanten Einfluss auf die Querrisse und ist nicht im Modell inkludiert. Sind Alter und SNC korreliert, dann ist die Gaus-Markov Annahme über Exogenität der erklärenden Variablen verletzt. In der Literatur¹⁰³ ist das Problem als Nichtberücksichtigung relevanter Variablen oder mit dem englischen Begriff "Omitted Variables" bekannt. Im bivariaten Modell enthält der Störterm den Einfluss der strukturellen Kennzahl. Wird die Streuung der Variablen durch Kreise schematisch dargestellt, lassen sich weiter Effekte anhand von Venn-Diagrammen veranschaulichen. Wird SNC entfernt (Abbildung links), vergrößert sich die nichterklärte Streuung und damit nimmt die Anpassungsgüte des Modells ab. Die Fläche, die dann für die

¹⁰³ vgl. STOCKER, H. (2014); WOOLDRIGE, J.M. (2013) S88-92, 513-517; STOCK, J.H. et al. (2006) S186-193

Berechnung von β_1 verwendet wird, ist größer. Daher ist die Varianz des berechneten Koeffizients niedriger. Die Schätzung ist jedoch verzerrt. Wird die ausgelassene Variable berücksichtigt, ist der Parameter unbiased ("wahres" Modell vorausgestzt). Für seine Berechnung aber kann eine kleinere Fläche verwendet werden (in Weiß) \rightarrow die Varianz ist größer. Durch die Berücksichtigung einer zusätzlichen Variable nimmt die nicht erklärte Streuung ab. Das Ausmaß der Verzerrung (bias) entspricht der Differenz in den Regressionskoeffizient für das Alter in den beiden Modellen und kann nach der gegeben Formel berechnet werden. Der Bias ist abhängig von dem Einfluss der nichtberücksichtigen Variable auf die abhängige Variable (β_2) und von der Korrelation zwischen inkludierter und ausgelassener Variable.

In der Praxis sind oft Daten für wichtige Einflüsse (z.B. Klimadaten) nicht vorhanden. Ist die Art der Beziehung bekannt (z.B. die Anzahl an Frost-Tau Wechsel hat einen verstärkenden Einfluss auf den Schadensprozess) und ist die Art der Korrelation mit der Variable "von Interesse" in der Gleichung bekannt (z.B. Alter und FTW sind positiv korreliert), so kann das Vorzeichen der Verzerrung abgeschätzt werden. Bei positivem Bias ist der Koeffizient der Variable "von Interesse" durch die Nichtberücksichtigung der relevanten Variable überschätzt bzw. unterschätzt (bei negativem Bias). Der Term Cov(Alter,SNC)/Var(Alter) entspricht dem Regressionskoeffizient bei einer Regression von SNC auf Alter. Folglich ist der OLS-Schätzer unverzerrt bei Nichtberücksichtigung relevanter Variablen nur wenn die Kovarianz Null ist. Ist der Koeffizient $\beta_2=0$, dann ist die Variable nicht relevant. Im Unterschied zur Erforschung von kausalen Zusammenhängen sind "Omitted Variables" nicht unbedingt ein Problem für die Prognose. Das Schadensausmaß wird bei vielen Modellen nur durch das Alter als erklärende Variable erklärt. Es wird behauptet, dass alle Faktoren, die auf die Schädigung einen Einfluss haben, indirekt durch das Alter abgebildet werden. Im hier betrachteten Beispiel dient das Alter als Proxy für SNC. Dieser Proxy-Effekt ist umso stärker je höher die Korrelation zwischen Alter und SNC und je niedriger die Varianz von Alter ist. Folglich, ist das Alter mit einem Faktor nicht korreliert, bleibt dieser vollständig unberücksichtigt. Die selbe Behauptung wie für das Alter kann für NLW aufgestellt werden. Ein Modell mit Proxy-Variable bricht dann zusammen, wenn die maßgebende Einflüsse verändert werden.

Bsp. (Teil 2): Deterministische Zustandsprognose mit Konfidenz- und Prognoseintervall und Bias von Nichtberücksichtigung relevanter Variablen

Für das Beispiel der multiplen Regression mit LTPP-Daten von 20 Abschnitten (vgl. Teil 1) sind für das lineare multiple Modell und ein entsprechendes lineares bivariates Modell Konfidenz- und Prognoseintervalle zum Zeitpunkt t=15 zu berechnen und bei SNC=15,27 (Mittelwert) zu vergleichen. Zusätzlich ist der Omitted-Variable Bias im bivariaten Fall zu berechnen.



- Der Unterschied zwischen den Prognosewerten zu einem Zeitpunkt im bivariaten und multiplen Fall ist gering, soweit sich die Prognose auf den Mittelwert von SNC bezieht
- Durch Auslassen der relevanten Variable SNC wird der Einfluss vom Alter im bivariaten Modell unterschätzt
- Der OLS-Schätzer ist erwartungstreu , wenn die ausgelassene Variable nicht signifikant ist (β₂=0) oder wenn sie mit den anderen Regressoren nicht korreliert ist: Cov (Alter, SNC)=0

Abbildung 36: Deterministische Zustandsprognose mit Konfidenz- und Prognoseintervallen und Auswirkungen einer Fehlspezifikation
 Tabelle 17: Ausgewählte Funktionsformen im multiplen Regressionsmodell¹⁰⁴



¹⁰⁴ Eigene Darstellung auf Basis von STOCKER, H. (2014); WOOLDRIGE, J.M. (2013) S191-217; STUDENMUND; A.H. (2005) S198-216; GREENE, W.H. (2012) S160-168; STOCK, J.H. et al. (2006) S254-297



Bsp. (Teil 1): Deterministische Zustandsprognose auf Basis von Alter und zwei Erfassungen, sowie struktureller und klimatischer Daten mittels bivariater sowie multipler Regression auf (Teil-)Netzebene



Abbildung 37: Deterministische Prognose auf Basis von Zustandserfassungen, struktureller und klimatischer Daten mittels bivariater/multipler Regression am Teil des Netzes (Teil 1)

Verändert sich die Varinaz des Störterms in Abhängigkeit von einer erklärenden Variable, kann sie nicht mehr als konstant betrachtet werden - es liegt Heteroskedastizität vor. Der OLS-Schätzer ist auch in diesem Fall erwartungstreu, nur nicht mehr effizient - die Standardfehler der Koeffizienten sind verzerrt, die t-Statistiken ungültig. Für den Umgang mit Heteroskedastizität sind verschiedene statistische Techniken entwickelt. Ähnliche Auswirkungen hat die Autokorrelation der Störterme. Wenn jeder Störterm mit dem Störterm der Vorperiode/der vorigen Beobachtung korreliert, wird von Autoregression 1.Ordnung gesprochen. Die häufigste Ursache sind Einflüsse, die nicht in der Regressionsgleichung berücksichtigt werden. In diesem Fall hat die Vergangenheit Auswirkungen auf die Zukunft, die nicht erfasst sind. Heteroskedastizität und Autokorrelation sind in der Praxis keine Ausnahme und treten auch bei bivariater Regression gleichermaßen auf. Diese Probleme werden hier nicht näher betrachtet, wobei auf die entsprechende Literatur¹⁰⁵ verwiesen wird.

Die Gaus-Markov Annahmen verlangen, dass zwischen den erklärenden Variablen kein exakter linearer Zusammenhang besteht. Ist diese Annahme verletzt, dann ist die Matrix (X'X) singulär und kann nicht invertiert werden. Dieser Fall tritt in der Praxis selten auf. Sind die unabhängigen Variablen jedoch hoch miteinander korreliert, liegt Multikollinearität vor. Am Einzelabschnitt (Abbildung 38) weisen meistens alle vom Zeitpunkt der letzten Maßnahme kumulierten Größen (NLW, FTW, Niederschlagssumme) und das Belagsalter einen starken korrelativen Zusammenhang auf. Im gegebenen Beispiel liegen die Pearson'schen Korrelationskoeffizienten zwischen 0,991 und 0,998. Diese Variablen enthalten dieselbe Information (redundant). Werden auf Netzebene alle Abschnitte gleichzeitig betrachtet, dann sind die Korrelationen deutlich geringer. Der Grund dafür ist, dass z.B. auf zwei Abschnitte mit dem gleichen Alter sehr unterschiedliche Normlastwechsel gemessen werden können. Die Korrelationen unter benachbarten Abschnitten sind immer noch hoch, da sie derselben klimatischen und Verkehrsbelastung ausgesetzt sind. Die Auswirkungen von Multikollinearität werden noch anhand des Beispiels erkennbar. Modell 1 enthält alle erklärende Variablen und besitzt somit das höchste Bestimmtheitsmaß. Trotzdem ist nur der

Bsp.: Deterministische Zustandsprognose auf Basis von Alters-, Verkehrs- und klimatischen Daten am Einzelabschnitt

OR	Alter	NI W	FTW
VII.	7 11001		1 1 1 10

QIL	7 mer	'' kum	' ' kum	
[%]	t [-]	[Mio]	[d]	Für einen Abschnitt aus der
0,00	0	0,00	0	I TPP-Datenbank liegen
6,32	2	1,74	62	Erfassungsdaten zu Ouerrissen
9,28	4	3,33	109	Information über das
13,88	6	4,75	143	Deckschichtelter sowie die
30,92	7	5,52	162	Anzahl der kumulierten
26,64	8	6,54	190	Normlastwashaal (NLW) und
27,96	9	7,78	211	die Angehl den lympulierten
46,97	10	9,10	233	Erest Tay Weeheel (ETW) yer
57.83	11	10,40	264	riost-rau-weenser (riw) vor.
70,53	12	11,70	280	

Auf Basis dieser Daten sind folgende Aufgaben zu lösen:

- Zustandsprognosemodell aus multipler linearer Regression
- Überprüfung der Multikollinearität der erklärenden Variablen
 Untersuchung der Auswirkungen von der Entfernung der
- Variablen, die durch Multikollinearität betroffen sind

Korrelationsmatrix

	QR	Alter	NLW _{kum} FTW _{kum}	TT 1
QR	1,000	0,929	0,960 0,925	Hone Kormalation
Alter	0,929	1,000	0,991 0,998	Konelation
NLW _{kum}	0,960	0,991	1,000 0,991	
FTW _{kum}	0,925	0,998	0,991 1,000	

1) Modell (Alter, NLW_{kum}, FTW_{kum}) $R^2 = 0.9606$

QR = 0,0114 - 0,0149*Alter + 0,1501*NLW - 0,0032*FTW

Variable	b _i	s.e. (s _{bj})	t _{exp}	t _{tab} , _{95%}	p-value	T _i	VIF
Konstante	0,0114	0,0530	0,2145	2,4469	0,8373	-	
Alter	-0,0149	0,0766	-0,1950	2,4469	0,8519	0,004	255,817
NLW	0,1501	0,0389	3,8630	2,4469	0,0083	0,017	60,576
FTW	-0,0032	0,0033	-0,9784	2,4469	0,3656	0,004	243,116

2) Modell (NLW_{kum}, FTW_{kum}) $R^2 = 0,9604$

QR = 0.0148 + 0.1479*NLW - 0.0038*FTW

Variable	b _i	s.e. (s_{bj})	texp	t _{tab} , _{95%}	p-value	Ti	VIF _i
Konstante	0,0148	0,0463	0,3207	2,3646	0,7578	-	-
NLW	0,1479	0,0345	4,2857	2,3646	0,0036	0,018	55,382
FTW	-0,0038	0,0015	-2,5938	2,3646	0,0357	0,018	55,382
	3) I	Modell	(NLW _k	_{um} , FT	W _{kum})	$\mathbf{R}^2 =$	0,9223

QR = -0,0700 + 0,0592*NLW

Variable	b _i	s.e. (s_{bi})	t _{exp}	t _{tab} , 95%	p-value	T	VIF
Konstante	-0,0700	0,0429	-1,6326	2,3060	0,14120	Ĩ	2
NLW	0,0592	0,0061	9,7458	2,3060	0,00001	1,000	1,000

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Der Koeffizient der Variable FTW_{kum} besitzt den niedrigsten Standardfehler. Das ist darauf zurückzuführen, dass sie die größte Streuung aufweist
- In die Modell 1 und 2 zeigt der Variance Inflation Factor eine hohe Multikollinearität für alle Variable an, die mit Entfernung der Variablen abnimmt
- Dementsprechend instabil bzw. irreführend sind die berechneten Koeffizienten $b_j \rightarrow$ so nehmen die Querrisse mit dem Alter (b= -0,0149) und mit der Anzahl an Frost-Tau-Wechsel (b= -0,0032) ab.

Abbildung 38: Deterministische Zustandsprognose bei Vorhandensein von hoher Multikollinearität am Einzelabschnitt

¹⁰⁵ vgl. STUDENMUND; A.H. (2005); GREENE, W.H. (2012); WOOLDRIGE, J.M. (2013); STOCK, J.H. et al. (2006)

Koeffizient von NLW signifikant. Das Verwerfen der Nullhypothese für den Koeffizient von FTW wird erst nach der Elimination des Alters aus der Gleichung ermöglicht (Modell 2). Weiter werden die Standardfehler der Koeffizienten mit der Entfernung von Variablen und Reduktion der Multikollinearität niedriger. Wenn auch FTW aus dem Modell entfernt wird, verändert sich der Koeffizient für NLW erheblich.

Zur graphischen Veranschaulichung der Auswirkungen hoher Korrelation zwischen den erklärenden Variablen wird ein Beispiel betrachtet (Abbildung 39). Werden die Streuungen der einzelnen Variablen als Kreise dargestellt, äußert sich die Multikollinearität in der Überschneidungsfläche von x₁ und x₂. Dieser gemeinsame Anteil hat einen Beitrag zu Reduktion der nicht erklärten Streuung und somit zu Erhöhung von R². Diese Fläche aber kann nicht den einzelnen Variablen zugeordnet werden und für die Schätzung der Koeffizienten β_1 und β_2 verwendet werden. Werden die Messwerte und die gefittete Regressionsebene im 3D-Koordinatensystem dargestellt, wird mit Zunahme der Korrelation die horizontale Streuung der Beobachtungen reduziert, die Lage der Regressionsebene instabiler. Nichtlineare Modelle weisen wesentlich flexiblere Regressionsfläche, die sich besser als lineare Modelle durch die Beobachtungspunkte abstützen lässt. Wird jetzt anstatt von individuellen t-Tests ein simultaner F-Test für beide Koeffizienten durgeführt, ergibt sich anstelle eines Konfidenzintervalls eine Konfidenzellipse (vgl. Tabelle 18). Ist der Korrelationskoeffizient zwischen den Variablen annährend gleich Null, wird die Ellipse durch einen Kreis ersetzt. Mit Zunahme der Kollinearität, wird die Ellipse schmaler. In dem Bereich außerhalb der Konfidenzellipse sind beide Koeffizienten gemeinsam signifikant. Jeder Koeffizient individuell ist außerhalb des jeweiligen Konfidenzintervalls signifikant. Mit der Zunahme der Korrelation also wird wahrscheinlicher, dass beide Koeffizienten individuell nicht signifikant von Null verscheiden sind (wenn der Nullpunkt innerhalb beider Konfidenzintervalle liegt), trotzdem darf die gemeinsame Nullhypothese (H₀: $\beta_1=0,\beta_2=0$) verworfen werden, d.h. gemeinsam sind beide Koeffizienten verschieden von Null. Die t-Statistiken deuten an, dass die zwei Variablen keinen Einfluss auf die abhängige Variable haben, während die F-Statistik das Modell als geeignet beurteilt. In dem Beispiel sind die beiden unabhängigen Variablen x_1 und x_2 negativ korreliert. Die Konfidenzellipse ist geneigt nach rechts und zwischen den Schätzwerten der Regressionskoeffizienten besteht eine positive Korrelation. Sind die unabhängigen Variablen positiv miteinander korreliert, ist die Ellipse nach links geneigt – die Schätzungen der Koeffizienten negativ korreliert.

Wie schon gezeigt, können die Koeffizienten in der Korrelationsmatrix als erste Schätzung zur Erkennung von Multikollinearität dienen. Sie messen jedoch nur Korrelationen zwischen zwei Variablen. Hochrangige Multikollinearität zwischen mehreren Variablen kann trotz niedriger Korrelationskoeffizienten vorhanden sein. Deshalb sollen auch Hilfsregressionen durchgeführt werden. Bei einer Hilfsregression wird jede unabhängige Variable auf die anderen unabhängigen Variablen regressiert. Als Kenngröße werden das Bestimmtheitsmaß dieser Regression oder von ihm abgeleitete Größen – Toleranz und Varianziflationsfaktor verwendet (vgl. Tabelle 19). Die Aussagekraft eines Grenzwertes z.B. VIF_j>10 (R_j^2 >0,9), ab der Multikollinearität ein Problem darstellt, bleibt in der Literatur¹⁰⁶ umstritten. Für eine Variable mit VIF_j=10,0 ergibt sich dieselbe Varianz des Regressionskoeffizienten wie bei VIF=1,0, wenn die Streuung der Variable 10-mal erhöht wird (vgl. Gleichung und Graphik in Tabelle 19). In dieser Hinsicht unterscheidet sich das Problem der Multikollinearität von dem Problem der kleinen Stichprobe nicht.

Wird ein Modell hauptsächlich zu Prognosen verwendet, dann sind keine besonderen Maßnahmen gegen Multikollinearität zu treffen, solange die Korrelation zwischen den unabhängigen Variablen in der Zukunft erhalten wird. Handelt es sich um ein Erklärungsmodell und um den Einfluss der einzelnen Variablen zu untersuchen, ist eine beliebte Praktik, Variablen aus dem Modell zu entfernen. Das Weglassen von relevanten Variablen kann zu falschen (kausalen) Interpretationen und nicht erwartungstreuen Schätzungen führen. Spezifikationsfehler sind auch mit erheblichen Auswirkungen, da die Schätzwerte sehr sensibel gegen Veränderung des Modells sind. Andere Alternative stellen die Vergrößerung des Stichprobenumfangs dar, die in der Regel nur nach der nächsten netzweiten Erfassung möglich ist. Das kann die Varianz von b reduzieren, da die Streuung einer Variablen mit Vergrößerung der Stichprobe nur zunehmen kann. Ist die Korrelation zwischen den Variablen auch in der Grundgesamtheit vorhanden, dann ist keine Reduktion von VIF zu erwarten.

¹⁰⁶ vgl. STOCKER, H. (2014); WOOLDRIGE, J.M. (2013) S94-98; KENNEDY, P. (2003) S205-217

Bsp.: Multiple Regression mit linearem Modell am Netz (keine Multikollinearität), am Netz - angrenzende Abschnitte (mittlere Multikollinearität) und am Einzelabschnitt (hohe Multikollinearität)

- Die Signifikanz zweier erklärender Variablen ergibt statt je einem Konfidenzintervall eine Konfidenzellipse, die mit Erhöhung der Korrelation zwischen den Variablen schmaler wird. Besteht keine Korrelation (r_{x1, x2}=0) wird aus der Ellipse ein Kreis
- Je höher die Korrelation zwischen erklärenden Variablen, umso eher liegen die gefitteten Y-Werte auf einer Linie im Raum. Die Lage der Regressionsebene wird instabil, die Drehung der Ebene um diese Linie ist empfindlich gegenüber Ausreißern/kleine Anzahl Messwerte
- Bei hoher Multikollinearität werden einzelne Koeffizienten erwartungstreu geschätzt (t-Statistiken gültig, Standardfehler wird sehr groß)
 → keine Beeinträchtigung Prognose durch Multikollinearität aber Einfluss der Variablen auf das Ergebnis nicht getrennt ermittelbar!



Abbildung 39: Multiple lineare Regression mit unterschiedlichem Ausmaß an Kollinearität, Darstellung in VENN – Diagrammen, resultierenden Regressionsebenen und Konfidenzellipsen

BeschreibungFormelnDarstellung & FormelGenerelle Beschreibung:Zusammenhang in der Grundgesamtheit:Dav sinfache Regressionsmodell lässt sich erweitern, inder mehrer unabhängig gigen Variable x_i genutzt werden. Das Modell der multiplen Regressionskaptische in interzeh aufweidungen der Dataspunkte von einer der Koeffizienten ergibt sich, wem die Gauss-Marko Annahme erfült sind, Anhah der Korrelationsmatrix lässt sich der Korefizienten ergibt sich, wem die Gauss-Marko Annahme erfült sind, Anhah der Kurenden Variable x_i utatsichlich unabhäng is nut.Steigen gen $x_i = \beta_i + x_i, \beta_i + x_2, \beta_1 + \dots + x_n, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i1}, \beta_i + x_{i2}, \beta_{i1} + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i1}, \beta_i + x_{i2}, \beta_{i1} + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i1}, \beta_i + x_{i2}, \beta_{i1} + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i1}, \beta_i + x_{i2}, \beta_{i2} + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i1}, \beta_i + x_{i2}, \beta_{i2} + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i1}, \beta_i + x_{i2}, \beta_{i2} + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ Residue e_i ψ variable Y ψ variable W ψ variable M ψ variable SMatrixschreibweiseZusammenhang in der Grundgesamtheit: $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + x_{i2}, \beta_i + \dots + x_{in}, \beta_i + \varepsilon_i$ $x_i = \beta_i + \beta_i + \beta_i$ $x_i = \beta_i + $	n $x_1 + b_2 \cdot x_2$ gefittete Werte able x_2
Generelle Beschreibung:Das einfache Regressionsmodell lässt sich erweitern, indem mehrere unabhängig variable n.jzur Beschreibung der abhän igten Variable n.jzur Beschreibung der abhän igten Variable n.jzur Beschreibung der abhän erklärenden Variable nassen sich in einem meinimiert der OLS-Schätzer die Abwei- churgen der Datenpunkte von einer erklärenden Variable nassen sich in einem minimiert der OLS-Schätzer die Abwei- churgen der Datenpunkte von einer erklärenden Variable nassen sich in einem meinimiert der OLS-Schätzer die Abwei- 	$\frac{x_1 + b_2 \cdot x_2}{\text{gefittete}}$ Werte $\frac{\text{able } x_2}{\text{ble } x_2}$
Das einfache Regressionsmodell lässt sich erweitern, indem mehrere unabhängige Variablen x_{ij} zur Beschreibung der abhän- gigen Variable Y_i genutzt werden. Das Modell der multiplen Regression lässt sich in Matriskform kompakt darstellen und berechnen. Wenn das Modell ein Interzept aufweist, besteht die erste Spalte der Designmatrix aus Einsen. Fälle mit zur durch die Regressionskoeffizienten β_{ij} und tarstellen (vgl. Darstellung rechts). Ist da Modell noch zusätzlich linear, dann minimiert der OLS-Schätzer die Abwei- chungen der Datenpunkte von einer Regressionskoeffizienten β_{ij} und zusammenhang in der Grundgesamtheit: $\begin{pmatrix} Y_i \\ P_i \\ U_i \\ U$	$\frac{x_1 + b_2 \cdot x_2}{\text{gefittete}}$ $\frac{\text{Werte}}{\text{Able } x_2}$
The function of a model with the function of	$\xrightarrow{\text{able } x_2}$
Anhand der Korrelationsmatrix lässt sich überprüfen, ob die erklärenden Variablen x_{ij} tatsächlich unabhängig sind. Beispiele: Beschreibung und Erklärung von komple- xen Zusammenhängen zwischen einer erklärten Variable und zwei oder mehr erklärten Variable als Basis für Analy- sen und Prognosen in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen. $b = (X'.X)^{-1}.X'Y$ $F = (x_1, y_2, y_3, y_4, y_4, y_5, y_4, y_5, y_4, y_4, y_4, y_4, y_4, y_4, y_4, y_4$	\mathbf{X}
Beispiele: Beschreibung und Erklärung von komple- xen Zusammenhängen zwischen einer erklärten Variable und zwei oder mehr erklärten Variable und zwei oder mehr erklärten Variable als Basis für Analy- sen und Prognosen in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen. $b = (X'.X)^{-1}.X'Y$ $e_1 = e_2 \cdots e_n$ $e_1 = e_2 \cdots e_n$ $e_1 = e_2 \cdots e_n$ $e_2 = e_1 = e_2 \cdots e_n$ $e_2 = e_1 = e_1 = e_1$ $e_2 = e_1 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1 = e_1$ $e_2 = e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_2 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_2$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ $e_1 = e_1$	ebene
Beschreibung und Erklärung von komple- xen Zusammenhängen zwischen einer erklärten Variable und zwei oder mehr erklärenden Variable als Basis für Analy- sen und Prognosen in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen. $b = (X'.X)^{-1}.X'Y$ Berechnung der Kovarianz- & Korrelationsm Empirische Kovarianz zwischen der <i>i</i> -ten und <i>j</i> -t	iable x
Anwendungsbereichen. $b = (X'.X)$.X'Y Empirische Kovarianz zwischen der <i>i</i> -ten und <i>j</i> -t	
	en Variable:
Legende: Bestimmtheitsmaß: $p_{ij}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i}^{n} (x_{pi} - \overline{x}_i) \cdot (x_{pj} - \overline{x}_j)$ (Elemente	von <i>S</i>)
$\frac{R^{2} = 1 - \frac{1}{Y' \cdot Y - n \cdot \overline{Y}^{2}}}{Y' \cdot Y - n \cdot \overline{Y}^{2}}$	
<i>n</i> Anzahl der Regression <i>n</i> Anzahl der Beobachtungen Korrigiertes Bestimmtheitsmaß: $s = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n} (x_n - \overline{x}_n)^2 = s^2$	D
$\beta_{} \text{Regressionskoeffizient} \qquad \qquad$	$\operatorname{von} D$
β, b, e, Y Vektoren $(Y'.Y - n.\overline{Y^2})(n-k)$ Empirischer Korrelationskoeffizient:	
b Schätzwert des Regressionskoef- fizients $r_{ij} = \frac{s_{ij}}{s_i \cdot s_j}$ $-1 \le r_{ij} \le 1$ $\epsilon_{}$ Störterm, Fehler, Error (Matrixschreibweise): Datenmatrix & Zensierte Datenmatrix:	
e Residue 1. Linearität und richtige Modellspezifikation $(x_1, \dots, x_n) = (x_1 - \overline{x}, \dots, \overline{x}_n - \overline{x})$	(\overline{x})
xRegressor, erklärende Variable, Prädiktor, unabhängige Variable- Linearität bezieht sich nur auf die Parameter, nicht auf die Variablen $X_{11} \cdots x_{1k}$ $x_{21} \cdots x_{2k}$ \vdots $\tilde{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{1} & x_{1k} & x_{2k} \\ x_{21} & x_{2k} & x_{2k} & x_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix}$ Z.B. $Y_{12} = \beta_{0} + \beta_{1} \ln(x_{1}) + \beta_{2} x_{2}^{2} + \epsilon_{2} \checkmark$ $\tilde{X}_{11} = x_{1k} - x_{2k} - x_{k} $	$\overline{x} = \begin{vmatrix} \overline{x}_1 \\ \overline{x}_2 \\ \vdots \end{vmatrix}$
$\begin{array}{ccc} x_i & \text{Mittelwert} \\ Y & \text{Begressand erklärte Variable} \end{array} \qquad $	$\left(\overline{x}_{k}\right)$
r_{111} Regressing, erklate value, Prognose, abhängige Variable- das Modell enthält die relevanten erklärenden Variablen (Vollständigkeit) $CSSCP = \tilde{X}'.\tilde{X}$ Alternativ: $CSSCP = X'.X$ R^2 BestimmtheitsmaßVariablen (Vollständigkeit)Emp. Kovarianzmetrix & Diagonalmetrix der V.	$l = n.\overline{x}.\overline{x'}$
$R^{2}_{adj} \dots \text{ korrigiertes Bestimmtheitsmaß} $ $(adjusted R^{2})$ 2. Voller Spaltenrang von X: Rang(X) = k + 1 - die Zahl der frei wählbaren Parameter ist klei- ner als die Zahl der vorliegenden Beobachtun. $\begin{pmatrix} s_{x_{i}}^{2} \dots s_{x_{i}k_{k}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} s_{x_1}^2 \cdots 0 \\ & 0 \end{pmatrix}$
$\begin{array}{c} CSSCPCentered Sum of Squares and \\ Cross-Products \end{array} \qquad $	$= \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & s^2 \end{bmatrix}$
5 Schätzer der Korrelationsmatrix B R Schätzer der Korrelationsmatrix Kein exakter linearer Zusammenhang (keine perfekte Multikollinearität) Diagonalmatrix der Streuungen:	$\left(\begin{array}{ccc} 0 & \cdots & s_{x_k} \end{array} \right)$
der Grundgesamtheit P $E(\varepsilon_i \mathbf{X}) = 0$ $(s_{x_i} \cdots 0)$ $(1/s_{x_i} \cdots 0)$	0
XDesignmatrix (der erklärenden Variablen)- keine Beobachtung einer erklärenden Variable leistet einen Beitrag zur Bestimmung des Erwar- tungswertes der Störterme $E_{(x:k)} = \operatorname{sqrt}(D) = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 $	$\cdot 0$ \vdots
$E(\varepsilon_i/X) Bedingter Erwartungswert (auf X bedingter Erwartungswert von \varepsilon_i)$ $Var(\varepsilon_i) Varianz$ $A. Störgrößenspezifikation - Erwartungswert der Störterme in der Grundgesamtheit ist Null: E(\varepsilon_i) = 0 (1 - v_i r_i)$	(x_k)
$Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) \text{ Kovarianz} \qquad - \text{ Homoskedastizität: } Var(\varepsilon_i) = \sigma^2 \qquad \qquad$	
X' Transponierte Matrix - Keine Autokorrelation: $\operatorname{Cov}(\mathcal{E}_i, \mathcal{E}_j) = 0$ $\begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ (k \times k) \end{bmatrix} = \mathbf{E}^{-1} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{E}^{-1} = \begin{bmatrix} x_1 \cdot y_1 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$	
X^{-1} Inverse Matrix5.Normalverteilung der Störterme (keine Gauss- Markov Annahme; für kleine Stichproben) $(r_{x_i,x_i}, \dots, 1)$	

Tabelle 18: Kurzzusammenfassung der multiplen Regression und Berechnung der Korrelationsmatrix¹⁰⁷

 ¹⁰⁷ Eigene Darstellung auf Basis von STOCKER, H. (2014); BACKHAUS, K. et al. (2011a) S69-118; HANDL, A. (2002) S219-245; RENCHER, A.C. (2002) S57-61; S322-337; BROWN, B.L. et al. (2012) S94-100; GREENE, W.H. (2012) S15-25

Tabelle 19: Ausgewählte Tests im multiplen Regressionsmodell¹⁰⁸

Beschreibung		Formeln	Graphische Darstellung		
Generelle Beschreibung:		Test auf die Signifikanz einzelner Koeffizienten:	95% Konfindezellipse $h_0: \beta_1=\beta_2=0$ verwerfen		
Wie bei der einfachen Regressi Beitrag einer unabhängigen Va Erklärung der abhängigen durch einen <i>t</i> -Test überprüft v Signifikanz des Gesamtmo- durch die simultane Prüfung a zienten (ohne Interzept) mit	on kann der uriable x zur Variable Y werden. Die dells kann iller Koeffi- tels F-total	Standardfehler der Regression (Schätzer für σ): $s = \sqrt{\frac{e'.e}{(n-k)}}$ Standardfehler des <i>k</i> -ten Koeffizienten b_k : $s_{b_k} = s_s \sqrt{\nu_{kk}}$	für beide Koeffiziente $H_0: \beta_1=0 \& H_0:\beta_2=0$ nicht verwerfen Konfidenzintervall für b_1		
Test festgestellt werden. Im zu einem individuellen <i>t</i> -Test tigt die die <i>F</i> -Statistik auch Korrelationen zwischen den F koeffizienten b_1 , b_2 ,, b_k . In ein wie z.B. beim Vorliegen von M arität der Fall ist, können alle ten gemeinsam signifikant verschieden sein, wobei die Nu bei allen Koeffizienten individu verwerfen ist. Hinweis auf Mul	Unterschied berücksich- h mögliche Regressions- igen Fällen, Aultikolline- Koeffizien- von Null allhypothese aell nicht zu tikollineari-	Teststatistik (<i>t</i> -verteilt mit <i>n-k</i> Freiheitsgraden): $t - \text{Stat}(b_k) = \frac{b_k - \beta_k^0}{s_{b_k}} \sim t_{n-k}$ Konfidenzintervall für b_k : $b_k \pm t_{\alpha/2}^c (s_n \sqrt{v_{kk}})$ Test auf Signifikanz der Regression: Nullhypothese: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = = \beta_k = 0$ SSP / k	Koeffizient β_1 Koeffizient β_1		
tät kann der Varianzinflationsf liefern. Die Prüfung auf Aut	aktor (VIF) okorrelation	$F - \text{totalStat} = \frac{SSK / k}{SSE / (n - k - 1)} \sim F_{(k, n - k - 1)}$	Venn-Diagramme nach Ballentine:		
1.Ordnung wird oft mit de Watson Test durchgeführt, d kleinen Stichproben gültig ist	m Durbin- er auch in . Für seine	$F - \text{totalStat} = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / (n - k - 1)}$	nicht erklärte Streuung Variable Y		
Anwendung soll die Regr Interzept enthalten und alle sollen exogen sein.	ession ein x-Variablen	Simultaner Test auf Signifikanz von zwei Koeffizienten b_1 und b_2 (Konfidenzregion):	durch x ₁ erklärte Streuung		
Anwendung:		Zwei Hypothesen \rightarrow Konfidenzellipse Mehr als zwei Hypothesen \rightarrow höherdimensionales	Variable x_1 Variable x_2		
Hypothesentests, Prüfung de onskoeffizienten, der Regressi und der Modelprämisse im Regressionsmodell	r Regressi- onsfunktion multiplen	Ellipsoid Gleichung der Konfidenzellipse (Test zweier Koeffi- zienten):	Multikollinearität (kann nicht für die Abschätzung		
Legende:		$[S_{11}.(b_1 - \beta_1)^2 + 2.S_{12}.(b_1 - \beta_1).(b_2 - \beta_2)$	der Regressionskoeffizienten genutzt werden)		
k Anzahl der Regressor	en	$(2.3)^{-1}$	Standardfeher des Koeffizienten b_j in Abhängigkeit von		
n Anzahl der Beobacht	ungen	$S_{11} = \sum_{i} (x_{i1} - x_1) \qquad S_{22} = \sum_{i} (x_{i2} - x_2)$	der Varianz der Storterme, Streuung der Variable (x_j) und Bestimmtheitsmaß der Hilfsregression R^2_i bzw. VFI _i :		
<i>e_i</i> Residuen		$S_{12} = \sum_{i} (x_{i1} - x_1) \cdot (x_{i2} - x_2)$			
R^2 Bestimmtheitsmaß		Nullhypothese: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$			
v_{kk} k-tes Hauptdiagonalel Matrix $(X'.X)^{-1}$	ement der	Konfidenz- und Prognoseintervalle:	$ \begin{array}{c} 2^{2} (Sjj) \\ H \\ $		
$t_{\alpha/2}$ kritischer Wert der t^{-1} mit <i>n-k</i> Freiheitsgrade	Verteilung en	Konfidenzintervall (Konfidenzintervall für den Erwartungswert) an der Stelle x_0 :	nrianz		
SSR Gesamtsumme der er Abweichungen	klärten	$\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{\theta}}^{\prime}.\boldsymbol{b} \pm t_{\alpha/2,n-k-1} \sqrt{\boldsymbol{s}^2.\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{\theta}}^{\prime}.(\boldsymbol{X}^{\prime}.\boldsymbol{X})^{-1}.\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{\theta}}}$	$\stackrel{\sim}{\succ}$ Erhöhung von s ²		
SSE Gesamtsumme der ni erklärten Abweichung	cht gen	$\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{\theta}}' = \begin{pmatrix} 1 & x_{01} & x_{02} & \cdots & x_{0k} \end{pmatrix}$	·····		
<i>F^c</i> kritischer Wert der <i>F</i> - mit 2 Zähler- und n-3 freiheitsgraden	Verteilung Nenner-	Prognoseintervall (Konfidenzintervall für Einzelwer- te) an der Stelle x_{θ} : $\mathbf{x}'_{\theta} \cdot \mathbf{b} \pm t_{\alpha'2,n-k-1} \cdot \sqrt{s^2 \cdot (1 + \mathbf{x}'_{\theta} \cdot (\mathbf{X}' \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{x}_{\theta})}$	$R_{j}^{2}[-] \begin{array}{c} 0,0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1,0 \\ VIF_{j}[-] & 1,00 & 1,25 & 1,67 & 2,50 & 5,00 & \infty \end{array}$		
α Signifikanzniveau		Test auf Multikollinearität:	$SSE/(n-k)$ s^2		
X Designmatrix (der erk Variablen)	tlärenden	Toleranz der Variablen: $T_i = 1 - R_i^2$	$Var(b_k) = \frac{1}{(1-R_j^2) \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \overline{x}_j)^2} = \frac{1}{S_{jj}} .VIF_j$		
<i>b</i> Vektor der geschätzte Regressionskoeffizier	n nten	Variance Inflation Factor (VIF):	Durbin-Watson Statistik		
x_0 Zeilenvektor der erklä	ärenden	$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}$	Verwirf Verwirf Verwirf		
R_{j}^{2} Bestimmtheitsmaß de gression (Regression alle anderen k - l Regr	er Hilfsre- von x _j auf essoren)	Test auf Autokorrelation: Durbin-Watson Statistik:	$\begin{array}{c c} H_0 \\ \hline H_0 \\ \hline Posit. \\ H_0 \\ \hline \hline \hline \hline H_0 \\ \hline $		
S ₁₁ Quadratsumme der A	bweichun-	$\sum^{n} (q - q)^{2}$	relation I Autokorrelation I relation		
gen vom Mittelwert f S ₁₂ Kreuzproduktsumme	ür x ₁ der Abwei-	$DW = \frac{\sum_{i=2}^{n} (e_i - e_{i-1})}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2} \qquad 0 \le DW \le 4$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		
$DW \qquad \text{Durbin-Watson Statis}$	tik	d_L , $d_U \rightarrow$ abhängig von der Anzahl Beobachtungen	H_0 : keine positive Autokorrelation		
d_L, d_U Untere (L) und obere Schranken der kritisc des Durbin-Watson T	(U) hen Werte ests	(n), Anzahl der erklärenden Variablen ohne Interzept(k) für ein Signifikanzniveau (α)	<i>H</i> ₀ : keine negative Autokorrelation (Autokorrelation erster Ordnung)		

¹⁰⁸ Eigene Darstellung auf Basis von STOCKER, H. (2014); BACKHAUS, K. et al. (2011a) S69-118; MONTGOMERY, D.C. et al. (2014) S497-530; WOOLDRIGE, J.M. (2013) S94-98, S118-158, S418-419; HAYTER, A. (2012) S612-642

3.4 Anpassung von diskreten Zustandsprognosemodellen

3.4.1 Struktur des Datenmaterials und Datenzensur

Die Informationen, die in einer PMS-Datenbank enthalten sind, liegen je nach Netz, Entscheidungsebene und Erfassungspraxis in verschiedener Form vor. Die Verfahren, die zur statistischen Analyse dieser Information geeignet sind, hängen u.a. auch von der Struktur der Daten ab (Abbildung 40):

- Querschnittsdaten: Querschnittsdaten enthalten Beobachtungen über verschiedene Abschnitte zu einem gegebenen Zeitpunkt. Die Reihenfolge der Daten ist dabei nicht relevant. Die Analyse von Querschnittsdaten erfolgt durch einfache Regression und für komplexere Zusammenhänge mittels multipler Regression (vgl. Kap. 3.3.2 und Kap. 3.3.3).
- Zeitreihendaten: Zeitreihendaten enthalten Erfassungen von einem Straßenabschnitt über verschiedene Zeitpunkte. Die Reihenfolge der Daten ist entscheidend für die Analyse, die auch konstante Erfassungsverfahren erfordert. Bei Zeitreihen sind oft die Beobachtungen voneinander abhängig und lassen sich u.a. durch Zeitreihenanalysen¹⁰⁹ auswerten.
- Gepoolte Querschnittsdaten: Diese Datenart kombiniert Querschnittsdaten zu verschiedenen Zeitpunkten. Im Unterschied zu Paneldaten aber wird zu diesen Zeitpunkten jeweils eine andere Stichprobe von Abschnitten gezogen bzw. beobachtet.
- Panel- oder Längsschnittdaten: Paneldaten enthalten Beobachtungen über verschiedene Straßenabschnitte, wobei für jeden Abschnitt eine Zeitreihe vorliegt. Wenn die Anzahl von Beobachtungen für jeden Abschnitt gleich ist, und wenn die Daten zu denselben Zeitpunkten gesammelt wurden, heißt das Panel balanciert. In der Erhaltungspraxis liegen oft unbalancierte Paneldaten vor, bei denen nicht die gleiche Anzahl von Daten für alle Abschnitte und für alle Zeitpunkte vorhanden ist. Unbeobachtete Heterogenität (z.B. Einbau- und Materialqualität, Verdichtung etc.) zwischen den einzelnen Abschnitten können mittels Paneldatenansätzen wie des Random-Effects-Modells und des Fixed-Effects-Modells¹¹⁰ berücksichtigt werden.

Datenarten in Abhängigkeit von der Struktur

Auszug (Juerschn	ittsdaten			Zeitreihend	laten
Zustand	lserfassur	ng 2000			Abschnitt 6-	0508:
AbschnS	chädigun	gNLW _{kum}	-	Icha	Schädigung	NLW _{kum}
Bez.	[%]	Mio. [-]	_	Janr	[%]	Mio. [-]
6-0502	32,89	0,00		1992	0,00	0,00
6-0505	36,93	1,71		1994	0,00	1,71
6-0563	4,08	3,27		1996	1,11	3,27
6-8156	72,24	10,22		1998	7,12	4,66
34-0503	11,84	4,66		1999	38,37	5,41
4-0113	2,96	5,41		2000	63,27	6,42
24-0503	10,26	6,42		2001	51,70	7,64
24-0562	14,77	7,64		2002	88,43	8,94
1-0502	21,38	8,94		2003	89,67	10,22
			_	2004	94,90	11,50

Auszug gepoolte Querschnittsdaten:

Abschn	Erfassungs-	Schädigung	g NLW _{kum}	SNC
Bez.	jahr	[%]	in Mio. [-]	[-]
6-0502	1998	5,20	4,73	16,87
6-0505	1998	6,93	4,69	15,83
4-0504	1998	1,45	1,26	17,01
7 :	÷	÷	÷	÷
1-0505	2000	2,68	0,18	12,17
1-4155	2000	13,82	0,39	6,93
// 6-0508	2000	7,12	4,66	20,36
/ <u> </u>	:	:	:	:

Erfassungen in zwei Jahren; Abschnitte fallen nicht zusammen

Auszug balancierte Paneldaten:

Abschn	Erfassungs	-Schädigung	NLW _{kum}	FTW _{kum}
Bez.	jahr	[%]	in Mio. [-]	[d]
6-0502	1998	5,20	4,73	143
6-0502	2000	32,89	6,52	190
6-0502	2002	57,17	9,07	233
÷	:	:	÷	:
4-0504	1998	2,68	1,26	95
4-0504	2000	13,82	1,96	131
4-0504	2002	7,12	2,51	176
:	:	:	:	:

Auszug unbalancierte Paneldaten:

	Abschn	Erfassungs	-Schädigung	NLW _{kum}	FTW _{kum}
	Bez.	jahr	[%]	in Mio. [-]	[d]
	6-0502	1998	5,20	4,73	143
	6-0502	2000	32,89	6,52	190
	6-0502	2002	57,17	9,07	233
	÷	÷	÷	:	:
	4-0503	1998	65,95	1,26	95
	4-0503	2000	82,03	1,96	131
)	4-0505	1998	26,38	1,28	95
/	-	:	:		:

Keine Erfassung für Abschnitt 4-0503 im Jahr 2002 und keine Erfassungen für Abschnitt 4-0505 in 2000 und 2002

Abbildung 40: Querschnitts-, Zeitreihen-, gepoolte Querschnitts- und Paneldatenauszüge aus der LTTP-Datenbank

¹⁰⁹ vgl. HARVEY, A.C. (1993); HAMILTON, J.D. (1994); WOOLDRIGE, J.M. (2013) S343-440

¹¹⁰ vgl. WOOLDRIGE, J.M. (2013) S486-501; GREENE, W.H. (2012) S343-427; MADANAT, S. et al. (2001)

Statistische Verfahren sollen neben der Datenstruktur auch die mögliche Zensur der Daten in Betracht ziehen. Datenzensur ist besonders dann ein Problem, wenn Zustandsverlauf und Lebensdauer abzuleiten sind. Zensierte Daten liegen dann vor, wenn die tatsächliche Lebensdauer (Zeit vom Neubau/Maßnahme bis Ausfall) nicht vollständig beobachtet wird. Bei manchen Merkmalen (z.B. Ermüdungsrissen) ist die Schädigung erst nach einer gewissen Zeit oberflächlich (visuell) erkennbar. Deshalb kann es in diesen Fällen zweckmäßig sein, den Zustandsverlauf auf Basis der Überlebenszeit (von Schadensbeginn bis Ausfall) zu bestimmen. Um die Lebensdauer bzw. Überlebenszeit zu bestimmen, sind mindestens zwei Zeitpunkte erforderlich, die den Beginn und das Ende des Schadensentwicklungsprozesses markieren. Als Beginn dieses Prozesses wird der Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe bzw. der Zeitpunkt, zu dem der Schaden zuerst auftritt, betrachtet. Das Ende der Lebensdauer wird durch die Erreichung einer definierten Ausfallsbedingung ya bestimmt. Diese Ausfallsbedingung ist ein deterministischer Zustand,

der mit einer gegen Null gehenden Wahrscheinlichkeit genau beobachtet werden kann. Es gibt verschiedene Arten von Zensur, wobei auch Kombinationen möglich sind (Abbildung 41)¹¹¹:

- Komplette Daten: Komplette Daten liegen vor, wenn die Lebensdauer bzw. Überlebenszeit für alle Abschnitte bekannt ist.
- Linkszensierte Daten: Wenn der Schädigungsprozess zu einem unbekannten Zeitpunkt vor der ersten Erfassung t₁ beginnt, ist die Überlebenszeit linkszensiert. Die Lebensdauer ist ebenfalls linkszensiert, wenn das Belagsalter (Zeit seit Verkehrsfreigabe) unbekannt ist.
- Rechtszensierte Daten: Die Lebensdauer und die Überlebenszeit von allen Abschnitten, die zum Zeitpunkt der letzten Erfassung t₂ nicht ausgefallen sind, ist rechtszensiert. Die Lebensdauer ist ebenfalls rechtszensiert, wenn auf dem Straßenabschnitt eine Erhaltungsmaßnahme wegen einer anderen Schadensursache vor dem Ausfall durchgeführt wird.
- Intervallzensierte Daten: Die Lebensdauer bzw. Überlebenszeit ist dann intervallzensiert, wenn ihr Beginn oder/und ihre Ende in den Erfassungsintervall hineinfällt. In diesen Fällen ergibt sich eine untere bzw. obere Schranke für die zensierte Zeitdauer.

Aufgabe der Überlebenszeitanalyse (Survival Analysis) ist die Schätzung der Zeit bis zum Ausfall. Dazu werden gemäß Literatur¹¹² nichtparametrische (z.B. Kaplan-Meier), semiparametrische (z.B. Cox Regression) und parametrische (z.B. Weibull) Verfahren eingesetzt. Eine andere Möglichkeit zensierte Daten mit Regressionsmethoden zur behandeln stellt das Tobit-Modell dar¹¹³.

Lebensdauer links- und rechtszensiert:

-

ž

Lebensdauer

<-><^{Überlebenszeit}

Zeit bis

 Δt

- Alter (t_0) nicht bekannt und Ausfall nach der letzten Erfassung t₂
- Schadensbeginn vor der ersten Erfassung t₁ (Überlebenszeit)



rechtszensiert:

- Alter bekannt, Abschnitt vor Ausfall instandgesetzt (t_{AUSF} nicht bekannt)
- Maßnahme nicht $dokumentiert \rightarrow$ Zustandsverbesserung

Lebensdauer intervallzensiert (obere Grenze):

- t_{AUSF} im Erfassungsintervall: $t_{AUSF} \in (t_1, t_2)$
- Variante I : Abschnitt instandgesetzt und $Y(t_2) < Y(t_1)$ oder Variante II: keine Maßnahme und $Y(t_2) \ge y_a$

Lebensdauer rechtszensiert:

- Zum Zeitpunkt der letzten Erfassung wird keine Schädigung beobachtet $Y(t_1) = Y(t_2) = 0$
- Anpassung von Zustandsfunktionen bzw. Regression nicht möglich

LEGENDE:

- Lebensdauer beobachtet
- Lebensdauer unbeobachtet
- Δt Länge Erfassungsintervall
- Bau/Nutzungsbeginn

Abbildung 41: Ausgewählte Fälle zensierter Zustandsdaten von Anlagen mit/ohne Maßnahmen & periodischer Erfassung

Ausfalls-

bedingung



¹¹¹ vgl. KLEINBAUM, D.G. et al. (2012) S5-8; HOFFMANN, M. (2014); MADANAT, S. et al. (2005)

¹¹² vgl. KLEINBAUM, D.G. et al. (2012); HOFFMANN, M. (2014)

vgl. GREENE, W.H. (2012) S845-861; NAKAT, Z. et al. (2008); STOCKER, H. (2014)

3.4.2 Homogene Markov-Ketten

Markov-Prozesse werden in vielen Bereichen zur mathematischen Modellierung von stochastischen Prozessen verwendet. Die einfachste Form ist die homogene Markov-Kette mit diskretem Zeit- und Zustandsraum und konstanten Übergangswahrscheinlichkeiten. Für die vollständige Beschreibung der Markov-Kette sind der Vektor des Ausgangszustands und Transitionsmatrix P(n) bzw. Generatormatrix Q(t) in stetiger Zeit ausreichend. Die Elemente der Hauptdiagonale der Transitionsmatrix geben die Wahrscheinlichkeit für die Beibehaltung des aktuellen Zustandes, die Elemente darüber beschreiben die Wahrscheinlichkeit einer Zustandsverschlechterung. Wird ein Verschlechterungsprozess ohne Maßnahmen modelliert, sind alle Werte unter der Hauptdiagonale Null, der Endzustand heißt absorbierend. Die Zustandsverteilung zum Zeitschritt n ergibt sich als Produkt des Zustandsverteilung zu (n-1) und der Transitionsmatrix. Die Anzahl aufeinander folgender Zeitperioden für welche die Kette in einem Zustand verbleibt wird als Verweilzeit bezeichnet und ist im diskreten bzw. stetigen Fall geometrisch bzw. exponential verteilt. Ein Überblick ausgewählter Aspekte der homogenen Markov-Kette ist in Tabelle 20 gegeben. Markov-Ketten können auch mittels Übergangsgraphen veranschaulicht werden. Die gerichteten Pfeile entsprechen den Übergangswahrscheinlichkeiten, die Kreise kennzeichnen mögliche Zustände.

Die homogenen Markov-Ketten besitzen gewisse Vorteile, die sie für Zustandsprognosen z.B. im Straßenoberbau¹¹⁴ attraktiv erscheinen lässt. Sie erfordern keine vertieften theoretischen Kenntnisse über die Schadensprozesse, keine Annahmen über den Zustandsverlauf, Ausfalls- und Zustandsverteilung. Daher können sie als "black-box" Modelle bezeichnet werden. Ausreichend für die Anwendung sind zwei Zustandserfassungen mit der einzigen Voraussetzung eines gleich langen Erfassungsintervalls. Wird die Transitionsmatrix durch Expertenbefragung abgeleitet, sind Markov-Ketten auch beim Vorliegen von nur einer Erfassung für Prognosen auf diese anwendbar. Im Vergleich dazu sind für die Schätzung der Zustandsfunktionen am Einzelabschnitt mittels Regression mindestens drei Erfassungen erforderlich.

Homogene Markov-Ketten sind mathematisch wenig anspruchsvoll, schnell zu berechnen, die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung ist graphisch darstellbar und leicht nachvollziehbar. Die Zustandsverteilung auf Basis einer homogenen Markov-Kette zeigt zu jedem Zeitpunkt den Anteil der Straßenabschnitte in einem bestimmten Zustand auf Netzebene und die "a priori" Wahrscheinlichkeit für Erreichung eines Zustandes auf Projektebene. Der Ansatz ist allerdings wenig flexibel in der Anpassung der Prognose auf dem Einzelabschnitt, die nur durch die Eingabe des letzten erfassten Zustandes in dem Ausgangsvektor erfolgt. Damit sind die Übergangswahrscheinlichkeiten für alle Abschnitte gleich. Die Ableitung und Verwendung abschnittsspezifischer Transitionsmatrizen im PMS ist theoretisch mittels Simulationstechniken möglich, erfordert aber einen hohen Rechenaufwand bei immer noch schlechtem Ergebnis.

Die Annahme der konstanten Überganswahrscheinlichkeiten in homogenen Markov-Ketten (Gedächtnislosigkeit!) bedeutet z.B. dass ein Abschnitt mit überdurchschnittlich schnellem Schadensverlauf im nächsten Zeitschritt dieselbe Schädigungswahrscheinlichkeit wie der Durchschnitt der Anlagen aufweist. Nachdem die Schädigung des Straßenoberbaus i.a. kontinuierlich verläuft ist diese Modellannahme für den Straßenoberbau kaum geeignet. Folglich können homogene Markov-Ketten bzw. die Exponentialverteilung nur sehr begrenzt für die Modellierung der Lebensdauer von Bauteilen mit einem kontinuierlichen Schädigungsprozess angewendet werden. Sie finden dort Anwendung, wo die Ausfallshäufigkeit von seltenen bzw. zufälligen Ereignissen und nicht dem Alter abhängig ist wie z.B. der Lebensdauer von elektronischen Bauteilen, die aufgrund von zufälligen Spannungsschwankungen ausfallen.

Markov-Ketten berücksichtigen den Einfluss der Datenzensur, insbesondere bei intervallzensierten Daten formal nicht (vgl. Kap. 3.4.1). Wird diese Tatsache bei der Ermittlung der Übergangshäufigkeiten vernachlässigt, ist mit einer stark verzerrten Zustandsprognose zu rechnen. Werden z.B. Ausfälle während des Erfassungsintervalls durch neue Abschnitte ersetzt, können diese nicht beobachtet werden. Folglich wird die Transitionswahrscheinlichkeit in den absorbierenden Zustand unterschätzt bzw. die (Rest)Lebensdauer – erheblich überschätzt. Im Folgenden werden zwei alternative Ansätze vorgestellt, die als Generalisierung der homogenen Markov-Ketten betrachtet werden können.

¹¹⁴ vgl. u.a. HAIDER, S.W. et al. (2012) S149-158; BUTT, A.A. et al. (1994); KOBAYASHI, K. et al. (2010) S343-351

Inhomogene Markov-Ketten sind besser geeignet für die Modellierung des Schädigungsprozesses, da ihre Übergangswahrscheinlichkeiten abhängig von der Zeit und nicht konstant sind. So erscheint es durchaus plausibel, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Abschnitt in einem guten Zustand bleibt mit dem Alter abnimmt, bzw. die Wahrscheinlichkeit eines Klassenwechsels zunimmt. Das Hindernis, das derzeit die Anwendung der inhomogenen Markov-Ketten auf die Zustandsentwicklung des Straßenoberbaus im Wege steht, ist die Ableitung der zeitabhängigen Transitionsmatrix von den Erfassungsdaten. Ein erster Ansatz kann darin bestehen. Transitionsmatrizen für verschiedene Altersgruppen getrennt zu ermitteln. Damit wird die Zustandsentwicklung jeder Gruppe mit einer homogenen Markov-Kette beschrieben¹¹⁵. Sind aber bestimmte Altersklassen dünn besetzt, können die Überganswahrscheinlichkeiten entsprechenden nicht zuverlässig ermittelt werden. In der Literatur¹¹⁶ werden auch eine Reihe von numerischen Lösungsverfahren (z.B. Uniformisierung, Monte Carlo Simulation, Runge-Kutta-Methoden etc.) mit Anwendungen in der Zuverlässigkeitstechnik (Atomkraftwerke, Rechensysteme) beschrieben.

Eine Verallgemeinerung der Markov-Prozesse stellen die Semi-Markov-Prozesse dar. Bei diesen erfolgen die Zustandsübergänge wie bei Markov-Prozessen jedoch mit der Besonderheit, dass die Verweilzeit in einem Zustand nicht mehr exponential bzw. geometrisch verteilt ist. Die Verweilzeit ist selbst eine Zufallsvariable mit beliebiger Verteilung, die sowohl vom aktuellen, als auch dem Folgezustand abhängig ist. Dabei ist die Markov-Eigenschaft nicht zu jedem Zeitpunkt, sondern nur zu den Zeitpunkten der Übergänge τ_i gültig. Weiterhin können die Verweilzeiten von historischen Daten mittels Survival Analysis abgeleitet werden, was die Berücksichtigung von >2 Erfassungszuständen erlaubt. Die theoretischen Grundlagen von Semi-Markov-Prozessen sowie beispielhafte Anwendungen in der Erhaltung des Straßenoberbaus bzw. von Brücken sind in der Literatur¹¹⁷ zu finden.

Abbildung 42 zeigt den Ablauf der Schädigungsprozesse auf Basis homogener und inhomogener Markov-Ketten sowie Semi-Markov-Prozesse.

Mögliche Realisierungen (Sample-pfade) ausgewählter Markov-Prozesse



Verweilzeit: geometrisch verteilt

- Bsp.: Verweilzeit in Zustand 1: $\operatorname{Prob}\left\{R_{1}=4\right\}=(1-p_{11}).p_{11}^{3}$
- *Transitionen*: Gedächtnislos, in gleichen Zeitabständen, mit konstanter Wahrscheinlichkeit



- Verweilzeit: nicht geometrisch verteilt
- Bsp.: Verweilzeit in Zustand 1: Prob $\{R_1(0) = 3\} = p_{11}(0).p_{11}(1).[1 - p_{11}(2)]$
- Transitionen: Gedächtnislos, in gleichen Zeitabständen, mit veränderlicher Wahrscheinlichkeit



- Verweilzeit: beliebig verteilt mit kumulativer Funktion $H_{ii}(t)$
- Bsp.: Verweilzeit in Zustand 1: $H_{12}(t) = \operatorname{Prob}\left\{T_{12} < t\right\}$
- Transitionen: Gedächtnislos, in stochastisch verteilten Zeitabständen, mit konstanter/veränderlicher Wahrscheinlichkeit

Abbildung 42: Graphische Darstellung von Realisierungen einer homogenen und einer inhomogenen Markov-Kette sowie eines Semi-Markov-Prozesses.

Der Prozess startet im besten Zustand, verbleibt dort gewisse Zeit und geht in einen schlechteren Zustand über. Die Entwicklung ist dabei immer nur von dem jeweils aktuellen Zustand abhängig.

•

¹¹⁵ vgl. FU, G. et al. (2014) S240-245; LI, Z. (2005) S89-91, 94-99

¹¹⁶ vgl. LI, Y.-F. et al. (2014) S3-16

¹¹⁷ vgl. THOMAS, O. (2011); NG, S.-K. et al. (1998); HOWARD, R.A. (1971); STEWART, W.J. (2009) S265-267

Eine Anwendung von homogenen Markov-Ketten erfolgt gemäß Abbildung 43 und Abbildung 44 aus Basis von zwei visuellen Zustandserfassungen des Landes Steiermark. Das für alle Abschnitte gleiche Erfassungsintervall ($\Delta t = 4$ Jahre) erlaubt die Ermittlung einer Vierjahrestransitionsmatrix. Eine getrennte Berechnung von Übergangsmatrizen nach Altersklassen ist nicht möglich, weil das Deckschichtalter unbekannt ist. Die Zustandsprognose erfolgt daher nach der Kalenderzeit. Der Berechnungsalgorithmus ist Abbildung 43 und Tabelle 20 zu entnehmen. Einzelne Schritte werden hier ausführlicher diskutiert.

Die Zustandsdaten werden in 5 diskrete Klassen auf Basis des Bewertungshintergrunds des Systems VIAPMS in Österreich geteilt. Damit sind die Klassen nach der entsprechenden Normierungsfunktion unterschiedlich breit. Mit einer feineren Aufteilung (z.B. 10 Klassen) nimmt die Wahrscheinlichkeit des Klassenwechsels zu und die ermittelte durchschnittliche Lebensdauer wird in der Regel kürzer. Für die Darstellung im Beispiel werden jedoch 5 Klassen verwendet. Einerseits sind 5×5 Transitionsmatrizen leichter wahrzunehmen und zu vergleichen. Andererseits sind bei gewissen Schäden wie z.B. Spurrinnen die Zustandsdaten aufgrund der visuellen Erfassung der Spurrinnentiefen stark diskretisiert, weshalb bei einer feineren Aufteilung einige Klassen leer oder dünn besetzt bleiben. Dieses Problem gilt generell für Markov-Ketten, da die relativen Übergangshäufigkeiten die gesamte Anzahl von Abschnitten nicht berücksichtigen. So müssen die Übergangswahrscheinlichkeiten in dünn besetzten Klassen anhand von wenigen Abschnitten ermittelt werden, was zu erheblichen Verzerrungen führen kann. Bei nicht ausreichender Anzahl an Beobachtungen können zudem seltene Transitionen kaum beobachtete werden, weshalb diese fälschlicherweise auf null gesetzt werden. Die Häufigkeit der Übergänge wird anhand der Abschnittslänge bzw. –fläche (für Netzrisse und Ausmagerung) gewichtet um eine repräsentative Abbildung des mittleren Netzverhaltens zu gewährleisten.

Eine Besonderheit des vorhandenen Datenmaterials aus dem Land Steiermark ist weiters, dass Erhaltungsmaßnahmen nicht dokumentiert sind. Die ermittelten Übergangshäufigkeiten zeigen bei den gewählten Klassenbreiten, dass sich der Zustand je nach Schadensmerkmal innerhalb des Intervalls von 4 Jahren auf ca. 8 und 30% aller Abschnitte (je nach Schadensmerkmal) verbessert hat. Es ist sehr wahrscheinlich, dass auf diesen Abschnitten eine Maßnahme im Erfassungsintervall stattgefunden hat, weshalb sie von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Eine Zustandsverbesserung aufgrund zufälliger Messfehler ist damit ebenfalls berücksichtigt¹¹⁸. Das Ergebnis ist eine obere Dreiecksmatrix, die nur einen gleichbleibenden oder schlechter werdenden Zustand zulässt. Bei 5 diskreten Zustandsklassen und breitere Klassengrenzen sind diese Messfehler unwahrscheinlicher, wobei die Hauptdiagonale der Dreiecksmatrix auch einen wesentlichen Anteil von Abschnitten mit geringfügigen Zustandsverbesserungen enthält. Zudem kann mit großer Wahrscheinlichkeit behauptet werden, dass Klassenübergänge mit übersprungen Zustand (z.B. $3\rightarrow$ 1) nicht durch Messfehler sondern durch Maßnahmen zu erklären sind.

Die Zustandsprognose ohne Maßnahmen für erfasste Schadenstypen erfolgt anhand der berechneten Übergangsmatrizen und der Zustandsverteilung des Jahres 2012. Die Zustandsverteilung des Jahres 2008 wird mit der Inversen der dreieckszensierten Transitionsmatrix rückgerechnet und entspricht damit nicht der tatsächlichen Verteilung in diesem Jahr. Die durchschnittliche Restlebensdauer ergibt sich als Differenz zwischen dem Jahr der letzten Erfassung (2012) und dem Jahr, in dem 50% der Abschnitte ausfallen. Der mittlere Zustandsverlauf wird vereinfacht durch Multiplikation des jeweiligen Anteils der Abschnitte in einem diskreten Zustand mit der entsprechenden Note ermittelt und weist unabhängig von dem jeweiligen Schadenstyp immer einen linearen Verlauf auf. Für das Zustandsmerkmal Querrisse ergibt sich somit eine Ø Restlebensdauer von $x_r=59,7$ Jahren, wobei sich ca. 20% der Abschnitte nach 100 Jahren noch im Zustand 1 befinden. Die Restlebensdauer wird auch für Spurrinnen mit $x_r=46,7$ Jahren und für Netzrisse mit $x_r=31,1$ Jahren erheblich gegenüber bekannten Werten der Literatur überschätzt. Der erforderliche finanzielle Aufwand aus einer Abschätzung mittels Markov-Ketten wird daher nahezu immer den tatsächlichen Bedarf unterschätzen. Wegen der erwähnten Einschränkungen sind homogene Markov-Ketten nur für kurze Prognosezeiträume und linearen Zustandsverlauf geeignet. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von homogenen Markov-Ketten und anderen im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Methoden auf Basis von LTTP-Daten und Monte Carlo Simulation ist in Kap. 3.5 gegeben.

¹¹⁸ vgl. SOCINA, M. (2007) S192-193

Bsp. (Teil 1): Stochastische Zustandsprognose für den Straßenoberbau mittels homogener Markov-Ketten auf Basis von zwei visuellen Zustandserfassungen im Land Steiermark (Netzebene)

Erfassungsdaten aus den visuellen Zustandserfassungen 2008 und 2012 im Land Steiermark liegen für ca. 3.560 km Landesstraßen (17.635 Abschnitte) vor. Die erfassten Zustandsgrößen werden nach Schadensmerkmalen getrennt mittels Bewertungshintergrund in 5 Zustandsklassen diskretisiert. Die Basis für die Transitionsmatrix bilden die absoluten Häufigkeiten des Übergangs zwischen diskreten Zuständen. Die absoluten Häufigkeiten werden dann je Zeile in der Transitionsmatrix auf 100% normiert, was eine vollständige Beschreibung aller Entwicklungspfade samt Eintrittswahrscheinlichkeit erlaubt. Die Verbesserung einzelner Abschnitte im Erfassungsintervall (Werte unter der Hauptdiagonalen) werden ausgeschlossen, da die Zustandsentwicklung ohne Maßnahmen abgebildet werden soll. Aus der Vierjahresmatrix werden dann noch die Einjahrestransitionsmatrix und die Transitionsratenmatrix Q berechnet (vgl. Tabelle 20).

Längsrisse (LR)



Abbildung 43: Stochastische Zustandsprognose mittels homogener Markov-Ketten für verschiedene Schäden an Asphaltdecken auf Basis der visuellen Zustandserfassungen 2008 und 2012 im Land Steiermark (Teil 1)

Bsp. (Teil 2): Stochastische Zustandsprognose für den Straßenoberbau mittels homogener Markov-Ketten auf Basis von zwei visuellen Zustandserfassungen im Land Steiermark (Netzebene)

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Die aus dem MARKOV Modell resultierenden Zustandsfunktionen für alle Schadensmerkmale weisen einen linearen Verlauf auf
- Wie bei MARKOV Modellen üblich, führt der absorbierende Zustand 5 zu einem degressiv asymptotischen Endverlauf
- Das MARKOV Modell verzerrt durch konstante Übergangswahrscheinlichkeiten die tatsächliche Zustandsentwicklung
- Durch die Zensur ersetzter ausgefallener Abschnitte und den verzerrten Zustandsverlauf wird die Lebensdauer i.a. erheblich überschätzt

Spurrinnen (SR)



Abbildung 44: Stochastische Zustandsprognose mittels homogener Markov-Ketten für verschiedene Schäden an Asphaltdecken auf Basis der visuellen Zustandserfassungen 2008 und 2012 im Land Steiermark (Teil 2)

Tabelle 20: Homogene zeitdiskrete und zeitstetige Markov-Ketten in der Übersicht¹¹⁹

Beschreibung		Formeln	Beispiele	
Generelle Beschreibung:		Homogene zeitdiskrete Markov-Ketten (HDTMC):	Bsp.: Irreduzible Homogene Markov-Kette:	
Beschreibung Generelle Beschreibung: Wenn die Entwicklung eines Systems in der Zukunft nur von dem aktuellen Zu- stand dieses Systems und nicht von der bisherigen Entwicklung abhängig ist, kann dieses System durch einen Markov-Prozess modelliert werden. Ein Prozess mit diskre- tem Zustandsraum wird als Kette bezeich- net. Die Entwicklung einer Markov-Kette verläuft in Schritten n oder kontinuierlich. Die 1-Schritt Übergangswahrscheinlichkeit, dass der Prozess in einem Schritt von Zustand i in den Zustand j wechselt. Die Berechnung von n-Schritt Übergangswahr- scheinlichkeiten erfolgt mit den Chaplan- Kolmogorov Gleichungen. Die Kette ist homogen, wenn sich die Übergangswahr- scheinlichkeiten mit der Zeit nicht ändern und inhomogen sonst. Die Verweilzeit (Sojourn time) ist die Anzahl von aufei- nanderfolgenden Zeitschritten. für die die		Hormerican problem for the formation of	Bsp.: Irreduzible Homogene Markov-Kette: Bin Zustand <i>j</i> ist erreichbar von Zustand i ($i \rightarrow j$), wenn $p_{ij}^{(n)} > 0$ Zwei Zustände <i>i</i> und <i>j</i> kommunizieren ($i \leftrightarrow j$), wenn sie gegenseitig voneinander erreichbar sind Eine homogene diskrete Markov-Kette ist irreduzibel, wenn alle Zustände kommunizieren 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6} 000^{6}	
Markov-Kette in gegebenem Zustand verbleibt. Die Verweilzeit im jeden Zu- stand einer homogenen zeitdiskreten (zeitstetigen) Markov-Kette ist geomet- risch (exponential) verteilt.		$ \begin{pmatrix} p_{i0}(n) & p_{i1}(n) & \cdots & p_{ij}(n) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 \le p_{ij}(n) \le 1 \end{pmatrix} $ Markov-Matrix oder	$\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} 0,800 & 0,150 & 0,050 \\ 0,100 & 0,800 & 0,100 \\ 0,250 & 0,050 & 0,700 \end{pmatrix}$	
Beispiele		$\sum_{n=(n)=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{c} \text{Markov-Mark oder} \\ \text{stochastische Matrix} \end{array} \right.$	Bsp.: Absorbierende Homogene Markov-Kette:	
Analyse von Warteschlangen, Geburts- und Todesprozesse, Wettervorhersage, Irrfahrtmodelle (Random Walk), Beurtei- lung der Zuverlässigkeit von Systemen und dessen Teilkomponenten, DNA-Stränge, Risiko in Versicherungs- und finanztechni-		$\sum_{j} p_{ij} (n) = 1$ n-Schritt Übergangswahrscheinlichkeit: $p_{ij}^{(n)} = \operatorname{Prob} \{ X_{n+k} = j \mid X_k = i \}$ Chapman-Kolmogor Gleichungen: $p_{ij}^{(n+m)} = \sum_{k=0}^{\infty} p_{ik}^{(n)}, p_{kl}^{(m)}$	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} & p_{13} \\ \hline \\ p_{11} \\ p_{11} \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} p_{23} \\ p_{22} \\ p_{23} \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{Ein Zustand } i \text{ heißt} \\ \text{rekurrent, wenn er} \\ \text{unendlich oft} \\ \text{angenommen wird} \\ \\ \sum_{n=1}^{\infty} p_n^{(n)} = \infty \end{array}$ Ein Zustand i heißt transient, wenn er endlich oft im	
sche Pro	bzesse, Modelle für Epidemien	In Matrixschreibweise:	Laufe der Zeit angenommen wird (Zustände 2 & 3)	
Legende	:	$\boldsymbol{P}^{(n+m)} = \boldsymbol{P}^{(n)}, \boldsymbol{P}^{(m)} \rightarrow \boldsymbol{P}^{(2)} = \boldsymbol{P}^{(1+1)} = \boldsymbol{P}, \boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}^2$ $\boldsymbol{P}^{(n)} = \boldsymbol{P}^{(n-1+1)} = \boldsymbol{P}^{n-1}, \boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}^n$	$\sum_{a=i}^{n} P_{a}^{(i)} < \infty$ Ein Zustand <i>i</i> heißt absorbierend, wenn kein weiterer Zustand von <i>i</i> erreicht werden kann (Zustand 3)	
X	Zufallsvariable mit Realisationen $X_0, X_1, \dots, X_n, \dots$ zu den Zeitschritten $0, 1, \dots, n, \dots$	Verweilzeit (Homogene zeitdiskrete Markov-Kette): $\operatorname{Prob}\left\{R_{i}=k\right\}=(1-p_{ii}).p_{ii}^{k-1}$	$p_{u} = 1$ $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{100\%}{80\%}$ $= Zustand 3$ $= Zustand 2$	
n	Anzahl der Zeitschritte	$E(R_i) = \frac{1}{1 - r_i}$ $Var(R_i) = \frac{p_{ii}}{(1 - r_i)^2}$	10 60% - □Zustand 1	
$\boldsymbol{P}(n)\dots$	Transitionsmatrix für inhomogene Markov-Kette	$1 - p_{ii} \qquad (1 - p_{ii})$ Wahrscheinlichkeitsverteilung (homogen): $\boldsymbol{\pi}^{(n)} = \boldsymbol{\pi}^{(n-1)} \cdot \boldsymbol{P} = \boldsymbol{\pi}^{(0)} \cdot \boldsymbol{P}^{n}$	40% - 20% -	
P	Transitionsmatrix für homogene Markov-Kette	Wahrscheinlichkeitsverteilung (inhomogen): $\mathbf{r}^{(n)} = \mathbf{r}^{(n-1)} \mathbf{P}(n, 1) = \mathbf{r}^{(0)} \mathbf{P}(0) \mathbf{P}(1) = \mathbf{P}(n, 1)$	0%	
<i>p_{ij}</i> (<i>n</i>)	1-Schritt Übergangswahrschein- lichkeit für inhomogene Markov- Kette	$\pi = \pi$. F $(n-1) = \pi$. F (0) , F (1) , F $(n-1)$ Homogene zeitstetige Markov-Ketten (HCTMC):	$\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} 0.812 & 0.188 & 0.000 \\ 0.000 & 0.812 & 0.188 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix}$	
$p_{ij}^{n}(n)\ldots$	n-Schritt Übergangswahrschein- lichkeit für inhomogene Markov- Kette	Inhomogene zeitstetige Markov-Kette (ICTMC): $p_{ij}(s,t) = \operatorname{Prob} \left\{ X(t) = j \mid X(s) = i \right\}$	Bsp.: Inhomogene Markov-Kette (IDTMC)	
R_i	Verweilzeit in Zustand i	Homogene zeitstetige Markov-Kette (HCTMC):	≥ 100% ■Zustand 3	
π	Wahrscheinlichkeitsverteilung (Zeilenvektor)	$p_{ij}(\tau) = \operatorname{Prob}\left\{X(s+\tau) = j \mid X(s) = i\right\} \qquad \tau = t - s$	E Company and Comp	
$\pi^{(\theta)}$	Anfangsverteilung	Transitionsrate (Ubergangsrate): $\begin{pmatrix} n & (t, t + \Delta t) \end{pmatrix}$	40% -	
s,t,u	Zeitpunkte	$q_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left\{ \frac{p_{ij}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \right\} \qquad q_{ii}(t) = -\sum_{j \neq i} q_{ii}(t)$	Spue 20% -	
$q_{ij}(t)$	Transitionsrate von Zustand i in Zustand j zu Zeitpunkt t	Transitionsratenmatrix (infinitesimaler Generator):	$\frac{23}{N}$ 0 10 20 30 Zeitschritte n [-]	
$Q(t)\dots$	Transitionsratenmatrix	$Q(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left\{ \frac{P(t, t + \Delta t) - I}{\Delta t} \right\}$	$(1 - \ln(n+1)/10 - \ln(n+1)/10 = 0)$	
$F_i(x)$	Kumulative Dichtefunktion der Verweilzeit (HCTMC)	Lösung der Chapman-Kolmogorov Gleichungen:	$\boldsymbol{P}(n) = \begin{bmatrix} 0 & 1 - \ln(n+1) / 10 & \ln(n+1) / 10 \\ 0 & 0 & 1 - \ln(n+1) / 10 & \ln(n+1) / 10 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
I	Identitätsmatrix	$\boldsymbol{P}(t) = c.\exp(\boldsymbol{Q}t) = \exp(\boldsymbol{Q}t) = \left(\boldsymbol{I} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\boldsymbol{Q}^n \cdot t^n}{n!}\right)$		
C Prob(1)	Integrationskonstante Bedingte Wahrscheinlichkeit		$\left[\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cccc} 0,931 & 0,069 & 0,000 \\ 0.000 & 0.021 & 0.000 \\ 0.000 & 0.021 & 0.000 \end{array}\right]$	
PTOD{ }.	. Deuingte wanrscheinlichkeit	Verweilzeit (Homogene zeitstetige Markov-Kette): $F_i(x) = 1 - \exp(-\mu_i \cdot x)$ $\mu_i = \sum_{i \neq i} q_{ij} = -q_{ii}$		
		·		

Eigene Darstellung auf Basis von ROSS, S.M. (2014) S183-260, S357-398; STEWART, W.J. (2009) S193-274; DURRETT, R. (2012) S1-74, S139-175; NORRIS, J.R. (1997); CASSANDRAS, C.G. et al. (2008) S369-422; HOFFMANN, M. (2014)

3.5 Vergleich von Zustandsprognosemodellen

3.5.1 Vergleich auf Basis von LTPP-Daten (USA)

Für eine beispielhafte Gegenüberstellung der Modelle auf Basis von realen Daten gemäß Abbildung 45 und Abbildung 46 werden Abschnitte mit einer großer Anzahl von aufeinanderfolgenden Erfassungen aus der "long term pavement performance (LTPP)" Datenbank zufällig gewählt¹²⁰. Die Zustandsprognose auf Netzebene erfolgt mittels homogener Markov-Ketten, einfacher bivariater Regression und dem Zustandsprognosemodell nach HOFFMANN. Die mit dem zuletzt erwähnten Ansatz ermittelte Masterfunktion wird auf jeden Abschnitt mit vertikaler und horizontaler Verschiebung sowie Skalierung durch die letzte zu t₁ Erfassung angepasst. Die Anpassung mit Regression (deterministisch/stochastisch) erfolgt, in dem die Form der Masterfunktion (β_2) beibehalten wird. Die Prognose auf Netzebene besteht dann darin, die angepassten Prognosen für alle Abschnitte aufzusummieren. Der Vergleich erfolgt visuell auf Basis der graphisch dargestellten Zustandsverteilungen. Ein Hinweis auf die Größenordnung der Unterschiede liefert die Darstellung der Ausfallsverteilungen nach den Prognosemethoden in einem Diagramm. Zusätzlich sind die Anteile der Abschnitte in den fünf üblichen diskreten Zustandsklassen zum beliebig gewählten Zeitpunkt t=24 in einer Tabelle zahlenmäßig gegeben.

Die vollständige Darstellung der Grundlagen des stochastischen Zustandsprognosemodells von HOFFMANN und der umfangreichen Möglichkeiten dieses Ansatzes würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Im betrachteten Beispiel wird dieses Modell jedoch bewusst einbezogen, da es eine Vergleichsbasis zu den anderen Modellen bis hin zur Regression schafft. In Tabelle 21 sind dazu alle Formeln angegeben, um die Nachvollziehbarkeit der Zustandsprognose ohne Maßnahmen und der dabei durchgeführten Berechnungen ermöglichen. So erlaubt der Ansatz nach HOFFMANN eine vollständige Beschreibung der zustandsabhängigen Restlebensdauer überlebender Anlagen zu jedem Zeitpunkt. Die Rückrechnung der unzensierten Zustandsentwicklung auf Basis zensierter Daten und ist ebenfalls möglich. Die größte Stärke des Ansatzes liegt jedoch in einer akkuraten Prognose der Zustandsverteilung auf Netzebene gemäß dem zentralen Grenzwertsatz, wenn die Anzahl an Abschnitten hinreichend groß ist. Werden auf Abschnittsebene neue Information z.B. aus einer Zustandserfassung verfügbar, werden die entsprechende Zustandsfunktion automatisch angepasst, was die Streuung der entsprechenden Ausfallsverteilung reduziert bzw. die Menge der "a priori" möglichen Zustände beschränkt.

Die verwendeten langen Zeitreihen der Zustandsdaten erlauben eine zuverlässige Schätzung des Schadensverlaufs am Einzelabschnitt und der Ausfallsverteilung am Netz. Mittels nichtlinearer Regression für jeden Abschnitt nach der Zeit mittels Potenzfunktion kann die empirische Verteilung des Formparameters β_2 ermittelt werden. Ist die Streuung dieser Verteilung gering, kann davon ausgegangen werden, dass die Zustandsentwicklung charakteristisch für den betrachteten Schadenstyp ist. Auf Basis der Daten ergibt sich der Erwartungswert nach obiger Methodik zu 2,905. Wird die Masterfunktion auf Netzebene wie standardmäßig üblich gleichzeitig an allen Messwerten (Punktwolke) durch einfache Regression angepasst ergibt sich β_2 zu 1,548. Dieser Wert unterschätzt deutlich die Schadensprogressivität im Verhältnis zu dem durchschnittlichen Wert am Einzelabschnitt (2,905) und wird auf 78 von 100 Abschnitten überschritten. Im vorliegenden Fall weisen einige Abschnitte eine große Schädigung kurz nach dem Bau auf. Mit der Methode der kleinsten Quadrate (OLS) werden sie stärker als andere Abschnitte gewichtet. Für die Prognose bedeutet dies, dass in den ersten Jahren die Anlagen früher einen schlechteren Zustand erreichen als tatsächlich beobachtet. Aus dem Streudiagramm wird auch ersichtlich, dass die Annahme einer konstanten Varianz der Störterme (Homoskedastizität) verletzt ist. Weiterhin unterschätzt die einfache Regression die Streuung der Ausfallsverteilung (95% Konfidenzintervall) um fast das doppelte. Erfolgt eine Zustandsprognose am Einzelabschnitt durch Verschiebung bzw. Skalierung der aus der einfachen Regression ermittelten verzerrten Masterfunktion, so sind darauf basierende Instandhaltungsszenarien und optimale Eingriffszeitpunkte daher mit erheblichen systematischen Fehlern behaftet. Weitere Kommentare und Ergebnisse der Analyse können den folgenden zwei Abbildungen entnommen werden.

¹²⁰ vgl. HOFFMANN, M. et al. (2014)

Bsp. (Teil 1): Vergleich von Zustandsprognosemodellen auf Netzebene für Querrisse auf Basis von mehrmaligen Erfassungen mittels bivariater Regression, Markov-Ketten und Hoffmann-Modell

Für 100 Abschnitte aus der LTTP-Datenbank sind das Alter (Zeit seit der letzten Instandsetzungsmaßnahme) sowie 3 bis 12 aufeinanderfolgenden Erfassungen pro Abschnitt zu Querrissen gegeben. In einem ersten Schritt wird die Zustandsfunktion mittels bivariater Regression geschätzt. Der Verlauf basiert auf einer Potenzfunktion ohne Interzept unter der Annahme, dass zu t=0 keine Querrisse vorliegen dürfen. Die Durchführung der Regression (β_1 und β_2 frei) im zweiten Schritt individuell für alle Abschnitte ergibt eine Verteilung des Formparameter β_2 . Mit dem Erwartungswert dieser Verteilung wird die Regression noch einmal wiederholt (β_1 frei, β_2 fix). Die resultierende Masterfunktion, Ausfalls- und Zustandsverteilung sind graphisch darzustellen und mit den Ergebnissen des MARKOV – Modells zu vergleichen.



Abbildung 45: Vergleich von Zustandsprognosemodellen für Querrisse auf Netzebene auf Basis von Paneldaten mittels bivariater Regression, Markov-Ketten und Hoffmann-Modell (Teil 1)

Bsp. (Teil 2): Vergleich von Zustandsprognosemodellen auf Abschnittsebene für Querrisse auf Basis von mehrmaligen Erfassungen mittels bivariater Regression, Markov-Ketten und Hoffmann-Modell

Für das Beispiel des Modelles für Querrisse mit LTPP-Daten (vgl. Bsp. Teil 1) sind folgende Aufgaben zu lösen:

- Prognose auf Abschnittsebene mittels Regression (stochastisch und deterministisch) unter der Annahme gleichbleibender Schadenscharakteristik β₂ mit der in Teil 1 ermittelten Funktion auf Netzebene (Hoffmann) für alle 100 Abschnitte
- Prognose auf Abschnittsbene mittels vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung durch die letzte Erfassung für jeden Abschnitt zu t₁=12
- Aufsummieren der Prognosen und Gegenüberstellung



Abbildung 46: Vergleich von Zustandsprognosemodellen für Querrisse auf Netzebene auf Basis von Paneldaten mittels Aufsummieren der auf den Einzelabschnitt angepassten Prognosen (Teil 2)

Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Die Abweichungen zwischen Anpassung durch Regression (stochastisch/deterministisch) und Anpassung durch die letzte Messung (scale/shift) sind hoch, obwohl zu t₁ = 12 bereits ein langer Beobachtungszeitraum zur Verfügung steht
- Die Skalierung ergibt eine erhöhte Lebensdauer für ca. 10% der Abschnitte, die zu t_1 noch in einem relativ guten Zustand sind (vgl. Kap. 3.3.1)

Zustandsprognose durch Regression stochastisch

Tabelle 21: Übersicht des stochastischen Zustandsprognosemodelles von HOFFMANN¹²¹

Beschreibung		Formeln	Beispiele	
Generell	e Beschreibung:	Stochastische Zustandsentwicklung mit Potenz-	Bsp.: Zustandsentwicklung auf Netzebene:	
 Der vorlistochastis Prozess) / kontinuie tischen Z Vorausse Die Ne probat Die Volusse Der Sc tisch & Der Sc tisch & Der jewe einer be Obergren Zum Zeit 	egende zeit- und zustandsstetige iche Prozess (HOFFMANN- ist für jedes beliebiges System mit rlichen Alterung und charakteris- Zustandsfunktion unter folgenden tzungen anwendbar: atur der Zustandsentwicklung ist bilistisch erteilung der Lebensdauer ist nt und mathematisch beschreibbar rhädigungsverlauf ist charakteris- k skalierbar eilige Anteil der Abschnitte in ilebigen Zustandsklasse i mit ze y _{inma} und Untergrenze y _{inmin} punkt t ergibt sich als Integral der	funktion auf Netzebene ohne Maßnahmen: $y_a = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_a^{\beta_2}$ (Beliebige Zustandsfunktion) Skalierungsfaktoren für $y_{i,min}$ und $y_{i,max}$: $\beta_{1,min}(t) = \frac{y_{i,min} - \beta_0}{t^{\beta_2}}$ $\beta_{1,max}(t) = \frac{y_{i,max} - \beta_0}{t^{\beta_2}}$ Maximale bzw. minimale Lebensdauer für Anlagen in Zustandsklasse i zu t: $x_{o,i} = \left(\frac{y_a - \beta_0}{\beta_{1,min}}\right)^{U\beta_2}$ $x_{u,i} = \left(\frac{y_a - \beta_0}{\beta_{1,max}}\right)^{U\beta_2}$ Anteil der Anlagen in einer beliebigen Zustandsklasse i zum Zeitpunkt t: $A_i(t) = \int_{x_i}^{x_i} f(t) dt$	Ausfallsverteilung f(t): e.g. Weibull mit $\beta=2,2$ (shape): $\alpha=25,0$ (scale) Ausfälle $u = x_a$ $y(t) = \beta_0 + \beta_1 t^{\beta_1}$ Note 3 $y(t) = \beta_0 + \beta_1 t^{\beta_1}$ Note 4 $y(t) = \beta_0 + \beta_1 t^{\beta_1}$ Note 3 $y(t) = \beta_0 + \beta_0 + \beta_0 t^{\beta_1}$ Note 3 $y(t) = \beta_0 + \beta_0 + \beta_0 t^{\beta_1}$ Note 3 y(t) =	
Dichtefur den Grenz zeitpunkt Grenze (Zustands) Einzelabs ebene e Schadens Anpassur ten durch parametei rende Mk was die Konfiden Zustands' Beispiele Modelliei Systemer	Iktion der Ausfallsverteilung in zen von $x_{u,i}$ bis $x_{o,i}$ - die Ausfalls- en der durch die obere und untere funktionen. Die Prognose für den ichnitt erfolgt mit der auf Netz- rmittelten Masterfunktion und charakteristik β_2 , wobei für die g an den vorhandenen Messwer- Regression nur der Skalierungs- r β_1 verwendet wird. Das resultie- odell ist damit intrinsisch linear, analytische Berechnung von zintervallen und resultirenden wahrscheinlichkeiten ermöglicht. : rung und Zustandsprognose von a, die einer kontinuierlichen	Durchschnittliche Restlebensdauer aller überlebender Anlagen zum Zeitpunkt t:	Linear $(x_a=21,2; \beta_0=0; \beta_2=1,0)$ Linear $(x_a=21,2; \beta_0=0; \beta_2=1,0)$ Note 5 Note 4 Note 3 Note 2 Note 1 Progressiv $(x_a=21,2; \beta_0=0; \beta_2=2,0)$ Progressiv $(x_a=21,2; \beta_0=0; \beta_2=2,0)$ Note 5 Note 4 Note 5 Note 6 Note 5 Note 4 Note 5 Note 4 Note 5 Note 4 Note 5 Note 6 Note 5 Note 6 Note 5 Note 6 Note 5 Note 6 Note 6 N	
Abnutzung und Alterung unterliegen, wie z.B. Straßenoberbau, Brückenanlagen, Tunnelanlagen, Wasserstraßen etc.		Durch Substitution des Prognosefehlers: $s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_t - \overline{x})^2}{S_{xx}}} = \sigma > 0$	0% 0 10 20 30 40 50 60 70 Stetige Zeit t [-]	
Legende		und der geschätzten Funktion		
<i>x</i> _{<i>a</i>}	Deterministische mittlere Lebensdauer	$b_0 + b_1 \cdot x_t = \mu$	Bsp.: Zustandsentwicklung auf Abschnittsebene:	
<i>y</i> _{<i>a</i>}	Ausfallsgrenze bzw. spätester Zeitpunkt für Maßnahmen	$Z = \frac{\mu - y_t}{\sigma} \sim t_{df} \rightarrow y_t = \mu - \sigma.Z \rightarrow y_t \sim t_{df}(\mu, \sigma^2)$	Zustandsverteilung f(y): Nicht-standard. Student-t wicht frug (hereiten) = (ereiten)	
β_0	Anfangsschädigung	$=> y_t$ ist nicht-standardisierten Student-t verteilten Zufallsvariable	mit df; μ (location); σ (scale) fur Note 4 zu t=x _a	
$\beta_1 \dots$ $\beta_2 \dots$	Skalierungstaktor bzw. Verschlechterungsrate Schadensverlauf (<1=degressiv, 1=linear, >1=progessiv)	Dichtefunktion der nicht-standardisierten Student-t Verteilung (verallgemeinerte t-Verteilung):	Resultierende Ausfälle f(t) - fitted 00% i i i $y_{a,3}$ Note 5 Note 4	
$\beta_{1,min}$	Skalierungsfaktor für y _{min}	$f(y) = \frac{\Gamma(df + f) / 2J}{\Gamma(df / 2) \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot df}}$	60%	
$\beta_{1,max}$	Skalierungsfaktor für y_{max}		$40\% \qquad \qquad$	
$A_i \dots$	Ø Restlebensdauer aller überlebenden Anlagen zu t	$\times \frac{1}{(1 + (1/df) \cdot [(y - \mu)/\sigma]^2)^{(df+1)/2}}$	20% − Proghose (95%) 0% ∧ Messwerte (df=2) Note 1	
Γ(·)	Gammafunktion	$\Gamma(\alpha) = \int u^{\alpha - 1} \exp(-u) du$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	
μ	Lageparameter	⁰ Wahrscheinlichkeit für Erreichung einer Zustands-	x _a =21,8	
σ	Skalierungsparameter	klasse i zum Zeitpunkt t:	Progressiv $(x - 21.8 \cdot \beta - 0 \cdot \beta - 2.0)$	
$f(\cdot)\dots$	Dichtefunktion	$A(t) = \int_{0}^{y_{a,a}} f(y) dy = \operatorname{Prob}(y \le y \le y)$	$\approx 100\%$	
df	Freiheitsgraden	y _{a,u}	≥0. 80% - Note 4	
<i>Sxx</i>	Varianz des Regressors xi	Erwartungswert der verallgemeinerten t-Verteilung:	■ 60% ■ Note 3	
n $b_{0}, b_{1},$	Anzahl der Beobachtungen Geschätzte Regressionskoeffizienten Standardfehler der Regression	$E(y) = \mu$ Varianz der verallgemeinerten t-Verteilung:	20% Note 1	
x	Mittelwert Zufallsvariable x _i	$Var(y) = \sigma^2 \cdot \frac{ay}{df - 2}$	\vec{N} 0 10 20 30 40 50 60 70	
			Stetige Zeit t [-]	

¹²¹ Eigene Darstellung auf Basis von HOFFMANN, M. (2006) S348; HOFFMANN, M. et al. (2012) S2131-2138; HOFF-MANN, M. (2013c); HOFFMANN, M. (2014); HOFFMANN, M. et al. (2014); JACKMAN, S. (2009) S501, 507

3.5.2 Vergleich auf Basis einer Monte Carlo Simulation (MCS)

Der Vergleich von Prognosemodellen basiert oft darauf, wie gut diese beobachtete Daten beschreiben, was methodisch problematisch sein kann. Diese Probleme können jedoch z.B. durch Teilung des Beobachtungszeitraum in einen Schätzzeitraum und einen Prognosezeitraum umgangen werden. Das Modell wird damit auf Basis eines Teils der vorhandenen Daten geschätzt bzw. kalibriert. Die prognostizierten Werte können dann mit den restlichen beobachteten Werten verglichen werden. Da in der Praxis meistens der Datenbestand nicht ausreichend oder zensiert ist, können die Abweichungen von den realen Daten nicht exakt oder zeitabhängig quantifiziert werden. Diese Einschränkung existiert nicht mehr, wenn bei der Gegenüberstellung von einem bekannten stochastischen Prozess ausgegangen wird (Abbildung 47).

Mit der Annahme einer beliebigen Ausfallsverteilung und eines charakteristischen Zustandsverlaufs (vgl. Tabelle 21) ist eine stochastische Zustandsverteilung zum jeden beliebigen Zeitpunkt t1 rückrechenbar. Die Berechnungen im Beispiel werden mit Hilfe eines Simulationsverfahren (MCS) durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass der Berechnungsvorgang leicht nachvollziehbar ist. Die Ermittlung statistischer Kennwerte und Konfidenzintervalle ist zudem unproblematisch. Die gewählte Masterfunktion wird weiter in den Zustand zu t₁ vertikal bzw. horizontal verschoben und skaliert. Die Darstellung der resultierenden Zustands-, Alters- und Ausfallsverteilungen sowie Kommentare zu Abweichungen vom ursprünglichen Prozess sind in Abbildung 48 bis Abbildung 50 enthalten.

Ist die Zustandsverteilung zu zwei beliebigen Zeitpunkten t_1 und t_2 bekannt, kann die Prognose auch auf Basis homogener Markov-Ketten erfolgen (Abbildung 51 und Abbildung 52). Dabei ist die jeweilige Transitionsmatrix bzw. resultierender Zustandsvektor von folgenden Bedingungen abhängig:

- Lage des Beobachtungsintervall im Verhältnis zu Lebensdauer
- Breite des Beobachtungsintervall
- Klasseneinteilung bzw. Dimension der Transitionsmatrix

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Übergangswahrscheinlichkeiten mit der Zeit verändern. Ferner ist dieser Ansatz bedingt geeignet für Behandlung bzw. Prognose stetiger Zustandsverteilungen.

Bsp.: Prognosen mit vertikaler/horizontaler Verschiebung sowie Skalierung der Masterfunktion auf Basis einer Monte Carlo Simulation

 Erzeugung von 40.000 Zufallszahlen aus einer beliebigen Ausfallsverteilung – Lebensdauer f
ür fiktive Abschnitte, die zur selben Zeit "gebaut" sind

Ausfallsverteilung f(t)



• Rückrechnung des Skalierungsparameters $\beta_{1,i}$ mit der gewählten Masterfunktion (degressiv/linear/progressiv), der Ausfallsgrenze y_a und der erzeugten Lebensdauer x_{a,i} und Berechnng der Zustandsverteilung zum Zeitpunkt t₁ (40.000 Mal)

$$\beta_{1,i} = \frac{y_a - \beta_0}{x_{a,i}^{\beta_2}} \quad \to \quad y_i(t_1) = \beta_0 + \beta_{1,i} t_1^{\beta_2} \quad (t_1 = 7)$$

 Zustandsprognose mit horizontaler & vertikaler Verschiebung sowie Skalierung der Masterfunktion durch den Zustand zu t₁ (vgl. Kap. 3.3.1)



Abbildung 47: Zustandsprognose mit Skalierung bzw. vertikaler/horizontaler Verschiebung auf Basis einer gegebenen stochastischen Zustandsverteilung zum Zeitpunkt t₁ mittels Monte Carlo Simulation (MCS)
Bsp.: Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie mit Skalierung der <u>degressiven</u> Masterfunktion auf Netzebene auf Basis einer Zustandserfassung von zur gleichen Zeit gebauten Anlagen (Monte Carlo Simulation) mit Darstellung der diskretisierten Zustandsverteilung

Ausgehend von einer Ausfallsverteilung $\mathcal{N}(35, 10, 5^2)$ wird für 40.000 fiktive, zur selben Zeit gebaute Abschnitte eine Lebensdauer anhand von Zufallszahlen erzeugt. Mit der Masterfunktion $f(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{-1} \beta_2$ und $\beta_0 = 0$; $\beta_2 = 0.5$ wird für alle Abschnitte der Zustand zu $t_1 = 7$ ermittelt. Auf dieser Basis soll eine Zustandsprognose bzw. –retrognose samt Ausfalls- und Altersverteilung mittels vertikaler und horizontaler Verschiebung sowie Skalierung erfolgen. Zusätzlich soll der Zustand anhand von 10 diskreten Zustandsklassen (Klassenbreite jeweils 10%) + Ausfälle zu ausgewählten Zeitpunkten t = 7/14/21/28/35 dargestellt werden. Der 95%-Konfidenzintervall ist auf Basis der aus der Simulation berechneten Werte zu ermitteln (Prognosestreifen Sim). Die durchschnittliche Schädigung ist als Mittelwert von den Zuständen aller Abschnitte zu t zu berechnen (und fällt bei schiefer Zustandsverteilung nicht mit der Masterfunktion = Medianwerte zusammen).



Abbildung 48: Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung einer degressiven Masterfunktion anhand einer Monte Carlo Simulation mit resultierender Alters- und Ausfallsverteilung

Bsp.: Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie mit Skalierung der <u>linearen</u> Masterfunktion auf Netzebene auf Basis einer Zustandserfassung von zur gleichen Zeit gebauten Anlagen (Monte Carlo Simulation) mit Darstellung der diskretisierten Zustandsverteilung

Ausgehend von einer Ausfallsverteilung $\mathcal{N}(35, 10, 5^2)$ wird für 40.000 fiktive, zur selben Zeit gebaute Abschnitte eine Lebensdauer anhand von Zufallszahlen erzeugt. Mit der Masterfunktion $f(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{-} \beta_2$ und $\beta_0 = 0$; $\beta_2 = 1, 0$ wird für alle Abschnitte der Zustand zu $t_1 = 7$ ermittelt. Auf dieser Basis soll eine Zustandsprognose bzw. –retrognose samt Ausfalls- und Altersverteilung mittels vertikaler und horizontaler Verschiebung sowie Skalierung erfolgen. Zusätzlich soll der Zustand anhand von 10 diskreten Zustandsklassen (Klassenbreite jeweils 10%) + Ausfälle zu ausgewählten Zeitpunkten t = 7/14/21/28/35 dargestellt werden. Der 95%-Konfidenzintervall ist auf Basis der aus der Simulation berechneten Werte zu ermitteln (Prognosestreifen Sim). Die durchschnittliche Schädigung ist als Mittelwert von den Zuständen aller Abschnitte zu t zu berechnen (und fällt bei schiefer Zustandsverteilung nicht mit der Masterfunktion = Medianwerte zusammen).



Abbildung 49: Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung einer linearen Masterfunktion anhand einer Monte Carlo Simulation mit resultierender Alters- und Ausfallsverteilung

Bsp.: Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie mit Skalierung der <u>progressiven</u> Masterfunktion auf Netzebene auf Basis einer Zustandserfassung von zur gleichen Zeit gebauten Anlagen (Monte Carlo Simulation) mit Darstellung der diskretisierten Zustandsverteilung

Ausgehend von einer Ausfallsverteilung $\mathcal{N}(35, 10, 5^2)$ wird für 40.000 fiktive, zur selben Zeit gebaute Abschnitte eine Lebensdauer anhand von Zufallszahlen erzeugt. Mit der Masterfunktion $f(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\Lambda} \beta_2$ und $\beta_0 = 0$; $\beta_2 = 2, 0$ wird für alle Abschnitte der Zustand zu $t_1 = 7$ ermittelt. Auf dieser Basis soll eine Zustandsprognose bzw. –retrognose samt Ausfalls- und Altersverteilung mittels vertikaler und horizontaler Verschiebung sowie Skalierung erfolgen. Zusätzlich soll der Zustand anhand von 10 diskreten Zustandsklassen (Klassenbreite jeweils 10%) + Ausfälle zu ausgewählten Zeitpunkten t=7/14/21/28/35 dargestellt werden. Der 95%-Konfidenzintervall ist auf Basis der aus der Simulation berechneten Werte zu ermitteln (Prognosestreifen Sim). Die durchschnittliche Schädigung ist als Mittelwert von den Zuständen aller Abschnitte zu t zu berechnen (und fällt bei schiefer Zustandsverteilung nicht mit der Masterfunktion = Medianwerte zusammen).



Abbildung 50: Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung einer progressiven Masterfunktion anhand einer Monte Carlo Simulation mit resultierender Alters- und Ausfallsverteilung

Bsp. (Teil 1): Stochastische Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten auf Basis von zwei Erfassungen von zur gleichen Zeit gebauten Anlagen mit progressiver Zustandsentwicklung und Einfluss der Breite des Beobachtungsintervalls $\Delta t = t_2 - t_1$ (Monte Carlo Simulation)

Ausgehend von einer Ausfallsverteilung $\mathcal{N}(35, 10, 5^2)$ wird für 40.000 fiktive, zur selben Zeit gebaute Abschnitte eine Lebensdauer anhand von Zufallszahlen erzeugt. Mit der Masterfunktion $f(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^{\alpha} \beta_2$ und $\beta_0 = 0$; $\beta_2 = 2,0$ wird für alle Abschnitte der Zustand zu $t_1 = 7$ und $t_2 = 8/10,5/14$ ermittelt. Auf Basis von jeweils zwei Erfassungen mit unterschiedlicher Breite des Erfassungsintervalls (1/3,5/7 Jahre) soll eine Zustandsprognose mittels homogener Markov-Ketten erfolgen. Zusätzlich soll der Zustand anhand von 10 diskreten Zustandsklassen (Klassenbreite jeweils 10%) + Ausfälle zu ausgewählten Zeitpunkten t=7/14/21/28/35 dargestellt werden. Die durchschnittliche Schädigung kann vereinfacht durch Multiplikation des jeweiligen Anteils der Anlagen in einem diskreten Zustand mit der entsprechenden Note ermittelt werden. Anhand der gewählten Normierungsfunktion kann die zu t berechnete Ø Note in ein Schadensausmaß umgerechnet werden.



Abbildung 51: Einfluss der Breite des Beobachtungsintervalls bei der stochastischen Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten anhand einer Monte Carlo Simulation (Teil 1)

Bsp. (Teil 2): Stochastische Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten auf Basis von zwei Erfassungen von zur gleichen Zeit gebauten Anlagen mit progressiver Zustandsentwicklung und Einfluss der Dimension der Transitionsmatrix n×n sowie Lage des Beobachtungsintervalls t₁ (Monte Carlo Sim.)

Ausgehend von einer Ausfallsverteilung $\mathcal{N}(35, 10, 5^2)$ wird für 40.000 fiktive zur selben Zeit gebaute Abschnitte eine Lebensdauer anhand von Zufallszahlen erzeugt. Mit der Masterfunktion $f(t) = \beta_0 + \beta_1 * t^* \beta_2$ und $\beta_0 = 0$; $\beta_2 = 2,0$ wird für alle Abschnitte der Zustand zu t = 7/14/21/28 ermittelt. Auf Basis von jeweils zwei Erfassungen soll eine Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten erfolgen. Als Ausgangszustand werden verschiedene Zeitpunkte (t = 7/14/21) bei gleich langen Beobachtungsintervallen ($\Delta t = 7$ Jahre) gewählt. Die Berechnung soll einmal mit 5 (Klassenbreite 25%) und einmal mit 10 (Klassenbreite 12,5%) diskreten Zuständen erfolgen, was verschiedene Dimensionen der Transitionsmatrix erfordert.



Ausgewählte Ergebnisse und Kommentar:

- Singuläre Matrizen sind nicht invertierbar → eine Retrognose ist nicht möglich. Eine Matrix ist singulär, wenn ihre Determinante Null ist. Die Determinante einer Dreiecksmatrix ist das Produkt ihrer Hauptdiagonalelemente. Ist ein Element der Hauptdiagonale gleich Null, dann ist die Transitionsmatrix nicht invertierbar, die Berechnung von Jahresmatrizen nicht möglich
- Mit Verfeinerung der Klasseneinteilung (5×5) → (10×10) nimmt die Wahrscheinlichkeit eines Klassenwechsels zu; die geschätzte Lebensdauer hat in der Regel einen niedrigen Wert
- Klasseneinteilung soll in Abhängigkeit von der Messgenauigkeit, Erfassungsart (visuell/messtechnisch) und von der technischen Anwendbarkeit der Maßnamen möglicherweise so durchgeführt werden, dass alle Klassen ungefähr gleich dicht besetzt sind
- Die Lage des Beobachtungsintervalls im Vergleich zu Lebensdauer hat wesentlichen Einfluss auf die Zustandsprognose, besonders wenn alle Abschnitten zur selben Zeit gebaut sind. Je nachdem im welchen Teil der Masterfunktion das Erfassungsintervall hineinfällt, kann es zur Überschätzung bzw. Unterschätzung der durchschnittlichen Lebensdauer
- Die Übergangswahrscheinlichkeiten im Beispiel werden als Verhältnis der Übergänge von Zustand i in Zustand j zu allen Übergängen aus Zustand i berechnet. Alternativ kann die Berechnung mit der Methode der kleinsten Quadrate (OLS) erfolgen. Das Ergebniss (nicht dargestellt) zeigt eine Abweichung von den hier berechneten Transitionsmatrizen und ist zudem nicht eindeutig, weil das resultierende Gleichungssystem unterbestimmt ist (14 unbekannte Wahrscheinlichkeiten und 5 Gleichungen im Fall von 5×5 Matrix).

Abbildung 52: Einfluss der Feinheit der Diskretisierung und der Lage des Beobachtungsintervalls bei der stochastischen Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten anhand einer Monte Carlo Simulation (Teil 2)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Straßennetze in den meisten Ländern Europas sind größtenteils ausgebaut, sodass die Erhaltung gegenüber Neubau immer mehr an Bedeutung gewinnt. Um die Herausforderung bewältigen zu können, eine alternde Straßeninfrastruktur bei knapper werdenden Budgetmittel aufrecht zu erhalten, ist der Einsatz eines Erhaltungsmanagementsystems (EMS) unerlässlich. Das Herzstück eines solchen Systems ist die Zustandsprognose, die auf einer regelmäßigen Erfassung und Bewertung des Zustandes aufbaut. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die wesentlichen Verfahren zur Zustandserfassung, –bewertung und –prognose aus Österreich, Deutschland und der Schweiz gegenübergestellt werden. Vertiefend wird auf die Anpassung der Prognose auf den Einzelabschnitt eingegangen, wobei bestehende Ansätze kritisch bewertet bzw. weiterentwickelt werden.

Die Erfassung des Straßenzustandes anhand von bestimmten Schadensmerkmalen schafft eine objektive Ausgangsbasis, um Entscheidungen im Rahmen der Maßnahmenplanung zu begründen. Seit Anfang der neunziger Jahre wird der Straßenzustand in Österreich, Deutschland und in der Schweiz bundesweit periodisch erfasst. Die Erfassungsverfahren unterscheiden sich u.a. in der Art und Anzahl der erfassten Schäden und in der Länge der Erfassungsabschnitte. Eine direkte Vergleichbarkeit der ermittelten Zustandsgrößen ist nur in Bezug auf die Spurrinnentiefe gegeben. Während in Österreich und Deutschland der messtechnischen Erfassung den Vorrang gegeben wird, wird diese in der Schweiz nur örtlich bei Bedarf als Ergänzung zu der visuellen Erfassung vorgesehen.

Die Bewertung der Schäden erfolgt in den drei Ländern nach demselben Schema. Die erfassten Schäden werden zuerst über Bewertungshintergrund in Noten umgewandelt und dann zu Teilwerten und zu einem Gesamtwert als Basis für die Maßnahmenoptimierung verknüpft. In der Schweiz werden die Maßnahmen direkt manuell den Schäden zugeordnet, wobei derzeit kein Optimierungsalgorithmus bzw. kein EMS auf das hochrangige Straßennetz zur Anwendung kommt. Die Zusammenfassung von Schäden mit unterschiedlichen Ursachen zu einem Zustandsmerkmal, sowie von verschiedenen Zustandsmerkmalen zu einem Gesamtwert verwischt die Ursachen und erschwert erheblich die Maßnahmenwahl. Die übliche Festlegung von Ausfallsgrenzen auf Basis von Expertenbefragungen oder Häufigkeitsverteilungen ist wissenschaftlich nicht begründet und führt bei nicht unmittelbar sicherheitsrelevanten Merkmalen zu einem unnötigen Verlust an Lebensdauer. Es wird daher empfohlen, Zustandsbewertungen im Wesentlichen nur für die Visualisierung des Zustandes und Identifikation von Problemstellen zu beschränken.

Da die Zustandserfassungen nur eine Momentaufnahme darstellen, ist die Erhaltungsgeschichte dazwischen (Maßnahmen gesetzt Ja/Nein) und die Entwicklung nachher (Zustandsprognose) äußerst wichtig. Die Prognose ist eine mit Unsicherheit behaftete Aussage über Ereignisse, Zustände oder Entwicklungen in der Zukunft. Im deutschsprachigen Raum werden praktisch ausschließlich deterministische Prognosemodelle auf empirischer Basis verwendet, wobei die jeweilige Zustandsfunktion abschnittsweise angepasst wird. Deterministische Modelle beruhen auf der Annahme, dass alle Einflussfaktoren auf die Schädigung bekannt und erfassbar sind und lassen nur einen Prognosezustand je Zeitpunkt zu. Stochastische Modelle hingegen nehmen Rücksicht darauf, dass nie alle Einflüsse oder der Zustand genau erfassbar sind und geben je Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit für die Erreichung eines bestimmten Zustandes.

Zur Beschreibung der Zustandsveränderungen werden Zustandsfunktionen verwendet, die eine funktionale Abhängigkeit zwischen dem Schadensindikator (Ausmaß oder Schwere) und einer oder mehreren Einflussgrößen (erklärende Variablen) darstellen. Die bestehenden Zustandsfunktionen werden mittels Regressionsanalyse auf Basis von Daten aus Zustandserfassungen abgeleitet. Bei allen Modellen ist das Deckschichtalter die entscheidende Einflussgröße. In dem österreichischen PMS werden zusätzlich Dimensionierung, Verkehrsbelastung und Klima berücksichtigt. Diese Faktoren werden jedoch methodisch nicht richtig abgebildet und als Ergebnis ist ihr Einfluss auf die Lebensdauer fast vernachlässigbar. Ferner wurde bei der Ableitung der Zustandsfunktionen keine Rücksicht auf die Zensur der Daten genommen, was eine Überschätzung der Lebensdauer in der Prognose zur Folge hat. Für die Herleitung der Prognosemodelle wurden Informationen aus den ersten Zustandserfassungen verwendet. Eine Aktualisierung auf Basis der nachfolgenden Erfassungen findet entweder nicht statt oder die eingesetzten Updatealgorithmen können nicht eine zwangsläufige Verbesserung der Prognosegenauigkeit garantieren. Die Standardzustandsfunktionen (Masterfunktionen) beschreiben die mittlere Zustandsentwicklung am Netz. Für eine Anwendung auf Abschnittsebene soll die Masterfunktion an die bisherige Entwicklungsgeschichte des Einzelabschnitts entsprechend angepasst werden. Die üblichen Methoden zur Anpassung sind horizontale und vertikale Verschiebung, Skalierung und Regression. Eine Prognose durch horizontale oder vertikale Verschiebung der Masterfunktion in den letzten erfassten Zustand führt zu einer Verzerrung des Ausgangszustandes und der Altersverteilung. Die Prognose auf Basis einer Skalierung erlaubt zumindest theoretisch die Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsgeschichte. Der Anwendungsbereich der Skalierung ist aber gegenüber der Verschiebung beschränkt. Mehrmalige Erfassungen führen bei den erwähnten Methoden zu keiner Erhöhung der Prognosegenauigkeit, da die Verschiebung bzw. Skalierung immer durch den letzten Messwert erfolgt.

Liegt eine Reihe von Messwerten vor, kann die Masterfunktion durch Regression angepasst werden. Dabei werden die Koeffizienten der Regressionsfunktion meistens durch die Methode der Kleinsten Quadrate geschätzt. Mit der Ableitung von Konfidenz- und Prognoseintervallen werden die Grundlagen für den Übergang von einer deterministischen zu einer stochastischen Prognose am Einzelabschnitt geschaffen. Damit kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Zustandes zu jedem Zeitpunkt berechnet werden. Durch die Definition einer Ausfallsgrenze ergibt sich die Ausfallsverteilung. Die Zuverlässigkeit der Prognose steigt mit der Anzahl der berücksichtigten Erfassungen und mit der Abnahme der frei wählbaren Parameter der Funktion. Anhand von einfachen Beispielen wird gezeigt, dass eine zuverlässige Schätzung der Lebensdauer Kenntnis über die Form der Masterfunktion (Schadenscharakteristik) voraussetzt. Übliche Prognoseintervalle berücksichtigen nicht die Unsicherheit bei der Erfassung und Prognose der erklärenden Variable (z.B. Verkehr) und unterschätzen somit die Streuung des prognostizierten Schadens. Ex ante Prognoseintervalle ziehen die stochastische Natur des Regressors in Betracht und werden in der Arbeit mittels Bootstrapping und Monte Carlo Simulation beispielhaft ermittelt.

Die Erweiterung des einfachen Regressionsmodells zu einem multiplen durch die Einbeziehung von mehreren Einflussgrößen hat das Ziel die Prognosekraft des Modells zu erhöhen. Nachdem aber nicht möglich ist, alle relevanten Einflussfaktoren zu berücksichtigen, ist immer mit einem Spezifikationsbias zu rechnen. Am Einzelabschnitt besteht zwischen kumulierten Einflüssen wie Normlastwechsel und Frosttauwechsel und Deckschichtalter ein starker korrelativer Zusammenhang – es liegt Multikollinearität vor. Das Vorhandensein von hoher Multikollinearität beeinträchtigt zwar nicht die Prognose, wohl aber die Trennung des Einflusses der Variablen auf das Ergebnis.

Die homogenen Markov-Ketten sind ein diskretes stochastisches Zustandsprognosemodell, das mathematisch wenig anspruchsvoll ist und zudem keine Annahmen bezüglich Zustandsverlauf und –verteilung erfordert. Aufgrund der konstanten Übergangswahrscheinlichkeiten ist dieser Ansatz für die Modellierung der Lebensdauer von Bauteilen, die einem kontinuierlichen Schädigungsprozess unterliegen, jedoch nicht geeignet. Die aus dem Modell resultierenden Zustandsfunktionen weisen unabhängig von dem jeweiligen Schadenstyp einen linearen Verlauf auf. Die Anwendung auf realen Daten zeigt eine erhebliche Überschätzung der Lebensdauer bzw. Unterschätzung des Investitionsbedarfs.

Die abschließende Gegenüberstellung der betrachteten Prognosemodelle ermöglichte auch die empirische Ableitung von Zustandsfunktion und Ausfallsverteilung für das Merkmal Querrisse auf Basis von LTPP-Daten nach der Methodik von HOFFMANN. Der Zustandsverlauf auf Basis Regression auf Netzebene berücksichtigt nicht die Anzahl von Erfassungen pro Abschnitt, ist anfällig gegen Ausreissern und unterschätzt die Schadensprogressivität im Beispiel. Ausgehend von einem bekannten stochastischen Prozess werden mittels einer MC-Simulation große Abweichungen bei der Prognose auf Basis von horizontaler/vertikaler Verschiebung der Masterfunktion, sowie homogener Markov-Ketten festgestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die Zustandsprognose ohne Maßnahmen behandelt. Um ein vollständiges Bild zu kriegen, sollen zukünftig auch die Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen mit Wirkdauer und Kosten vollständig abgebildet werden, was eine Optimierung des gesamten Lebenszyklus erlauben würde. Die Weiterentwicklung und die empirische Verifizierung der bestehenden Ansätze umfasst die Ermittlung von Zustandsfunktionen und Ausfallsverteilungen für alle Schadensmerkmale, die Berücksichtigung von Aufbau-, Verkehrs- und Klimadaten, sowie die Interaktionen zwischen verschiedenen Schadenstypen in der Prognose.

5 Anhang

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gesamtüberblick der Bausteine und Abläufe eines selbstlernenden systematischen Erhaltungsmanagementsystems nach HOFFMANN	10
Abbildung 2:	Ablauf der Zustandsdatenanalyse von der Erfassung zur Gesamtbewertung des Straßenzustandes	14
Abbildung 3:	Zustandsgrößenermittlung auf Basis von einem erfassten Rissbild (AT, DE und CH)	25
Abbildung 4:	Ausgewählte Besonderheiten des deutschen Zustandsbewertungsansatzes (Straßenoberbau)	34
Abbildung 5:	Gegenüberstellung von Normierungsfunktionen für Spurrinnen in AT, DE und in der CH	39
Abbildung 6:	Ermittlung des gleichen Teilwerts aus völlig unterschiedlichen Schäden bzw. Zustandswerten	40
Abbildung 7:	Vergleich von Normierungsfunktionen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit auf Basis von erfasster Zustandsdaten (Netzebene)	41
Abbildung 8:	Vergleich von Normierungsfunktionen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz für die Schadensmerkmale Spurrinnen und Griffigkeit auf Basis von erfasster Zustandsdaten (Abschnittsebene)	42
Abbildung 9:	Begrenzung der mittleren Lebensdauer des Straßenoberbaus durch die Festlegung von willkürlichen Schwellenwerten	43
Abbildung 10:	Überblick Zustandsprognosemodelle nach der Herleitung	48
Abbildung 11:	Überblick stochastische und deterministische Zustandsentwicklung in diskretem bzw. stetigen Zeit- und Zustandsraum	50
Abbildung 12:	Häufig verwendete Masterfunktionen für Zustandsprognosemodelle für den Straßenoberbau	51
Abbildung 13:	Einfluss des Verkehrs und deterministische Zustandsprognose im österreichischen PMS	52
Abbildung 14:	Ermittlung der Verhaltensklasse und deterministische Prognose im deutschen PMS	55
Abbildung 10:	Gegenüberstellung von Zustandsfunktionen für Spurrinnen in AT, DE und in der CH	60
Abbildung 16:	Erfordernis zur Anpassung von Modellen aufgrund verschiedener Systemeigenschaften	61
Abbildung 17:	Anpassung von stetigen Zustandsprognosemodellen über Verschiebung, Skalierung und Regression der Masterfunktion	62
Abbildung 18:	Anpassung von der Zustandsprognose über vertikale und horizontale Verschiebung bzw. Skalierung der Masterfunktion (Potenz) und resultierende Anlagealter und Ausfallszeitpunkt	63
Abbildung 19:	Konzertration der Ergebnisse bei Anpassung der Prognose über Satz von Verhaltenskurven und vertikale Verschiebung	64
Abbildung 20:	Ausgewählte Beschränkungen bei der Anpassung der Prognose auf den Einzelabschnitt über Skalierung der Masterfunktion	65
Abbildung 21:	Deterministische Zustandsprognose aus Anpassung einer Masterfunktion über vertikale und horizontale Verschiebung bzw. Skalierung und Vergleich mit nicht linearer Regression auf den Einzelabschnitt	66
Abbildung 22:	Einfluss von Datenmenge, Varianz des Regressors, Parameteranzahl und S.E. der Regression auf die Breite des Konfidenz- und Prognoseintervalls	68
Abbildung 23:	Zustandsprognose mittels bivariater nichtlinearer Regression über Alter und kumulative Verkehrsbelastung am Einzelabschnitt	69
Abbildung 24:	Stochastische Zustandsprognose mittels bivariater Regression auf Basis von erfassten Zustandsdaten am Einzelabschnitt	70
Abbildung 25:	Zustandsprognose mit Anpassung einer degressiven Masterfunktion mit Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung	71
Abbildung 26:	Zustandsprognose mit Anpassung einer degressiven Masterfunktion ohne Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung	72
Abbildung 27:	Zustandsprognose mit Anpassung einer linearen Masterfunktion mit Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung	73

Abbildung 28:	Zustandsprognose mit Anpassung einer linearen Masterfunktion ohne Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung	74
Abbildung 29:	Zustandsprognose mit Anpassung einer progressiven Masterfunktion mit Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung	75
Abbildung 30:	Zustandsprognose mit Anpassung einer progressiven Masterfunktion ohne Interzept mittels bivariater Regression an erfasste Zustände mit resultierendem Konfidenzintervall, Ausfalls- und Zustandsverteilung	76
Abbildung 31:	Zustandsprognose mit Anpassung einer Zustandsfunktion ("best fit") mittels bivariater Regression an erfasste Zustände	77
Abbildung 32:	Kurzüberblick Monte Carlo Simulation und Bootstrapping in Regressionsmodellen	78
Abbildung 33:	Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Prognose der unabhängigen Variable in das Prognoseintervall der abhängigen Variable mittels Bootstrapping und Monte Carlo Simulation am Einzelabschnitt	79
Abbildung 34:	Zusammenhänge zwischen 2,3 und 4 Variablen am Beispiel von linearer Funktion und diskreten Zustandsklassen	82
Abbildung 35:	Zeitlicher Verlauf und Streuung der Werte von Frostindex und Lastverkehrsstärke (JDTLV)	84
Abbildung 36:	Deterministische Zustandsprognose mit Konfidenz- und Prognoseintervallen und Auswirkungen einer Fehlspezifikation	87
Abbildung 37:	Deterministische Prognose auf Basis von Zustandserfassungen, struktureller und klimatischer Daten mittels bivariater/multipler Regression am Teil des Netzes (Teil 1)	90
Abbildung 38:	Deterministische Zustandsprognose bei Vorhandensein von hoher Multikollinearität am Einzelabschnitt	91
Abbildung 39:	Multiple lineare Regression mit unterschiedlichem Ausmaß an Kollinearität, Darstellung in VENN	93
Abbildung 40:	Querschnitts-, Zeitreihen-, gepoolte Querschnitts- und Paneldatenauszüge aus der LTTP-Datenbank	96
Abbildung 41:	Ausgewählte Fälle zensierter Zustandsdaten von Anlagen mit/ohne Maßnahmen & periodischer Erfassung	97
Abbildung 42:	Graphische Darstellung von Realisierungen einer homogenen und einer inhomogenen Markov-Kette sowie eines Semi-Markov-Prozesses.	99
Abbildung 43:	Stochastische Zustandsprognose mittels homogener Markov-Ketten für verschiedene Schäden an Asphaltdecken auf Basis der visuellen Zustandserfassungen 2008 und 2012 im Land Steiermark (Teil 1)	101
Abbildung 44:	Stochastische Zustandsprognose mittels homogener Markov-Ketten für verschiedene Schäden an Asphaltdecken auf Basis der visuellen Zustandserfassungen 2008 und 2012 im Land Steiermark (Teil 2)	102
Abbildung 45:	Vergleich von Zustandsprognosemodellen für Querrisse auf Netzebene auf Basis von Paneldaten mittels bivariater Regression, Markov-Ketten und Hoffmann-Modell (Teil 1)	105
Abbildung 46:	Vergleich von Zustandsprognosemodellen für Querrisse auf Netzebene auf Basis von Paneldaten mittels Aufsummieren der auf den Einzelabschnitt angepassten Prognosen (Teil 2)	106
Abbildung 47:	Zustandsprognose mit Skalierung bzw. vertikaler/horizontaler Verschiebung auf Basis einer gegebenen stochastischen Zustandsverteilung zum Zeitpunkt t1 mittels Monte Carlo Simulation (MCS)	108
Abbildung 48:	Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung einer degressiven Masterfunktion anhand einer Monte Carlo Simulation mit resultierender Alters- und Ausfallsverteilung	109
Abbildung 49:	Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung einer linearen Masterfunktion anhand einer Monte Carlo Simulation mit resultierender Alters- und Ausfallsverteilung	110
Abbildung 50:	Deterministische Zustandsprognose mit vertikaler & horizontaler Verschiebung sowie Skalierung einer progressiven Masterfunktion anhand einer Monte Carlo Simulation mit resultierender Alters- und Ausfallsverteilung	111
Abbildung 51:	Einfluss der Breite des Beobachtungsintervalls bei der stochastischen Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten anhand einer Monte Carlo Simulation (Teil 1)	112
Abbildung 52:	Einfluss der Feinheit der Diskretisierung und der Lage des Beobachtungsintervalls bei der stochastischen Zustandsprognose mit homogenen Markov-Ketten anhand einer Monte Carlo Simulation (Teil 2)	113

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erfasste Schadensmerkmale im Rahmen der Zustandserfassung in Österreich (System VIAPMS)	17
Tabelle 2:	Erfasste Schadensmerkmale im Rahmen der Zustandserfassung des Straßenoberbaus in Deutschland	20
Tabelle 3:	Erfasste Schadensmerkmale im Rahmen der Zustandserfassung des Straßenoberbaus in der Schweiz	23
Tabelle 4:	Standardmessverfahren und -geräte zur Erfassung der Griffigkeit & Längsebenheit in AT, DE und CH	26
Tabelle 5:	Standardmessverfahren und -geräte zur Erfassung der Tragfähigkeit & Querebenheit in AT, DE und CH	27
Tabelle 6:	Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in Österreich (System VIAPMS)	31
Tabelle 7:	Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in Deutschland	35
Tabelle 8:	Zustandsbewertungsansatz für den Straßenoberbau in der Schweiz	38
Tabelle 9:	Bestehende Ausfallskriterien (auch: Schwellenwerte o. Auslösewerte) für Asphaltdecken von Straßen des Hauptverkehrsnetzes in verschieden Ländern	44
Tabelle 10:	Gegenüberstellung von deterministischen und stochastischen Modellen	49
Tabelle 11:	Verwendete Zustandsfunktionen für den Straßenoberbau in Österreich (System VIAPMS)	54
Tabelle 12:	Derzeit verwendete Zustandsfunktionen im deutschen PMS-Modell	57
Tabelle 13:	Erste Zusammenstellung von Zustandsfunktionen für den Straßenoberbau in der Schweiz	59
Tabelle 14:	Vergleich der abgeleiteten Zustandsfunktionen für Prognose in PMS (AT, DE und CH)	60
Tabelle 15:	Kurzzusammenfassung der einfachen linearen Regression	80
Tabelle 16:	Kurzzusammenfassung Methoden: Kleinste Quadrate (OLS) und Maximum-Likelihood (MLE)	81
Tabelle 17:	Ausgewählte Funktionsformen im multiplen Regressionsmodell	88
Tabelle 18:	Kurzzusammenfassung der multiplen Regression und Berechnung der Korrelationsmatrix	94
Tabelle 19:	Ausgewählte Tests im multiplen Regressionsmodell	95
Tabelle 20:	Homogene zeitdiskrete und zeitstetige Markov-Ketten in der Übersicht	103
Tabelle 21:	Übersicht des stochastischen Zustandsprognosemodelles von HOFFMANN	107

5.3 Literaturverzeichnis

5.3.1 Fachbücher, Artikel, wissenschaftliche Berichte und Dissertationen

- ARMSTRONG, J.S. (2001); Standards and Practices for Forecasting; Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- ASFINAG (2010;2012); Geschäftsbericht 2010; Geschäftsbericht 2012; Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, Wien
- ASTRA (2013); Strassen und Verkehr 2013 Zahlen und Fakten; Jährliche Publikation des Bundesamtes für Strassen, Bern
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (2011a); *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung;* 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B. & WEIBER, R. (2011b); Fortgeschrittene Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung; 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- BÄR, H., LINDENMANN, H. & KÄLIN, E. (2014); Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustandes; Forschungsprojekt VSS 2010/701, Schriftenreihe 1466, UVEK, Bern
- BECKEDAHL, H.-J. (2010); Schlagloch/Straßenerhaltung: Handbuch Straßenbau (Band 1); Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg
- BFS (2013); Strassenrechnung der Schweiz 2011; Bundesamt für Statistik, Neuenburg
- BLAB, R. (2001); Analytische Methoden zur Modellierung der Verformungseigenschaften flexibler Fahrbahnaufbauten; Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Heft 11, Wien
- BLAB, R. (2012); Konstruktiver Straßenbau; Skriptum LVA 233.038 an der TU Wien
- BLAB, R. (2013); *Performance-based asphalt mix and pavement design;* Romanian Journal of Transport Infrastructure, Vol.2, No.1, Technical University of Civil Engineering, CONSPRESS Publishing House
- BMVBS (2007-2013); Straβenbaubericht 2007; Verkehrsinvestitionsbericht 2008; Verkehrsinvestitionsbericht 2009; Verkehrsinvestitionsbericht 2010; Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2010; Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2011; Unterrichtung durch die Bundesregierung, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BORTZ, J.& SCHUSTER, CH. (2010); Statistik für Human- und Sozialwissenschaften; 7. Auflage, Springer-Verlag
- BRABER, R. (2008); Ungenügender Fahrkomfort trotz erfüllten Normalanforderungen: Längsebenheitsmessungen neue Erkenntnisse; Strasse und Verkehr, Vol.94, Nr.11, VSS, Zürich
- BROWN, B.L., HENDRIX, S.B., HEDGES, D.W. & SMITH, T.B. (2012); *Multivariate Analysis for the Biobehavioral and Social Sciences: A Graphical Approach;* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- BÜHLMANN, F. (1983); *Beurteilung der Griffigkeit auf Fahrbahnen;* Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der ETH Zürich, Forschungsauftrag des EDI Nr. 20/76, Schlussbericht, Zürich
- BUTT, A.A., SHAHIN, M.Y., CARPENTER, S.H. & CARNAHAN, J.V. (1994); Application of Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level; Proceedings of the 3rd International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Texas
- CAMERON, A.C. & TRIVEDI, P.K. (2005); *Microeconometrics: Methods and Applications;* Cambridge University Press, New York
- CANZLER, U. & WINKLER, B. (2011); Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft 67, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach
- CASSANDRAS, C.G. & LAFORTUNE, S. (2008); Introduction to Discrete Event Systems; 2nd Edition, Springer, New York
- COST 354 WP 2 (2007); Peformance Indicators for Road Pavements WP 2: Selection and Assessment of Individual Performance Indicators; Report
- CHAKAR, T. (2010); Methode zur Klassifizierung von Tragfähigkeitsmessergebnissen des Falling Weight Deflectometers bei Asphaltbefestigungen; Dissertation, ausgeführt am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- DO, M.-T. & ROE, P. (2008); *Report on the state-of-the-art of test methods;* Deliverable D04, European Project TYROSAFE (Tyre and Road Surface Optimization for Skid Resistance and Further Effects), Brussels
- DURRETT, R. (2012); Essentials of Stochastic Processes; 2nd Edition, Springer
- FASTRICH, A. (2011); Entwicklung, Bewertung und Optimierung von lebenszyklusorientierten Erhaltungsstrategien im Strassenunterhalt; Dissertation, ausgeführt am Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement, ETH Zürich, Zürich
- FELDSTEIN, M.S. (1971); The Error of Forecast in Econometric Models when the Forecast-period Exogenous Variable is Stochastic; Econometrica, Vol.39, No.1

- FRUHMANN, G. & MAURER, P. (2005); *Die Ebenheit von Fahrbahndecken ein wesentlicher Nutzerkomfort*; Heft 62 Internationale Fachtagung 2005 "Betondecken aus volkswirtschaftlicher Sicht"
- FU, G. & DEVARAJ, D. (2014); *Bridge Management Using Points and Improved Concepts;* Bridge Engineering Handbook, 2nd Edition, Construction and Maintenance, Taylor and Francis Group, Boca Raton
- GOLKOWSKI, G. (2003); Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft 31, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach
- GREENE, W.H. (2012); Econometric Analysis; 7th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- GRUBER, J. & MAURER, P. (2004); Zustandserfassung der Straßenoberfläche auf Bundesstraßen B: Messungen mit dem RoadSTAR in den Jahren 2001 und 2002; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 542, Wien
- HAIDER, S.W., CHATTI, K. & BALADI, G. (2012); Long-Term Pavement Performance Effectiveness of Preventive Maintenance Treatments Using Markov Chain Algorithm; Engineering Journal, Volume 16, Issue 6
- HAMILTON, J.D. (1994); *Time Series Analysis*; 1st Edition, Princeton University Press, New Jersey
- HÅNDBOK R610 (2014); Standard for drift og vedlikehold av riksveger; Statens vegvesen
- HANDL, A. (2002); Multivariate Analysemethoden: Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-Plus; Springer-Verlag, Heidelberg
- HANGOS, K.M. & CAMERON, I.T. (2001); Process Modeling and Model Analysis; Academic Press, London
- HARBAUGH, J.W. (1964); A Computer Method for Four-Variable Trend Analysis Illustrated by a Study of Oil-Gravity Variations in Southeastern Kansas; Kansas Geological Survey, Bulletin 171
- HARTUNG, J., ELPELT, B. & KLÖSNER, K.-H. (2009); *Statistik Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik;* 15. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München
- HARVEY, A.C. (1993); Time Series Models; 2nd Edition, The MIT Press
- HAYTER, A. (2012); Probability and Statistics for Engineers and Scientists; 4th Edition, Brooks/Cole, Cengage Learning
- HOFFMANN, M. (2006); Instandsetzung von Strassen ein Beitrag zur Lebenszykluskostenrechnung und effizienten Instandsetzungsstrategien für Landes- und Gemeindestrassen; TU Graz
- HOFFMANN, M. & BLAB, R. (2012); A standardized life-cycle costing framework for flexible and rigid pavements in Austria; Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, published by: IALCCE 2012, Taylor and Francis Group, London
- HOFFMANN, M. (2013a); Erhaltungsmanagement von Straßen; Skriptum LVA 233.043 an der TU Wien
- HOFFMANN, M. (2013b); Straßenplanung und -projektierung; Skriptum LVA 233.039 an der TU Wien
- HOFFMANN, M. (2013c); Advanced probabilistic life cycle costing algorithm in Pavement Management; 5th EATA Conference 2013, Braunschweig, 3rd to 5th of June 2013 (withdrawn)
- HOFFMANN, M. (2014); Lebenszykluskosten von Straßenanlagen Ansätze zur Optimierung von Investitionsstrategien und technischen Maßnahmen, Bau- und Betriebsweisen für Straßenanlagen in ihrem Lebenszyklus; Habilitationsmanuskript, Stand 06/2012, Wien
- HOFFMANN, M. & DONEV, V. (2014); *Probabilistic modeling of flexible pavement performance and LCC-based service lives with failure distributions;* Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, published by: IALCCE 2014, Taylor and Francis Group, London (accepted)
- HOWARD, R.A. (1971); Dynamic Probabilistic Systems, Volume II: Semi-Markov and Decision Processes; John Wiley & Sons Inc., New York
- HUSCHECK, S. (1997); Anforderungen an die Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen; Bitumen, Jg. 59, Heft 4
- JACKMAN, S. (2009); Bayesian Analysis for the Social Sciences; 1st Edition, John Wiley & Sons, West Sussex, UK
- JACOT, A. (2009); Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen; Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert; Forschungsauftrag VSS 2004/713, EP 3, Schriftenreihe 1246, UVEK, Bern
- JACOT, A., BRABER, R. & v. LOEBEN, W.-H. (2012); Grundlagen zur Revision der Normen über die Messung und Beurteilung der Fahrbahnebenheit (Französisch); Forschungsauftrag VSS 2004/703, Schriftenreihe 1385, UVEK, Bern
- JACOT, A., LINDENMANN, H. & SEILER, L. (2007); Grundlagen zur Revision der Griffigkeitsnormen; Forschungsauftrag VSS 1998/298, Schriftenreihe 1202, UVEK, Bern
- JOHNSON, R.A. & WICHERN, D.W. (2007); *Applied Multivariate Statistical Analysis;* 6th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey

KENNEDY, P. (2003); A Guide to Econometrics; 5th Edition, MPG Books, Bodmin,. Cornwall, United Kingdom

- KLEINBAUM, D.G. & KLEIN, M. (2012); Survival Analysis A Self Learning Text; 3rd Edition, Springer, New York
- KLUGER-EIGL, W. (2009); Entwicklung eines Bewertungshintergrundes für das Griffigkeitsmesssystem Griptester in Österreich; Dissertation, ausgeführt am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Wien
- KNEPPER, S. (2001); *Development of Pavement Management System in Germany*; 5th International Conference on Managing Pavements, Seattle, Washington
- KOBAYASHI, K., DO, M. & HAN, D. (2010); Estimation of Markovian Transition Probabilities for Pavement Deterioration Forecasting; KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 14, Issue 3
- KRAUSE, G. & MAERSCHALK, G. (2010); Auswertung von Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung des Pavement Management Systems (PMS); Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1037, Bonn
- KRAUSE, G. (2001); Systematische Straßenerhaltung und Pavement-Management-System (Vorlesung, Teile 1 und 2); SEP Maerschalk, München
- KUNISCH, B. (2006); Aufnahmeverfahren und Bewertungsmethoden der Längsebenheit von Straßen; Diplomarbeit, ausgeführt am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Wien
- LI, Y.-F., ZIO, E. & LIN, Y.-H. (2014); Methods of Solutions of Homogeneous Continuous Time Markov Chains for Degradation Process Modeling; Applied Reliability Engineering and Risk Analysis: Probabilistic Models and Statistical Inference, 1st Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex
- LI, Z. (2005); A Probabilistic and Adaptive Approach to Modeling Performance of Pavement Infrastructure; Dissertation, University of Texas at Austin
- LINDENMANN, H., BAUMGARTNER, F., JACOT, A. & KÄLIN, E. (2010); Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Straßengriffigkeit; Forschungsauftrag VSS 2005/702, Schriftenreihe 1366, UVEK, Bern
- MADANAT, S. & MASER, K. (2001); *Pavement Evaluation Using Integrated Data from High-speed Sensors;* Final Report of Contract 65A0048, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, California
- MADANAT, S., NAKAT, Z., FARSHIDI, F., SATHAYE, N. & HARVEY, J. (2005); *Development of Empirical-Mechanistic Pavement Performance Models Using Data from the Washington State PMS Database*; Research Report UCPRC-RR-2005-05, University of California Pavement Research, Davis & Berkeley, California
- MAERSCHALK, G. (1997); Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 751, Bonn - Bad Godesberg
- MAERSCHALK, G. (2000); Erstanwendung eines Pavement Management Systems (PMS); VSVI-Vortragsveranstaltung "Management der Straßenerhaltung", Friedberg
- MAERSCHALK, G. & SOCINA, M. (2008); Weiterentwicklung der Bewertung des Pavement Management Systems (PMS) um ein Verfahren für die Umsetzung von Qualitätszielen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1001, Bonn
- MAERSCHALK, G., UECKERMANN, A. & HELLER, S. (2011); Längsebenheitsauswerteverfahren "Bewertetes Längsprofil": Weiterentwicklung der Längsebenheitsbewertung der Zustandserfassung und –bewertung; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft 73, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach
- MAURER, P. (2007); Aspekte der Fahrbahngriffigkeit und ihr Einfluss auf erreichbare PKW-Bremsverzögerungen; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 564, Wien
- MCCULLOUGH, B.D. (1996); Consistent Forecast Intervals when the Forecast-period Exogenous Variables are Stochastic; Journal of Forecasting, Volume 15, Issue 4
- MCCULLOUGH, B.D. & VINOD, H.D. (1998); *Implementing the Double Bootstrap*; Computational Economics, Volume 12, Issue 1
- MOLZER, C. & LITZKA, J. (1997); Auswertung und Analyse der Zustandserfassung 1995 österreichisches Bundesstraßennetz; Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Heft 8, Wien
- MOLZER, C., FELSENSTEIN, K., VIERTL, R., LITZKA, J. & VYCUDIL, A. (2000); *Statistische Methoden zur Auswertung* von Straßenzustandsdaten; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 499, Wien
- MOLZER, C., FELSENSTEIN, K., VYCUDIL, A., LITZKA, J. & SIMANEK, P. (2002); Statistische Auswertung der Zustandsdaten der visuellen Zustandserfassung 2000 auf den B-Straßen des österreichischen Bundesstraßennetzes; Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Endbericht (unveröffentlicht)
- MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G.C. (2014); Applied statistics and probability for engineers; 6th Edition, John Wiley & Sons, New York
- MOROSIUK, G., RILEY, M.J & ODOKI J.B. (2004); *Modelling Road Deterioration and Works Effects in HDM-4*; The Highway Development and Management Series, Vol. 6, ISOHDM Technical Secretariat, University of Birmingham

- NAKAT, Z., MADANAT, S., FARSHIDI, F. & HARVEY, J. (2006); *Development of an Empirical-Mechanistic Model of Overlay Crack Progression using Data from the Washington State PMS Database*; Research Report UCPRC-RR-2006-15, University of California Pavement Research Center, Davis & Berkeley, California
- NG, S.-K. & MOSES, F. (1998); *Bridge deterioration modeling using semi-Markov theory;* Structural Safety and Reliability: Proceedings of ICOSSAR '97- Vol.1, A.A.Balkema, Rotterdam
- NORRIS, J.R. (1997); Markov Chains; Cambridge University Press, Cambridge
- OECD (2005); *Economic Evaluation of Long-Life Pavements, Phase 1*; Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD Publishing, Paris
- OH, S., MADANAT, S., RAGLAND, D. & CHAN, C-Y. (2010); *Evaluation of Traffic and Environment Effects on Skid Resistance in California*; 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper # 10-2830, National Research Council, Washington, DC
- PROZZI, J.A. (2001); *Modeling pavement performance by combining field and experimental data;* PhD dissertation, University of California, Berkeley, California
- RAFI, A., SCAZZIGA, I. & LINDENMANN, H. (2006); Erhaltungsmanagement: Gesamtbewertung der Fahrbahnen, Substanzund Gebrauchswert; Forschungsauftrag VSS 2000/544, Schriftenreihe 1141, UVEK, Bern
- REDDY, T.A. (2011); Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists; Springer-Verlag, New York
- RENCHER, A.C. (2002); Methods of multivariate analysis; 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York
- ROSS, S.M. (2014); Introduction to probability models; 11th Edition, Academic Press
- SAYERS, M.W. & KARAMIHAS, S.M. (1998); The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles; University of Michigan, Michigan
- SCAZZIGA, I. (1997); Erfahrungsbilanz in der Anwendung der Norm SN 640 925; Ausarbeitung der Grundlagen für eine Anpassung der Gewichtungen und der Bewertungsskala; Forschungsauftrag VSS 09/95, Schriftenreihe 392
- SCAZZIGA, I. (2000); Evaluation des Strassenzustandes; Forschungsauftrag VSS 12/99, Schriftenreihe 1040, UVEK, Bern
- SCAZZIGA, I. (2008); Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Schadensprozesse und Zustandsverläufe; Forschungsauftrag VSS 2004/712 inkl. VSS 2004/716, EP 2, Schriftenreihe 1304, UVEK, Bern
- SCHMUCK, A. (1987); Straßenerhaltung mit System, Grundlagen des Managements; Kirschbaum Verlag, Bonn
- SCHNEEBERGER, U. (2013); Stand der Fachapplikationen; Bundesamt für Strassen ASTRA: MISTRA News 15, UVEK, Bern
- SOCINA, M. (2007); Erweiterung der Nutzung von Straßenzustandsdaten in der Systematischen Straßenerhaltung; Dissertation, ausgeführt am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Wien
- STEINAUER, B. (1992); Vergleich stochastischer und periodischer Unebenheiten in Bezug auf Fahrkomfort; Bitumen, Jg. 54, Heft 1
- STEINAUER, B., UECKERMANN, A. & MAERSCHALK, G. (2006); Anlyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau, Heft 46, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach
- STEWART, W.J. (2009); Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modeling; Princeton University Press, New Jersey
- STOCK, J.H. & WATSON, M.W. (2006); Introduction to Econometrics; 2nd Edition, Pearson Addison Wesley, Boston, MA
- STOCKER, H. (2014); *Einführung in die angewandte Ökonmetrie*; Manuskript zur Vorlesung "Methoden der Empirischen Wirtschaftsforschung", Universität Innsbruck, Innsbruck
- STUDENMUND, A.H. (2005); Using Econometrics: A Practical Guide; 5th Edition, Addison Wesley Longman, Boston, MA
- STÜTZE, T. (2004); Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen; Dissertation, ausgeführt am Fakultät für Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Berlin, Berlin
- TIEFENBACHER, H. (2002); Griffigkeitsanforderungen aus der Sicht der Österreichischen Bundesstraßenverwaltung; Tagungsband zum Kolloquium Fahrbahngriffigkeit, Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Heft 13, Wien
- TIMM, D.H. & NEWCOMB, D.E. (2003); Calibration of Flexible Pavement Performance Equations for Minnesota Road Research Project; Transportation Research Record 1853, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- THOMAS, O. (2011); Stochastic Preservation Model for Transportation Infrastructure; Dissertation submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering, Florida State University
- UDDIN, W. (2006); *Pavement Management Systems*; The Handbook of Highway Engineering (Edited by: FWA, T. F.), Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, Florida

- VAN DER SLUIS, S. (2002); Ableitung einer Wechselbeziehung zwischen Griffigkeit, Geschwindigkeit und Haltesichtweite anhand realer Bremsvorgänge; Dissertation, ausgeführt am Fakultät für Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- VELTEN, K. (2009); Mathematical modeling and simulation. Introduction for scientists and engineers; Wiley-VCH-Verlag, Weinheim
- VON QUINTUS, H.L., MALLELA, J. & JIANG, J. (2005); *Expected Service Life and Performance Characteristics of HMA Pavements in LTPP*; Final Report for the Asphalt Pavement Alliance, Texas
- WEIBER, R. & MÜHLHAUS, D. (2014); Strukturgleichungsmodellierung: Eine Anwendungsorientierte Einführung in die Kausalanalyse mit Hilfe von AMOS, SmartPLS und SPSS; 2.Auflage, Springer Gabler, Berlin
- WEIDICH, P. (2009); Die Ermittlung einer Bewertungsskala für das Griffigkeitsmesssystem Grip Tester unter Berücksichtigung der Bewertungsskala des SKM; Dissertation, ausgeführt am Institut für Verkehr, Fachgebiet Straßenwesen, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- WENINGER-VYCUDIL, A. (2001); Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches PMS; Dissertation, ausgeführt am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Wien
- WENINGER-VYCUDIL, A., SIMANEK, P., MOLZER, C. & LITZKA, J. (2004); Actual Researches on the Austrian PMS-Sector; Paper für die 6th International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Australien
- WENINGER-VYCUDIL, A., SIMANEK, P., ROHRINGER, T. & HABERL J. (2009); Handbuch Pavement Management in Österreich 2009; Bundesministerium f
 ür Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 584, Wien

WOOLDRIGE, J. M. (2013); Introductory Econometrics: A Modern Approach; 5th Edition, South-Western, Cengage Learning

WRA (2012); Road Maintenance Review, International Comparison; World Road Association United Kingdom

5.3.2 Technische Regelwerke und Normen

RVS - Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen

RVS 03.08.63 (2008); Oberbaubemessung; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Wien

- RVS 08.16.01 (2010); Anforderungen an Asphaltschichten; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 11.06.63 (1995); Deflektionsmessungen; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 11.06.65 (2002); *Griffigkeitsmessungen mit dem System RoadSTAR*; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene – Verkehr (FSV), Wien
- RVS 11.06.67 (2004); *Querebenheitsmessungen mit dem System RoadSTAR*; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 11.06.68 (2004); Längsebenheitsmessungen mit dem System RoadSTAR; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 11.06.71 (2009); Griffigkeitsmessungen mit dem Griptester; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 13.01.11 (2009); Zustandsbeschreibung und mögliche Schadensursachen von Asphalt- und Betonstraßen; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 13.01.15 (2006); Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr (FSV), Wien
- RVS 13.01.16 (2012); Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken; Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene – Verkehr (FSV), Wien

SN - Schweizerische Normen

- SN 640 320 (2011); Dimensionierung des Straßenaufbaus; Äquivalente Verkehrslast; Schweizerischer Verband der Strassenund Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 324 (2011); Dimensionierung des Straßenaufbaus; Unterbau und Oberbau; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 510b (1985); Griffigkeit; Messverfahren; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich

SN 640 511b (1984); Griffigkeit; Bewertung; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich

- SN 640 520a (1977); *Ebenheit; Prüfung der Geometrie;* Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 521c (2003); *Ebenheit; Qualitätsanforderungen;* Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 733b (1997); Erhaltung von Fahrbahnen; Oberbauverstärkung von Fahrbahnen in bituminöser Bauweise aufgrund von Deflektionsmessungen; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 925b (2003); Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) Zustandserhebung und Indexbewertung; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 925b Anhang (2003); Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) Anleitung zur visuellen Zustandserhebung und Indexbewertung mit dem Schadenkatalog; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 926 (2005); Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 640 904 (2003); Erhaltungsmanagement (EM) Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswerte, inkl. Anhang Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Bestimmung der Substanz- und Gebrauchswerte; Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- SN 670 362a (1991); *Benkelmanbalken; Gerät, Messvorgang und Auswertung;* Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich

Regelwerke in Deutschland

- Arbeitspapier Nr.9/A 1 zur ZEB (2001); Reihe A Auswertung, Abschnitt A 1 Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- Arbeitspapier Nr.9/M 2 zur ZEB (2001); Reihe M Messtechnische Zustandserfassung, Abschnitt M 2 Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortstraßen); Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- E EMI (2012); Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- TP Griff-StB: SKM (2007); Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau; Teil: Messverfahren SKM TP Griff-StB (SKM); Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- ZTV Asphalt-StB 07 (2007); Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- ZTV Beton-StB 07 (2007); Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln
- ZTV ZEB-StB (2006); Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln