

Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

Dissertation

# **Erweiterung der Nutzung von Straßenzustandsdaten in der Systematischen Straßenerhaltung**

Ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der technischen Wissenschaften

Unter Anleitung von  
o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Johann Litzka

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät Bauingenieurwesen

von

**Dipl.-Ing. Mihai Socina**

Matr.Nr. 0327233  
Fakultät Bauingenieurwesen

Darmstadt, am 6. Jänner 2007

Unterschrift: \_\_\_\_\_

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	<b>Aufgabenstellung / Abgrenzung des Untersuchungsbereichs</b>	<b>8</b>
1.2	<b>Vorgehensweise</b>	<b>9</b>
1.3	<b>Datenschutz</b>	<b>10</b>
1.4	<b>Softwareentwicklung</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>Bedeutung der Zustandsdaten im Erhaltungsmanagement</b>	<b>13</b>
2.1	<b>Qualitative Ziele der Zustandsdatennutzung</b>	<b>14</b>
2.2	<b>Einbindung der Zustandsdaten in den Entscheidungsprozess</b>	<b>15</b>
2.3	<b>Entscheidungsebenen</b>	<b>18</b>
2.3.1	Politikebene	20
2.3.2	Netzebene	22
2.3.3	Projektebene	23
<b>3.</b>	<b>Der Prozess der Zustandsdatenanalyse</b>	<b>25</b>
3.1	<b>Teilprozesse und Zwischenergebnisse</b>	<b>26</b>
3.2	<b>Datendichte</b>	<b>28</b>
3.2.1	Erfassungsdichte während der Erfassung und auf Rohdatenebene	29
3.2.2	Abschnitte	30
3.2.3	Teilnetze	32
<b>4.</b>	<b>Zustandsmerkmale und -erfassung</b>	<b>33</b>
4.1	<b>Längsebenheit</b>	<b>34</b>
4.2	<b>Querebenheit</b>	<b>37</b>
4.2.1	Senkrechte Lasersensoren	38
4.2.2	Schräge Lasersensoren	39
4.3	<b>Griffigkeit</b>	<b>40</b>
4.3.1	Blockiertes Rad	42
4.3.2	Konstanter und variabler Bremsschlupf	42
4.3.3	Seitenschlupf	44
4.3.4	Erfassungssysteme	45
4.4	<b>Oberflächenbild</b>	<b>47</b>
4.4.1	Videoaufnahmetechnik und visuelle Auswertung	48
4.4.2	Asphaltmerkmale	49
4.4.3	Betonmerkmale	53
4.5	<b>Textur</b>	<b>57</b>

<b>4.6</b>	<b>Tragfähigkeit</b>	<b>57</b>
<b>5.</b>	<b>Rohdaten und Zustandsgrößenermittlung</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Rohdaten</b>	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>Verfahren zur Ermittlung von Zustandsgrößen</b>	<b>62</b>
5.2.1	Vorgehensweise in Deutschland	63
5.2.2	Vorgehensweise in Österreich	66
<b>6.</b>	<b>Zustandsbewertung</b>	<b>68</b>
<b>6.1</b>	<b>Vorgehensweise in Deutschland</b>	<b>69</b>
6.1.1	Normierung	71
6.1.2	Besonderheiten der Griffigkeit	74
6.1.3	Besonderheiten beim Oberflächenbild der Betonfahrbahnen	75
6.1.4	Besonderheiten der Ortsdurchfahrten	75
6.1.5	Teilwertbildung	78
6.1.6	Gesamtwertbildung	83
<b>6.2</b>	<b>Vorgehensweise in Österreich</b>	<b>84</b>
6.2.1	Normierung	85
6.2.2	Bildung des Substanzwertes	86
6.2.3	Bildung des Gebrauchswerts	89
6.2.4	Gesamtwertbildung	89
<b>6.3</b>	<b>Vergleich der Bewertungsverfahren beider Länder</b>	<b>90</b>
6.3.1	Vergleich der verwendeten Merkmale	90
6.3.2	Vergleich der Normierungsfunktionen	91
6.3.3	Vergleich der Verknüpfungsvorschriften	94
6.3.4	Vergleich der Gesamtwertbildung	94
<b>7.</b>	<b>Nutzung der Zustandsdaten</b>	<b>96</b>
<b>7.1</b>	<b>Zustandsdaten in Pavement Management Systemen</b>	<b>97</b>
<b>7.2</b>	<b>Visualisierung des Zustands</b>	<b>100</b>
7.2.1	Säulendiagramme	103
7.2.2	Summenlinien	109
7.2.3	Zustandskarten	112
7.2.4	Streckenbänder	119
7.2.5	Zusammenfassung	123
<b>7.3</b>	<b>Weitergehende Nutzung der Zustandsdaten</b>	<b>126</b>
<b>8.</b>	<b>Zustandsprognosemodelle</b>	<b>131</b>
<b>8.1</b>	<b>Statistische Grundlagen</b>	<b>131</b>

8.1.1	Stichproben	131
8.1.2	Skalenniveaus	134
8.1.3	Bekannte statistische Kenngrößen	137
8.1.4	Messfehler	141
<b>8.2</b>	<b>Stochastische Grundlagen</b>	<b>142</b>
8.2.1	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	142
8.2.2	Bedingte Wahrscheinlichkeiten	146
8.2.3	Ermittlung diskreter Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus stetigen Verteilungen	148
8.2.4	Markowsche Ketten	149
8.2.5	Übergangswahrscheinlichkeiten	150
8.2.6	Beispielanwendung für stochastische Matrizen	152
8.2.7	Wahrscheinlichkeiten und relative Häufigkeiten	153
<b>8.3</b>	<b>Prognosemodelle</b>	<b>154</b>
8.3.1	Deterministische Prognosemodelle	156
8.3.2	Stochastische Prognosemodelle	158
8.3.3	Zustandsprognosemodell in Deutschland	159
8.3.4	Zustandsprognosemodell in Österreich	162
<b>8.4</b>	<b>Analyse der Prognosemodelle</b>	<b>165</b>
8.4.1	Ermittlung von Übergangshäufigkeiten aus Zustandserfassungen	166
8.4.2	Geeignete Visualisierung der Übergangsmatrizen	171
8.4.3	Ermittlung von Übergangshäufigkeiten aus Prognosemodellen	179
8.4.4	Vergleichsanalyse durch Chi-Quadrat-Test	183
8.4.5	Vergleichsanalyse durch visuelle Darstellung	188
8.4.6	Diskussion: Verbesserung von Zustandsgrößen ohne Maßnahmeeinwirkung	192
8.4.7	Diskussion: Zwei Übergangs-Peaks in Österreich	193
<b>8.5</b>	<b>Zusammenfassende Beurteilung</b>	<b>195</b>
<b>9.</b>	<b>Qualitätsuntersuchung durch Quantilenanalyse</b>	<b>198</b>
<b>9.1</b>	<b>Ergänzung bisheriger Netzkenngößen durch Quantilenanalyse</b>	<b>199</b>
<b>9.2</b>	<b>Quantilenbasierte Analyse des relativen Zustandsniveaus</b>	<b>200</b>
9.2.1	Quantile und Mächtigkeiten	200
9.2.2	Qualität eines Teilnetzes für ein gewähltes Quantil	203
9.2.3	Zusammengefasste Qualität für alle Qualitätsbereiche	205
9.2.4	Wertebereiche	208
9.2.5	Vergleich der „schlechten“ und der „guten“ Quantile	212
9.2.6	Anwendung des Verfahrens auf Zustandswerte	214

9.2.7	Gewichtung des Qualitätswertes Q anhand von Streckenlängen bzw. Flächen	218
<b>9.3</b>	<b>Exemplarische Modellrechnungen</b>	<b>219</b>
9.3.1	Modellnetze	220
9.3.2	Szenarien	222
9.3.3	Ergebnisse	223
<b>9.4</b>	<b>Quantilenbasierte Analyse der Zustandshomogenität</b>	<b>229</b>
<b>9.5</b>	<b>Anwendung der quantilenbasierten Analyse auf die Zustandsdynamik</b>	<b>233</b>
<b>9.6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>234</b>
<b>10.</b>	<b>Visualisierungsverfahren für Zustandsdynamiken</b>	<b>236</b>
<b>10.1</b>	<b>Statistische Standardauswertungen</b>	<b>238</b>
10.1.1	Klassenbelegungshäufigkeiten (Säulendiagramme)	238
10.1.2	Summenlinien	242
10.1.3	Kenngößen	243
<b>10.2</b>	<b>Quantilenanalysen</b>	<b>243</b>
<b>10.3</b>	<b>Streckenbänder</b>	<b>245</b>
<b>10.4</b>	<b>Karten</b>	<b>247</b>
10.4.1	Karten mit Zustandsdifferenzen	248
10.4.2	Karten mit Zustandsstreifen	250
10.4.3	Geostatistiken	251
<b>11.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>258</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>261</b>

## 1. Einleitung

Grundlage für die nachhaltige, erfolgreiche Wirtschaftsentwicklung einer Gesellschaft ist die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen, nutzungsgerechten Verkehrsinfrastruktur. Die Bedeutung der öffentlichen Straßeninfrastruktur wird durch die hohen Aufwendungen bestätigt, welche durch die Volkswirtschaft jährlich für den Ausbau und den Erhalt des Verkehrsnetzes und insbesondere des Straßennetzes aufgebracht werden.

Allein im Jahr 2002 betragen die Ausgaben für den Bereich der Bundesfernstraßen in der Bundesrepublik Deutschland rund 5,6 Milliarden € [1], wobei hierbei die durch die Länder und Kommunen getätigten Investitionen noch nicht berücksichtigt sind. Im deutschen Bundeshaushaltsgesetz 2004 werden die Ausgaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Heute: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) inklusive Nachtrag auf 26,8 Milliarden € beziffert [2]. Dies ist der drittgrößte Ausgabentitel und entspricht über 10 % des gesamten Bundeshaushaltes. In Österreich betragen die Ausgaben der Österreichischen Autobahn- und Schnellstraßen Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG), welche mit der Erweiterung und Verwaltung der Fernstraßen beauftragt worden ist, im Jahr 2004 ca. 1,68 Milliarden € [3]. Zusätzlich werden durch das österreichische Ministerium für Verkehr, Innovation und Technologie jährlich weitere ca. 4 Milliarden € aufgewendet [4]. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur und der Ressortzuschnitte ist ein direkter Vergleich der Ausgaben der Ministerien in Deutschland und Österreich nur bedingt zulässig, aus den aufgeführten Zahlen wird aber deutlich, dass die Verkehrsinfrastruktur ein wichtiges und unverzichtbares Investitionsvermögen darstellt.

Um das Angebot der Verkehrsinfrastruktur bedarfsgerecht aufrechtzuerhalten, ist es aufgrund der beständig anwachsenden Verkehrsnachfrage zum einen notwendig, regelmäßig in den Ausbau des Verkehrsnetzes zu investieren und somit die Kapazitäten zu erhöhen, zum anderen muss die bestehende Infrastruktur nutzungsgerecht erhalten werden. Da vereinzelte Rückbaumaßnahmen im Vergleich zum kontinuierlichen Ausbau des Straßennetzes eher die Ausnahme bleiben, ist die Straßeninfrastruktur in der Praxis ein immer größer werdendes Kapitalanlagevermögen, zu dessen bedarfsgerechter Erhaltung ein immer größer werdender Aufwand betrieben werden muss.

Der Anteil der Erhaltungsausgaben am gesamten Bundesfernstraßenhaushalt ist in Deutschland in den letzten Jahren beständig gestiegen und betrug im Jahr 2001 ca. 1,8 Milliarden € bzw. 66 % der Ausgaben für Neu- und Ausbau (einschließlich Grunderwerb) [1]. In Österreich wurden im Jahr 2004 durch die ASFINAG 455 Mio. € für Betrieb und Erhaltung der Fernstraßen aufgewendet, was in jenem Jahr ca. 80 % der Neubausausgaben entspricht. Aufgrund der aus der Vergangenheit bekannten Tendenzen und gemäß den politischen Vorgaben des Gesetzgebers und der Regierung ist davon auszugehen, dass sich der Trend zur stärkeren Akzentuierung der Straßenerhaltung gegenüber dem Neubau fortsetzen wird.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die Aufgabe der Straßenerhaltung mit einer besonderen Verantwortung für ein immer größer und wertvoller werdendes Investitionsvermögen verbunden ist. Die Straßenbauverwaltungen haben die Verpflichtung, die ihnen anvertraute Straßeninfrastruktur im Rahmen ihrer Möglichkeiten sicher, umweltgerecht, nutzungsgerecht und wirtschaftlich zu erhalten, wobei die zu treffenden Entscheidungen aufgrund der Komplexität dieser Aufgaben nach systematischen, rationalen und objektiv nachvollziehbaren Kriterien erfolgen sollen.

Das Aufgabenfeld der „systematischen Straßenerhaltung“ bzw. des „Erhaltungsmanagements im Straßenwesen“ erfordert die interdisziplinäre Berücksichtigung verschiedener ökonomischer und ingenieurtechnischer Aspekte und somit die Zusammenführung verschiedener Fachdisziplinen, von denen die **Erfassung und Analyse des Straßenzustands** einen der bedeutendsten Beiträge leistet. Diese Disziplin ist in der Vergangenheit intensiv weiterentwickelt worden, wobei in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte in Hinblick auf die Präzision und Automatisierung der Zustandserfassungstechnik gemacht worden sind.

Zeitgleich mit der Entwicklung der Messverfahren wurde die nutzungsgerechte Aufbereitung der Messergebnisse weiterentwickelt. Jede Zustandserfassung wird durch eine angeschlossene Zustandsbewertung ergänzt, bei der aus den Messdaten durch Analyse- und Auswerteverfahren Informationen für die Entscheidungsträger abgeleitet werden. In der heutigen Praxis können hierbei zwei besonders häufig vorkommenden Nutzungen unterschieden werden.

In beiden Fällen ist das Ziel der Analyse die Erstellung eines Erhaltungsprogramms, d.h. die zeitliche und örtliche Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen, wobei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Zum einen werden die Straßenzustandsdaten unter Einbeziehung weiterer, ergänzender Straßendaten durch fachspezifische Analysesoftware ausgewertet, um durch einen systematischen Prozess automatisch Erhaltungsprogramme bzw. Vorschläge für Erhaltungsprogramme zu erstellen. Diese erfolgt vor allem durch die Anwendung von **Pavement-Management-Systemen (PMS)**<sup>1</sup>. Zum anderen können Straßenzustandsdaten durch verschiedene **Darstellungsverfahren visuell aufbereitet** werden, um in Form von Statistiken, thematischen Karten, Streckenbändern oder Diagrammen die Entscheidungsträger bei den Entscheidungsprozessen zu unterstützen.

Während bei der Zustandsdarstellung das Erhaltungsmanagement durch eine präzise und informative Aufbereitung der gemessenen IST-Zustandsdaten, bzw. zusätzlicher Straßenbestandsinformationen unterstützt wird, wird bei der Anwendung von Pavement-Management-Systemen die Zustandsentwicklung prognostiziert und aufbauend

---

<sup>1</sup> In verschiedenen Quellen wird der Begriff „PMS“ ausschließlich auf die PMS-Software beschränkt. Andere Quellen weiten diesen Begriff generell auf das systematische Erhaltungsmanagement im Straßenwesen aus. In dem vorliegenden Dokument wird die letztere Definition angewandt.

auf diesen Annahmen das Erhaltungsprogramm durch komplexe, interne Rechenvorgänge automatisch abgeleitet.

Bei der Visualisierung des Zustands wird bisher in der Regel darauf verzichtet, die zukünftige Zustandsentwicklung in die Darstellungen einzubeziehen. Dies erfolgt vor allem zugunsten einer präzisen, nicht auf unsicheren Prognosen beruhenden Darstellung der existierenden Sachverhalte, hat aber den Nachteil, dass die für das Erhaltungsmanagement wichtige, in Teilbereichen des Straßennetzes sehr unterschiedliche Zustandsentwicklung bei der Erhaltungsprogrammbildung nicht berücksichtigt wird. Pavement-Management-Systeme führen zwar eine Zustandsprognose durch, derzeit werden aber die prognostizierten Daten, d.h. die Zustandsdynamik, hauptsächlich nur bei der intern abgewickelten, automatisierten Erhaltungsprogrammbildung verwendet und stehen mangels entsprechender Darstellungsverfahren den Entscheidungsträgern nicht in geeigneter Form zur Verfügung.

## 1.1 Aufgabenstellung / Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, inwiefern die verfügbaren Straßenzustandsdaten durch geeignete Verfahren einer weitergehenden Nutzung zugeführt werden können. Hierzu soll zunächst im Rahmen einer **systematischen Beschreibung** der verschiedenen Auswerteverfahren in Hinblick auf die mit diesen Daten zu bewältigenden Aufgabenstellungen des Straßenerhaltungsmanagements eingegangen werden. Anhand dieser Aufgabenstellungen soll untersucht werden, inwiefern ein Informationsbedarf besteht, der bislang durch die existierende Auswertemethodik nicht ausreichend abgedeckt wird. Falls ein solcher zusätzlicher Informationsbedarf festgestellt wird, soll versucht werden, **Ansätze für weitergehende Verfahren zur Nutzung der Zustandsdaten** zu erarbeiten, mit denen dieser Bedarf abgedeckt werden kann. Hierbei wird ein besonderer Wert auf die Umsetzbarkeit und Praktikabilität der Verfahren gelegt, mit dem konkreten Ziel, das Erhaltungsmanagement in Deutschland und in Österreich zu unterstützen. Aus diesem Grund soll auf die Besonderheiten und Randbedingungen der beiden Straßennetze ein besonderes Gewicht gelegt werden. Gleichzeitig werden die bereits existierenden Standardverfahren zur Nutzung der Zustandsdaten dieser beiden Länder vertieft behandelt, wobei auch Gemeinsamkeiten und Unterschiede wertungsfrei herausgearbeitet werden sollen.

Die Praktikabilität der vorgestellten Verfahren soll durch **praktische Beispiele** anhand repräsentativer, realer Daten nachgewiesen werden.

Der Hauptuntersuchungsgegenstand sind die übergeordneten Straßen, d.h. die Bundesfernstraßen (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) in Deutschland sowie die Bundesstraßen der Kategorien A (Autobahn) und S (Schnellstraße) in Österreich. Einige der hier vorgestellten Verfahren können auch auf Straßen der nachgeordneten Kategorien angewendet werden, allerdings soll dies nicht Hauptgegenstand der vorliegenden Untersuchung sein.

Die Auswahl der untersuchten Verfahren soll sich darauf konzentrieren, Zustandsdaten aus netzweiten Zustandserfassungen zu nutzen, um die Entscheidungsträger aus Politik und Erhaltungsmanagement (Politik- und Netzebene entsprechend [5]) zu unterstützen.

## 1.2 Vorgehensweise

Nach einer Einführung wird im **Kapitel 2** zunächst der Umfang und die Ziele der Straßenzustandsdatenanalyse im Rahmen des Erhaltungsmanagements vorgestellt. Im **Kapitel 3** wird auf die Prozesse eingegangen, die zur Gewinnung von Straßenzustandsdaten durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Prozesse ist in **Kapitel 4** (Zustandserfassung), **Kapitel 5** (Ermittlung von Zustandsgrößen) und **Kapitel 6** (Zustandsbewertung) zu finden. Hierbei wird auf die Inhalte und die Bedeutung der einzelnen Typen von Zustandsdaten (Rohdaten, Zustandsgrößen und Zustandswerte) eingegangen.

Auf der Grundlage der erhobenen Zustandsdaten werden im **Kapitel 7** die existierenden Methoden zur Nutzung der Zustandsdaten systematisch zusammengestellt und dem Informationsbedarf der Entscheidungsträger auf Politik-, Netz- und Projektebene gegenübergestellt.

Anhand dieser Gegenüberstellung wird aufgezeigt, welcher Informationsbedarf derzeit standardmäßig durch PMS-Berechnungen generiert und durch geeignete Visualisierungsverfahren dargestellt wird. Hierbei zeigt sich, dass die verfügbaren Zustandsdaten das Potential für zusätzliche, nützliche Anwendungen bieten, mit denen die Entscheidungsträger der Straßenerhaltung unterstützt werden können. In den sich anschließenden Kapiteln werden diese Anwendungsmöglichkeiten ausgearbeitet und vorgestellt. Die Verfahren werden prototypisch umgesetzt und die Umsetzbarkeit wird durch Anwendung auf repräsentative Datenmengen nachgewiesen. Als Datenbasis dienen ausgewählte Teilnetze in Deutschland und in Österreich. Die für die Anwendung notwendigen Software-Entwicklungsarbeiten werden weiter unten, im Kapitel 1.4 zusammenfassend beschrieben.

Im **Kapitel 8** werden die Zustandsdaten aufeinander folgender Erfassungen dazu genutzt, die derzeit in Österreich und in Deutschland angewendeten Zustands-Prognosemodelle zu prüfen. Im **Kapitel 9** wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem eine repräsentative, statistisch korrekte Bewertung des Straßenzustandes auf Basis von Zustandswerten ermöglicht wird.

Das **Kapitel 10** enthält Vorschläge, wie die im Kapitel 7 systematisch zusammengestellten Standard-Visualisierungsverfahren dahingehend erweitert werden können, dass auch die Zustandsdynamik dargestellt werden kann. Hierdurch können die durch das PMS prognostizierten Zustandsentwicklungen dem Entscheidungsträger nutzbar gemacht werden.

Im **Kapitel 11** werden die Ergebnisse der Arbeit abschließend zusammengefasst.

### 1.3 Datenschutz

Ein wesentliches Problem bei der praktischen Umsetzung von Auswerteverfahren besteht häufig darin, dass die in der Theorie erarbeiteten Ansätze einen Datenbestand erfordern, der in der Realität nicht in ausreichender Qualität oder mit ausreichendem Abdeckungsgrad erhoben werden kann. Die Folge kann dabei sein, dass die Anwendung der Verfahren aus Kostengründen nicht praktikabel erscheint und die Verfahren somit keinen praktischen Nutzen bringen. Aus diesem Grund verfolgt die vorliegende Arbeit das Prinzip, nur Daten anzuwenden, die aus bestehenden Zustandserfassungen stammen und somit als verfügbar vorausgesetzt werden können. Zum Nachweis der Umsetzbarkeit der konzipierten Verfahren zur Nutzung der Zustandsdaten werden diese realen Daten angewendet.

Bei der Verwendung realer Daten und der Veröffentlichung von Auswertergebnissen ist es von Bedeutung, die Anforderungen des Datenschutzes zu beachten. Die Daten zum Zustand einer Straße sind, obwohl diese jedermann zugänglich sind, kein öffentliches Gut, sondern Eigentum der Verwaltungen, welche die Straßenzustandserfassungen durchführen bzw. durchführen lassen. Das Eigentumsverhältnis ergibt sich unmittelbar daraus, dass die Erhebung der Daten mit Mitteln der Verwaltungen bezahlt werden und somit ein wertvolles Gut entsteht, welches zum Teil an kommerzielle Nutzer, wie z.B. die Automobilindustrie, verkauft werden kann.

Für Forschungszwecke, wie z.B. für die vorliegende Arbeit, werden in der Regel solche Daten bereitgestellt, sofern die Anonymität der Daten gewährleistet wird. Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand galten somit die folgenden Randbedingungen.

- Es dürfen reale Daten zum Zustand des Straßennetzes abgebildet werden, sofern diese Daten einen für ein größeres Teilnetz geltenden Gesamtzustand wiedergeben. Es darf kein Zustand in einer Weise angezeigt werden, die einen Rückschluss darüber erlaubt, auf welcher Strecke sich der Zustand befindet.
- Falls Zustandsdaten in einer Form abgebildet werden sollen, die so detailliert ist, dass einzelne Strecken unterschieden werden können, so sind fiktive Musterdaten zu verwenden. Die Lokalisierung kann somit der Realität entsprechen, sofern die Daten fiktiv sind.
- Falls die Darstellung bereits in identischer Form an anderer Stelle der Öffentlichkeit zugänglich ist, besteht keine Notwendigkeit zur Anonymisierung.

Diese Vorgaben wurden bei der Präsentation der Ergebnisse berücksichtigt.

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten für Deutschland wurden durch die Bau- und Bodenprüfstelle in Darmstadt bereitgestellt. Die realen Beispieldaten für Österreich

wurden durch das Institut für Straßenbau der Technischen Universität Wien mit Genehmigung der ASFINAG zur Verfügung gestellt.

Der Verfasser möchte sich an dieser Stelle ausdrücklich für die Unterstützung bedanken.

## 1.4 Softwareentwicklung

Für die hier vorgestellten Analyse- und Darstellungsverfahren wurde angestrebt, weitestgehend auf vorhandene Softwarelösungen zurückzugreifen. In vielen Fällen war es dennoch notwendig, aufgabenspezifische Software zu entwickeln und einzusetzen, da nur hierdurch eine vollständige Kontrolle über alle Berechnungsvorgänge und Berechnungsannahmen zu gewinnen war. Die Programme wurden in der Programmiersprache VisualBasic Version 6.0 entwickelt, wobei der Schwerpunkt der Entwicklungsaktivitäten vor allem auf die internen Berechnungen und nicht auf die Benutzerführung oder einer universellen Installierbarkeit gelegt worden ist. Diese Vorgehensweise entspricht dem Ansatz dieser Arbeit, allgemeingültige Verfahren zu erarbeiten und zu testen und nicht etwa direkt kommerziell einsetzbare Lösungen zu erstellen. Aus diesem Grund wurden auch keine Installationspakete erstellt.

Als Hintergrundinformation darüber, welche Werkzeuge zur Anwendung der hier vorgestellten Verfahren bereits vorhanden waren und inwiefern zusätzliche Softwareentwicklungen notwendig wurden, soll nachfolgend die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Software aufgeführt werden.

- Im Kapitel 8 werden die Prognosemodelle aus Österreich und Deutschland anhand realer Zustandsdaten überprüft. Die Prüfung erfolgte auf Grundlage von relativen Übergangshäufigkeiten für verschiedene Zustandsgrößen-Klassenbreiten. **Zur Ermittlung der Übergangshäufigkeiten wurde ein entsprechendes Softwaremodul geschrieben**, welches anhand einer Datenbanktabelle mit Vergleichsdaten eine Textdatei mit eigens definierter Struktur erstellt, in der die Übergangshäufigkeiten eingetragen werden.
- Die relativen Übergangshäufigkeiten werden in Kapitel 8 in unterschiedlicher Weise visualisiert. Zum einen werden tabellarische Darstellungen und dreidimensionale Diagramme verwendet. In diesen Fällen wurde Microsoft-Excel als Auswertepattform genutzt. Die Struktur der Textdateien mit den relativen Übergangshäufigkeiten wurde daher dem Importmodul von MS-Excel angepasst. Zum anderen wurde eine neue, zwidimensionale Darstellungsform erarbeitet, mit der die Häufigkeiten farblich unterschieden werden können (siehe beispielsweise Abbildung 75). **Zur Erzeugung der 2D-Darstellungen der Übergangshäufigkeiten wurde eine eigene Software entwickelt**.
- Für die Überprüfung der Prognosemodelle in Kapitel 8 bestand in Deutschland die Möglichkeit, die Prognosemodelle direkt anhand von Daten der Auswerte-

abschnitte mit 100 m Regellänge, anstatt anhand der längeren PMS-Abschnitte zu vergleichen. Da aber bisher keine solche Überprüfung durchgeführt wurde, lagen keine Prognosedaten für die Auswerteabschnitte vor. **Es wurde eine Software erstellt, mit der eine Vier-Jahres-Prognose der Spurrinnendaten auf Basis der Auswerteabschnitte mit 100 m-Regellänge durchgeführt werden konnte.**

- Im Kapitel 9 wird ein neues Verfahren zur Quantifizierung der Angebotsqualität auf Quantilenbasis erarbeitet und dokumentiert. **Zur prototypischen Anwendung der Quantilenanalyse wurde eine entsprechende Software erstellt.**
- Im Kapitel 10 wird ein neues Verfahren zur Visualisierung der Zustandsdynamik entworfen und exemplarisch anhand realer Daten angewendet. **Die Software zur Erzeugung der Sektorendiagramme musste neu entwickelt werden.** Hierbei sollte betont werden, dass die Software unter Verwendung der so genannten „MapX-Komponente“ ausschließlich eine MapInfo-Relation mit den Dateninhalten der Sektorendiagramme erzeugt. Die Zusammenführung der Daten und die Abbildung der Hintergrundinformationen erfolgt gesondert durch die Standardsoftware MapInfo.

Die vorliegende Arbeit legt den Schwerpunkt vor allem auf die Konzeptdefinition und die Sicherstellung der Praktikabilität der vorgestellten Verfahren. Die Erarbeitung einer Berechnungssoftware erfolgte ausschließlich zum Nachweis der Umsetzbarkeit der Verfahren.

Bei der Entwicklung der Software wurde der Aspekt der Benutzerfreundlichkeit sowie der universellen Installierbarkeit nicht verfolgt. Aus Aufwandsgründen ist somit auch keine umfassende Anwendersoftware erarbeitet worden, sondern aufgabenspezifisch einsetzbarer Sourcecode.

## 2. Bedeutung der Zustandsdaten im Erhaltungsmanagement

Aufgrund der Bedeutung der Straßeninfrastruktur und da die dafür aufzubringenden Mittel in der Regel aus dem Staatshaushalt durch Maut- und Steuereinnahmen finanziert werden müssen, wurde die Aufgabe der Straßenerhaltung an Institutionen übergeben, welche die Entscheidungen zur Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen nach rationalen, nachvollziehbaren Kriterien treffen sollen. Die Zustandsdaten stellen hierbei eine objektive Datengrundlage zur Beurteilung der Straßenqualität dar und sind somit die Basis der rationalen Erhaltungsplanung.

Bei SCHMUCK [6] ist die „Erfassung und Bewertung“ des Straßenzustands als eines der zentralen Elemente im Management der Straßenerhaltung beschrieben (siehe Abbildung 1).

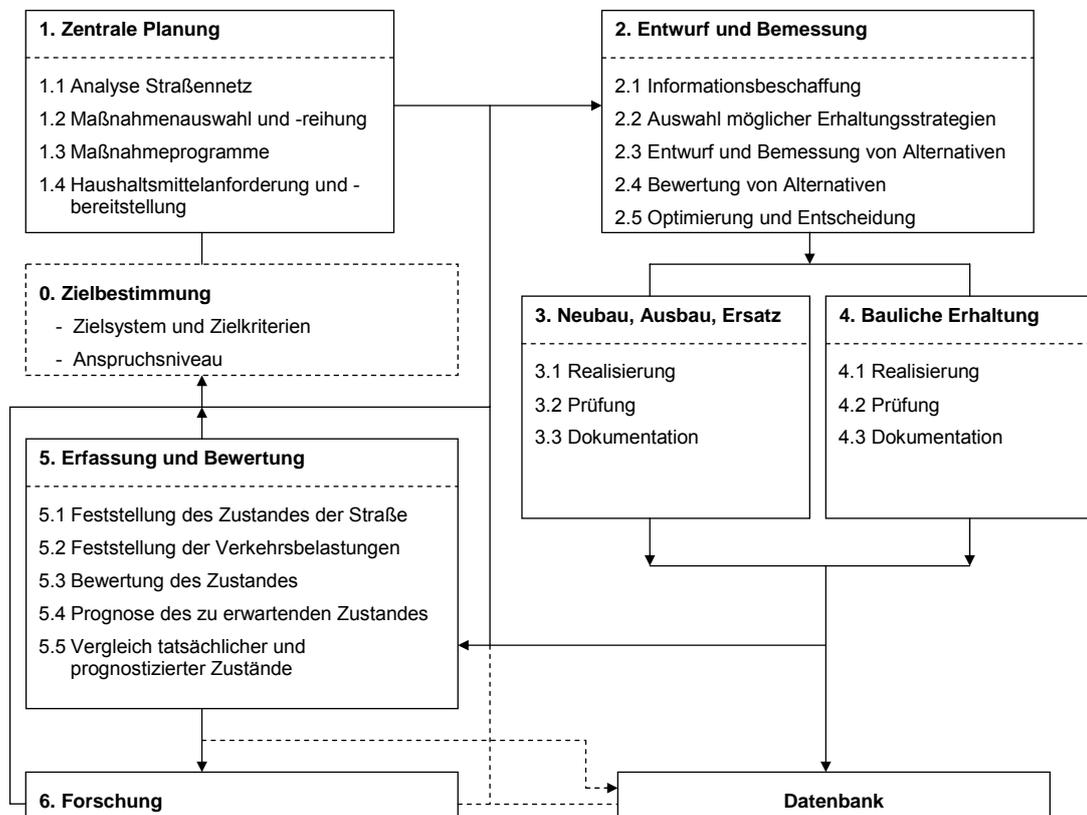


Abbildung 1: Allgemeines Pavement Management-Modell nach Schmuck [6]

Unter dem Punkt 5 (Erfassung und Bewertung) wird die Zustandserfassung und -bewertung, aber auch die Feststellung der Verkehrsbelastungen und Elemente der Zustandsprognose subsumiert. Darüber hinaus sind sowohl unter Punkt 1 (Zentrale Planung) als auch unter Punkt 2 (Entwurf und Bemessung) Unterpunkte zu finden, die einen starken Bezug zur Straßenzustandsanalyse aufweisen (die Punkte 1.1 „Analyse

Straßennetz“ und 2.1 „Informationsbeschaffung“). Auch die Aufgabenabwicklung einiger anderer Unterpunkte, z.B. die Bewertung von Erhaltungsalternativen oder die Festlegung von Zielkriterien, findet in der Praxis unter Berücksichtigung des Straßenzustands statt.

Vor dem Hintergrund, dass die Arbeit von SCHMUCK [6] auch heute eine Grundlage des modernen Erhaltungsmanagements ist, zeigt die obige Betrachtung, dass die Nutzung von Straßenzustandsdaten Bestandteil vieler unterschiedlicher Teilprozesse und Arbeitsabläufe der Erhaltungsplanung ist. Der Vorgang der Zustandserfassung und Zustandsbewertung kann zwar als abgeschlossener Arbeitsprozess abgewickelt werden, es erscheint aber nicht sinnvoll, die Zustandsdatennutzung als isolierten Baustein des Erhaltungsmanagements einzustufen, sondern vielmehr dessen Beziehung zu den anderen Arbeitsabläufen zu berücksichtigen.

## **2.1 Qualitative Ziele der Zustandsdatennutzung**

Durch regelmäßig durchgeführte Zustandserfassungen soll den Entscheidungsträgern eine objektive Grundlage für die Erhaltungsplanung verschafft werden, wobei verschiedene qualitative Ziele des Erhaltungsmanagements gleichzeitig verfolgt werden können:

- Die Kenntnis des allgemeinen Ist-Zustandsniveaus erlaubt unter der Vorgabe eines angestrebten Soll-Niveaus eine Abschätzung des generellen Erhaltungs- bzw. Erneuerungsbedarfs und dient somit der Planung der Gesamtaufwendungen für das Erhaltungsmanagement.
- Durch die Kenntnis der Zustandsverteilung können Erhaltungsschwerpunkte identifiziert und zur Festlegung von einzelnen Erhaltungsmaßnahmen herangezogen werden.
- Die Informationen über die einzelnen Schäden können dazu genutzt werden, Rückschlüsse auf die Schadensursachen zu ziehen, um die Art der durchzuführenden Maßnahmen an die Erfordernisse anzupassen.
- Die Gegenüberstellung von Straßenzustandsdaten und anderen bautechnischen Eigenschaften der Straße (Material des Oberbaus, Verkehrsbelastung, Lage, etc.) erlaubt die Erforschung von Schadensursachen und ist eine wertvolle Hilfe zur Verbesserung der zukünftigen Neubau- und Erhaltungstechnik.
- Die regelmäßige Aufzeichnung des Straßenzustands über längere Zeit ermöglicht ein Controlling der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen. Dies bedeutet, dass die Erfüllung der Erhaltungsziele überprüft werden kann.
- Die Verfolgung der Zustandsentwicklung bietet die Möglichkeit, Erfolge der Erhaltungsmaßnahmen nachzuvollziehen und unter anderem für die Öffentlich-

keitsarbeit zu dokumentieren sowie die Folgen bzw. die Bedeutung der Erhaltungsaufwendungen bewusst zu machen.

- Durch die Analyse des Zustands besteht die Möglichkeit, Zustandsprognosemodelle zu erarbeiten bzw. bestehende Zustandsprognosemodelle zu prüfen und zu verbessern.

Die erfassten und bewerteten Zustandsdaten dienen nach einer entsprechenden Aufbereitung als eine der wesentlichsten Informationsgrundlagen der Erhaltungsplanung. Das heutige Erhaltungsmanagement beinhaltet mehrere aufeinander aufbauende Entscheidungsprozesse, in denen zur Entscheidungsfindung unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen sind und somit auch unterschiedliche Informationen, welche aus den Zustandsdaten abgeleitet werden können, von Bedeutung sind. Nachfolgend soll zunächst die Einbindung der Zustandsdaten in den gesamten Entscheidungsprozess näher vorgestellt werden.

## **2.2 Einbindung der Zustandsdaten in den Entscheidungsprozess**

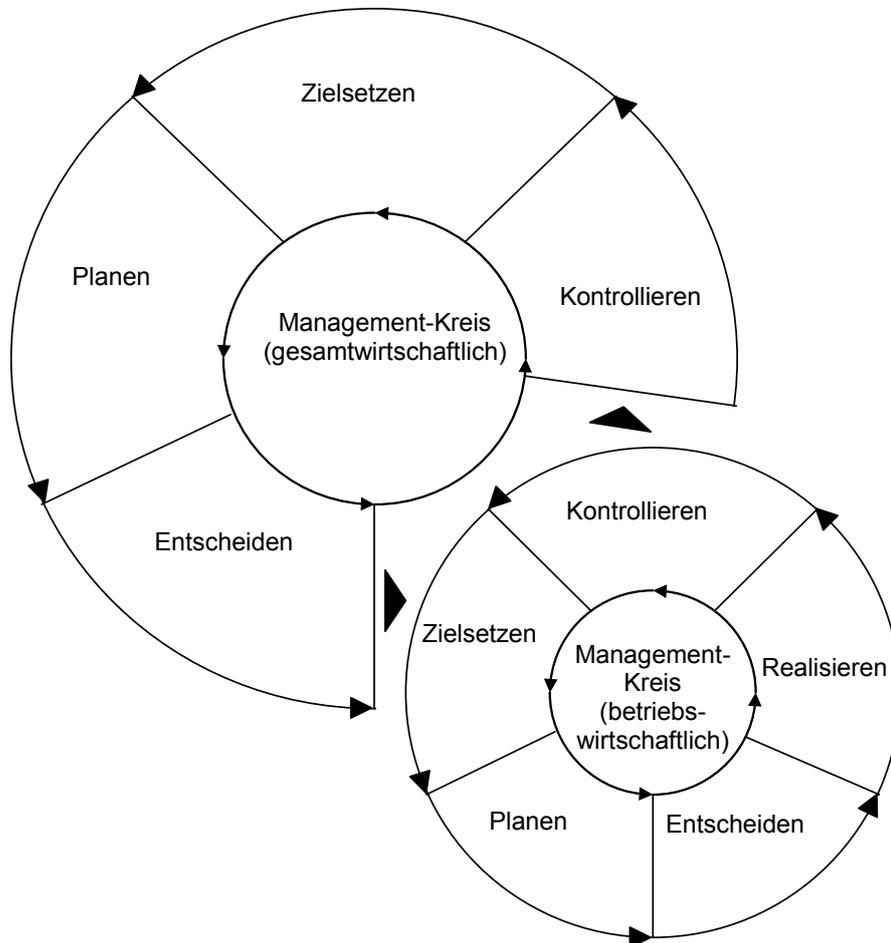
Die Fragestellungen des Erhaltungsmanagements lassen sich in der Regel darauf zurückführen, dass die Folgen unterschiedlicher Entscheidungsvarianten verglichen und gegeneinander abgewogen werden müssen. Die Erfassung und Bewertung der Zustandsdaten sowie die auf die Zustandsdaten angewendete Prognosefunktionen dienen hierbei zur Quantifizierung des Zustandsniveaus in Gegenwart und in der Zukunft. Für den tatsächlichen Entscheidungsprozess genügt aber in der Regel nicht nur die Kenntnis des Straßenzustands, sondern es müssen ergänzende Entscheidungsfaktoren, wie z.B. die Kosten, die Umweltfolgen oder etwa auch gestalterische Aspekte einer Entscheidungsvariante berücksichtigt werden.

Da die vorliegende Arbeit den Schwerpunkt auf die aufgabengerechte Analyse von Straßenzustandsdaten setzt, soll die weitergehende Verknüpfung mit sonstigen entscheidungsrelevanten Faktoren nicht im Detail behandelt werden. Aufgrund des engen Zusammenhangs sowie des Anwendungshintergrundes sollen aber die Verfahren zur Einbindung der Zustandsdaten in den Entscheidungsprozess kurz angerissen werden.

Das Erhaltungsmanagement des Straßenwesens folgt dem bekannten Managementkreis, bestehend aus den Teilaufgaben „Zielsetzen“, „Planen“, „Entscheiden“, „Realisieren“ und „Kontrollieren“, welche in einem Kreislauf aufeinander folgen. Beim hierarchisch gegliederten Erhaltungsmanagement auf unterschiedlichen Entscheidungsebenen wird dieser Managementkreislauf zunächst gesamtwirtschaftlich auf der Politikebene (siehe Kapitel 2.3.1) abgewickelt. Die hierbei getroffenen Entscheidungen werden aber nicht von der Politikebene ausgeführt, sondern die Realisierung wird an die nachgeordnete Netzebene (siehe Kapitel 2.3.2) weitergegeben.

Da die Vorgaben der Politikebene strategischer Art sind und auf die Detailausführung nicht eingehen, muss auf der Netzebene zur Realisierung erneut ein Entscheidungsfin-

dungsprozess umgesetzt werden. Hierbei werden aber nicht mehr gesamtwirtschaftliche Kriterien angewendet, sondern es stehen vielmehr betriebswirtschaftliche Aspekte im Vordergrund. Der Zusammenhang der beiden Entscheidungsebenen kann nach [67] als ineinander übergehende Management-Kreise entsprechend Abbildung 2 dargestellt werden.



**Abbildung 2: Gesamt- und betriebswirtschaftlicher Managementkreis nach [67]**

Die Entscheidungen der übergeordneten Ebene haben unmittelbare Auswirkungen auf die Zieldefinition der nachgeordneten Ebene. Während das gesamtwirtschaftliche Management eine Abwägung der unterschiedlichen Teilaspekte beinhaltet, steht beim betriebswirtschaftlichen Management die Umsetzung der Vorgaben bei minimalen Kosten bzw. die Maximierung des Gesamtnutzens bei vorgegebenem Budget im Vordergrund. Auf Politikebene sollte gemäß diesem Modellausschließliche die Aufstellung eines Bewertungsverfahrens erfolgen, während die Ausführungsentscheidung auf der Netzebene getroffen werden sollte.

Eine auf mehrere Teilziele bezogene Bewertung kann auf verschiedene Weise umgesetzt werden. Die RVS 2.2 [68] stellt für diese Aufgabe vier gebräuchliche Beurteilungsverfahren vor:

- Wirkungsanalyse (WA)
- Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)
- Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA)
- Nutzwertanalyse (NWA)

Von diesen vier Verfahren sind die Nutzwertanalyse sowie die Kosten-Nutzen-Analyse die bekanntesten.

Bei der **Nutzwertanalyse** werden den unterschiedlichen Zielen sowie ggf. den jeweiligen Teilzielen Gewichtungswerte zugewiesen. Jede Variante wird anhand dieses Kriterienkataloges beispielsweise durch ein Punktesystem bewertet. Das Ergebnis ist eine Gesamtpunktzahl für jede Variante, die zur Entscheidungsfindung sowie zur Variantenreihung verwendet werden kann. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, auch bei sehr heterogenen Zieldefinitionen praktikabel anwendbar zu sein. Nachteilig ist hierbei allerdings, dass die Wirtschaftlichkeit einer Variante (falls überhaupt) nur als Teilziel mit einem bestimmten Gewichtungsfaktor eingeht und somit keine betriebswirtschaftliche Betrachtung erfolgt.

Bei einer **Kosten-Nutzen-Analyse** werden demgegenüber für alle bewertungsrelevanten Faktoren monetäre Werte ermittelt. Die Entscheidungsfindung bzw. Variantenreihung findet somit anhand von Geldwerten anstatt von Punkten statt. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die Ermittlung von realistischen Geldwerten häufig schwierig ist und die Festlegung entsprechender Berechnungsannahmen mit Unsicherheiten behaftet ist. Können diese Schwierigkeiten überwunden werden, ergibt sich aber der Vorteil, dass eine Abwägung auf vollständig betriebswirtschaftlicher Basis möglich wird. Gleichzeitig steht aufgrund des im Laufe des Berechnungsprozesses ermittelten Geldwertes eine vollständige Bilanz der Infrastruktur sowohl in Hinblick auf die Kosten, als auch auf dem Nutzen der Verwaltungsarbeit zur Verfügung.

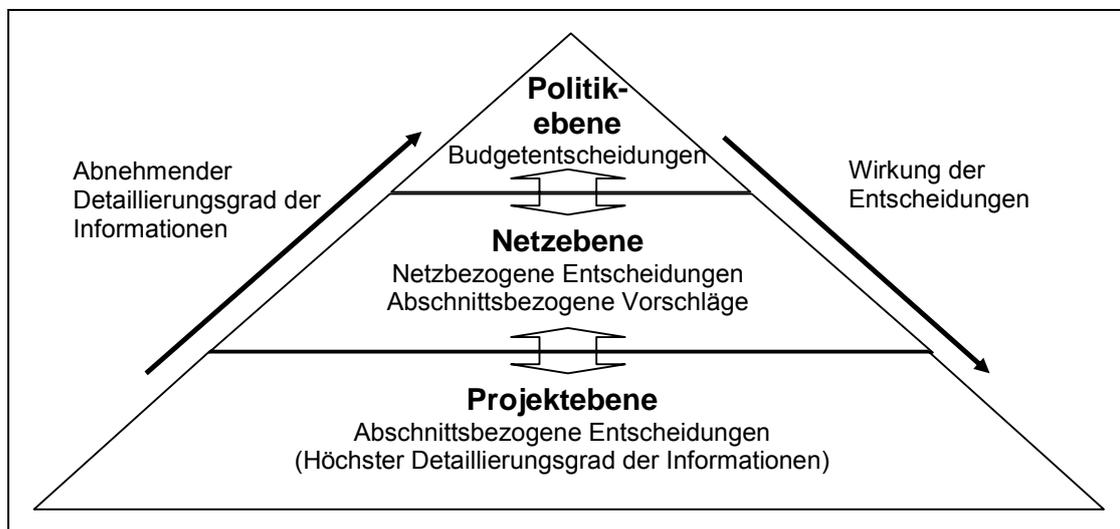
Vor allem der letztgenannte Vorteil führt in Deutschland in den letzten Jahren dazu, dass eine Umstellung der Verwaltungsarbeit von der Kameralistik auf die Doppik im Rahmen des „Neuen Kommunalen Finanzmanagements“ (NKF) stattfindet. Die Anwendung des NKF beschränkt sich hierbei trotz des Namens nicht nur auf die Kommunen, sondern wird derzeit aktiv auch auf die Landesverwaltungen ausgeweitet. Entsprechende Gesetzesvorlagen sind derzeit in Vorbereitung.

Gerade für die monetäre Infrastrukturbilanzierung genügt es nicht, nur die Quantität des Straßennetzes, sondern auch dessen Qualität zu kennen. Die Bewertung des Straßenzustands stellt hierfür die Grundlage dar. Die Prognose des Straßenzustands für die einzelnen Entscheidungsvarianten dient sowohl für die Nutzwertanalyse als auch für die Kosten-Nutzen-Analyse als Beitrag zur Quantifizierung des Nutzens. Hier-

bei ist zu betonen, dass die Bewertung des sich aus dem Straßenzustand ergebenden Nutzens nur eine Teilkomponente des Gesamtentscheidungsprozesses bildet. Die vorliegende Arbeit legt den Schwerpunkt auf die Zustandsdaten und behandelt nicht die Verknüpfung zu anderen Beurteilungsfaktoren. Nachfolgend werden die einzelnen Entscheidungsebenen sowie deren Informationsbedarf, alleine in Hinblick auf die Straßenzustandsdaten, vorgestellt.

### 2.3 Entscheidungsebenen

In Anlehnung an [5] kann das Erhaltungsmanagement im Straßenwesen grundsätzlich in drei *Entscheidungsebenen* aufgeteilt werden, deren Entscheidungsträger hierarchische, aufeinander aufbauende Entscheidungen treffen müssen. Die Aufteilung in Politikebene, Netzebene und Projektebene ist in der Abbildung 3 wiedergegeben.



**Abbildung 3: Entscheidungspyramide im Rahmen der Straßenerhaltung nach [5]**

Auf den höheren Ebenen werden Entscheidungen festgelegt, die für die tieferen Ebenen verbindlich sind. Die tiefer angeordneten Entscheidungsebenen sind mit der detaillierten Umsetzung der generellen Entscheidungen beauftragt.

In der Praxis sind die einzelnen Ebenen zumeist durch unterschiedliche Personen aus verschiedenen Institutionen besetzt. Da jede Ebene unterschiedliche Aufgaben wahrnehmen muss, kann davon ausgegangen werden, dass die jeweiligen Entscheidungsträger einen mehr oder weniger detaillierten Kenntnisstand über das von ihnen zu verwaltende Netz haben. Je höher die Entscheidungsebene angeordnet ist, desto geringer ist der benötigte Detaillierungsgrad. Dies wird in der Regel dadurch ausgeglichen, dass auf höheren Ebenen die Größe des zu verwaltenden Netzes zunimmt bzw. für ein bestimmtes Teilnetz weniger Personen verantwortlich sind.

In der Tabelle 1 werden Aufgaben und zustandsbezogener Informationsbedarf der einzelnen Entscheidungsebenen qualitativ zusammengestellt.

Ebene	Aufgaben	Informationsbedarf
Politikebene	Definition strategischer Ziele Festlegung der absoluten Budgethöhe Budgetverteilung auf nachgeordnete Verwaltungen	Netzqualität Qualitätsverteilung Zusammenhänge zwischen Qualität und Budget Zukünftige Qualitätsentwicklung
Netzebene	Ungefähre Festlegung der erhaltungsbedürftigen Strecken, der Art und des Zeitpunktes von Erhaltungsmaßnahmen	Überblick über den Netzzustand Erhaltungsschwerpunkte Qualitätsentwicklung mit und ohne Maßnahmen
Projektebene	Detaillierte Baufestlegung für die Maßnahmen Zusammenstellung der Leistungspositionen und Gewerke Ausschreibung Ausführung / Realisierung	Detailuntersuchung der jeweiligen Schäden und möglichen Schadensursachen Genaue Lokalisierung der Schadensstellen

**Tabelle 1: Aufgaben und Informationsbedarf einzelner Entscheidungsebenen**

Die Aufteilung in die oben aufgeführten Entscheidungsebenen ist in der Praxis nicht immer durch gesonderte Verwaltungsinstanzen klar abzugrenzen. So können beispielsweise die Festlegung der Erhaltungsmaßnahmen und deren Durchführung durch eine einzige Verwaltung abgewickelt werden. Es ist aber auch bei einer Zusammenlegung mehrerer Ebenen in eine Institution festzustellen, dass diese Entscheidungsprozesse in der oben aufgeführten, klaren Trennung existieren.

Die Erarbeitung von Zustandsprognosemodellen ist keiner der Entscheidungsebenen direkt zuzuordnen, sondern vielmehr Bestandteil einer abseits der Entscheidungen geführten Forschungstätigkeit. Die Anwendung der Prognosemodelle erfolgt dagegen durch mehrere Entscheidungsträger unterschiedlicher Ebenen, da die Auswirkungen der zu treffenden Entscheidungen auf den Zustand in fast allen Bereichen von Interesse ist.

Die hier aufgeführten Aufgaben und der daraus abgeleitete Informationsbedarf haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern sind aus der praktischen Arbeit im Erhaltungsmanagement zusammengetragene Schwerpunkte dieses Fachgebiets. Sie resultieren aus der Erfahrung der Personen und Institutionen, welche mit der Auswertung von Zustandsdaten beauftragt worden sind. Es ist darüber hinaus zu beobachten, dass mit zunehmender Qualität und zunehmendem Umfang der Auswerteverfahren neue

Aspekte aufgeworfen werden, die mithilfe von Zustandsdaten behandelt werden können.

Beispiele für solche Entwicklungen sind die Frage nach der Zustandsdynamik, die erst durch die regelmäßige, vergleichbare Erhebung von Zustandsdaten aufgetreten ist oder die Frage nach der metergenaue Erhaltungsabschnittsbildung, welche erst durch die standardisierte Aufzeichnung so genannter „Rohdaten“ aufgeworfen wurde. Nachfolgend werden die einzelnen Entscheidungsebenen vorgestellt und die zugehörigen straßenzustandsbezogenen Fragestellungen aufgeführt.

### 2.3.1 Politikebene

Auf der politisch-strategischen Entscheidungsebene wird die Basis des Erhaltungsmanagements definiert. Im Wesentlichen beinhaltet dies:

- Festlegung der absoluten Budgethöhe
- Definition und Controlling von strategischen Zielen
- Aufteilung des Budgets auf die nachgeordneten Verwaltungen

Durch Abwägung des politischen Ziels einer gebrauchsfähigen Straßeninfrastruktur gegen andere politische Bedürfnisse (Arbeit und Soziales, Bildung, Sicherheit, usw.) wird zunächst die **absolute Höhe des Budgets** für das Verkehrswesen und der Anteil des Budgets für das Straßenwesen sowie dessen untergeordnete Titel, z.B. für die Erhaltung, festgelegt. Dies erfolgt in der Bundesrepublik Deutschland durch die alljährliche Verabschiedung des Haushaltsgesetzes durch den Bundestag und in der Republik Österreich durch den alljährlichen Beschluss des Bundesfinanzgesetzes durch den Nationalrat. Hierbei hat der Gesetzgeber nicht nur die Möglichkeit, aus den verfügbaren Mitteln die Anteile für das Erhaltungsmanagement festzulegen, sondern auch durch eine entsprechende Abgabenpolitik (z.B. Mauterhebung, Mineralölsteuer) gezielt Mittel für das Straßenerhaltungsmanagement bereitzustellen.

Darüber hinaus wird die Verteilung der Mittel mit bestimmten Haushaltszielen verbunden. Dies bedeutet, dass auf politischer Ebene die **strategischen Ziele des Erhaltungsmanagements festgelegt** werden, welche für die unteren Ebenen verbindlich sind. Die Zielfestlegung kann dabei sowohl allgemeine Vorgaben (z.B. Erreichung einer bestimmten Gebrauchsqualität) als auch projektbezogene Aufgaben (z.B. Bau einer bestimmten Strecke zur Verbindung bestimmter Ballungsgebiete) beinhalten. In der Regel reduzieren sich solche projektbezogenen, strategischen Vorgaben auf den Neubau bzw. auf den kapazitätsrelevanten Ausbau von Strecken, nicht aber auf die für das Erhaltungsmanagement relevanten Projekte mit ausschließlich zustandsverbessernden Zielen. Die Definition von Erhaltungsstrategien und Erhaltungszielen beinhaltet als Konsequenz auch die Überprüfung der Einhaltung dieser Ziele (**Controlling**). Die Fest-

legung der strategischen Ziele erfolgt in der Regel durch die politische Exekutive, d.h. durch die Verkehrsministerien.

Bei größeren Straßennetzen können die Entscheidungen der untergeordneten Netz- und Projektebene in die Verantwortung nachgeordneter Verwaltungen übergeben werden. In Deutschland werden beispielsweise die Straßenbauverwaltungen der Bundesländer mit der Erhaltungsprogrammplanung und der Bauausführung für die Bundesfernstraßen (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) beauftragt, obwohl die Bundesfernstraßen sich im Eigentum des Bundes befinden. Diese Aufgabenverteilung resultiert unter anderem daraus, dass die Entscheidungsfindung auf der tiefsten Ebene einen hohen Informations-Detaillierungsgrad und somit bei größeren Straßennetzen eine hohe Informationsmenge erfordert, die für das gesamte zu verwaltende Netz nicht sinnvoll durch eine einzige Institution verarbeitet werden kann, zumal die Informationsbeschaffung häufig Ortskenntnis bzw. die Möglichkeit einer Ortsbesichtigung und somit räumliche Nähe zur verwalteten Infrastruktur erfordert. Die Konsequenz dieser Aufteilung ist aber auch die Notwendigkeit, die festgelegten **Erhaltungsmittel auf die nachgeordneten Verwaltungen aufzuteilen** und somit deren absolutes Budget festzulegen.

Für die Politikebene lassen sich somit folgende Fragestellungen formulieren, die durch die Analyse von Zustandsdaten beantwortet werden sollen:

- **Wie ist die absolute Angebotsqualität des Gesamtnetzes bzw. einzelner Teilnetze?**

Durch die Gegenüberstellung des IST-Zustands zu dem aus der politischen Willensbildung hervorgegangenen SOLL-Zustand können strategische Ziele erarbeitet werden. Beispielsweise kann als strategisches Ziel definiert werden, ein bestimmtes Qualitätsniveau innerhalb von 10 Jahren auf mindestens 95 % des Straßennetzes zu erreichen.

- **Wie verteilt sich die Angebotsqualität auf einzelne Teilnetze?**

Durch den Vergleich einzelner Netzteile werden Erhaltungsschwerpunkte deutlich und es werden erste Anhaltspunkte für die Verteilung der Mittel ersichtlich. Darüber hinaus ist die gleichmäßige Qualitätsverteilung im Gesamtnetz eine häufig geforderte Randbedingung, deren Einhaltung es zu überprüfen gilt.

- **Welche Mittel werden mindestens benötigt, um eine bestimmte Qualität im Gesamtnetz bzw. in den einzelnen Teilnetzen zu erreichen?**

Diese Aufgabe wird als „Qualitätsszenario“ bezeichnet. Der Mitteleinsatz muss zudem weiteren Randbedingungen folgen, so ist z.B. eine ungefähre Gleichverteilung der jährlichen Budgets von Bedeutung.

- **Wie hat sich die Angebotsqualität über die Zeit verändert?**

Diese Fragestellung dient vor allem der Prüfung der Einhaltung der strategischen Ziele und kann somit dem Controlling zugeordnet werden. In Deutschland wird dies als „Dynamische Zustandsanalyse“ bezeichnet. Es sind hierbei sowohl die Veränderungen im Gesamtnetz als auch in regionalen Teilnetzen von Interesse.

- **Wie wird sich die Qualität des Netzes aufgrund eines bestimmten Erhaltungsprogramms entwickeln?**

Hierbei steht die Frage nach einer Zukunftsprognose des Straßenzustands im Vordergrund.

- **Welche maximale Qualität kann mit vorgegebenen Mitteln erreicht werden?**

Diese als „Finanzszenario“ bezeichnete Aufgabe ist eine der häufigsten Fragestellung der Politikebene und wird in der Regel zusätzlich auch durch die Netzebene behandelt.

Im Zusammenhang mit der Politikebene wird häufig von Angebotsqualität statt von Straßenzustand gesprochen, da der Auftrag dieser Ebene die Bereitstellung einer bestmöglichen Gebrauchsqualität der Straßeninfrastruktur unter Berücksichtigung der finanziellen Mittel ist und erst die nachgeordneten Ebenen zur Erfüllung dieser Vorgaben den Straßenzustand heranziehen, der zusätzlich zum Gebrauchsverhalten auch die Nachhaltigkeit der Qualität durch Substanzerhalt berücksichtigt.

### 2.3.2 Netzebene

Während die Politikebene allgemeine Anweisungen und Randbedingungen zur Erhaltung eines gesamten Netzes oder Teilnetzes vorgibt, besteht die Aufgabe der Netzebene darin, die Durchführung konkreter Maßnahmen festzulegen. Die wesentlichen Entscheidungen bestehen darin, **zu definieren, welche Maßnahmen auf welchen Strecken zu welchem Zeitpunkt ausgeführt werden sollen**, wobei die tatsächliche Ausführung im Verantwortungsbereich der Projektebene liegt.

Mehrere solche Entscheidungen werden zu so genannten „Erhaltungsprogrammen“ zusammengefasst. Erhaltungsprogramme werden für bestimmte Zeiträume, in der Regel für mehrere, einzelne Kalenderjahre, festgelegt.

Für die Netzebene lassen sich somit folgende straßenzustandsbezogene Fragestellungen formulieren:

- **Wie ist das Netz in Bauabschnitte einzuteilen?**

Da die Erhaltungsplanung mit Ausnahme der betrieblichen Erhaltung auf längeren Baulosen durchgeführt wird, sind diese zu definieren. Auf der Netzebene er-

folgt diese Einteilung zunächst nur grob, da die Detailplanung Aufgabe der nachgeordneten Ebene ist.

- **Wie verhält sich der Zustand eines Bauabschnitts mit und ohne Maßnahme?**

Dies beinhaltet auch die Frage nach dem prognostizierten Effekt unterschiedlicher Maßnahmentearten.

- **Welche Abschnitte haben aufgrund ihres Zustands einen dringenden Handlungsbedarf?**

Bei knappen Erhaltungsmitteln stellt sich die Frage nach einer Dringlichkeitsreihung, d.h. welche dieser Abschnitte eine höhere Dringlichkeit haben und somit primär behandelt werden sollen.

- **Durch welches Erhaltungsprogramm ist bei gegebenen Mitteln die Qualität des Netzes zu maximieren?**

Dies ist das so genannte „Finanzszenario“, welches bereits im Rahmen der Politikebene angesprochen wurde. Die Definition der Qualität sollte durch die Politikebene erfolgen, die Maximierung dieser Qualität ist Gegenstand der Erhaltungsprogrammumbildung.

Die Festlegung einer Maßnahme in einem Erhaltungsprogramm durch die Entscheidungsträger der Netzebene bedeutet i.d.R. nicht nur Zeit und Ort festzulegen, sondern auch die Art der Erhaltungsmaßnahme, wobei die Ausführungsdetails noch nicht definiert werden können.

### 2.3.3 Projektebene

Die Projektebene hat die Aufgabe, die auf Netzebene geplanten **Maßnahmen umzusetzen**. Dies beinhaltet eine Reihe von Detailentscheidungen, wie z.B. die genaue Festlegung der Bauabschnittsgrenzen, der Verkehrsführung, des zu verwendenden Materials, des Einbauverfahrens und der Ausführungstermine sowie die Abwicklung des Ausschreibungs- und Vertragswesens für die Baudurchführung. Hierbei müssen verschiedene Fragen beantwortet werden.

- **Welche Ursachen sind für das vorhandene Schadensbild verantwortlich?**

Anhand der Schadensausprägung unterschiedlicher Merkmale und durch zusätzliche Materialanalysen können Rückschlüsse auf die Schadensursachen, z.B. mangelnde Entwässerung, ungenügende Verdichtung oder Unterdimensionierung, gezogen werden und die Maßnahmeausführung kann anhand dessen angepasst werden.

- **An welcher Stelle sind die jeweiligen Straßenschäden exakt lokalisiert?**

Diese z.T. metergenaue Schadenslokalisierung dient der Festlegung der genauen Maßnahmegrenzen.

- **Welche exakte Lage und welche Gewerke sollen für die Baulose festgelegt werden?**

Die detaillierte Baulosfestlegung der Projektebene bildet die Grundlage für die Ausschreibung und Durchführung der Erhaltungsmaßnahme.

Es wird ersichtlich, dass der Detaillierungsgrad der benötigten Informationen für die Projektebene sehr hoch ist und allein durch die netzweiten Zustandserfassungs- und -bewertungskampagnen nicht ausreichend abgedeckt wird. Häufig sind zur genauen Ausführungsplanung zusätzliche Ortsbegehungen und eventuell auch Nachmessungen oder Zusatzuntersuchungen, wie z.B. Tragfähigkeitsmessungen oder Bohrkernentnahmen, notwendig. In Deutschland wird die Arbeit auf der Projektebene durch die netzweit verfügbaren Rohdatendarstellungen mit meterweise abgebildeten Querneigungen, Einzelschäden, Spurrinntiefen und anderen Merkmalen unterstützt, während in Österreich die netzweite Darstellung projektspezifischer Zustandsmerkmale aus Kostengründen nicht durchgeführt wird.

### 3. Der Prozess der Zustandsdatenanalyse

Die Ermittlung der zur Straßenzustandsanalyse benötigten Zustandsdaten beinhaltet mehrere, aufeinander aufbauende Arbeitsschritte. Hierbei wird versucht, anhand der realen Straßeninfrastruktur objektive Zahlen über den Zustand der Straße zu erhalten. Der hierfür notwendige Auswerteprozess beginnt mit der Zustandserfassung, geht über die Ermittlung von Rohdaten, die Ermittlung von Zustandsgrößen, die Normierung und die Teilwertermittlung und läuft schließlich in die Gesamtwertermittlung (siehe Abbildung 4).

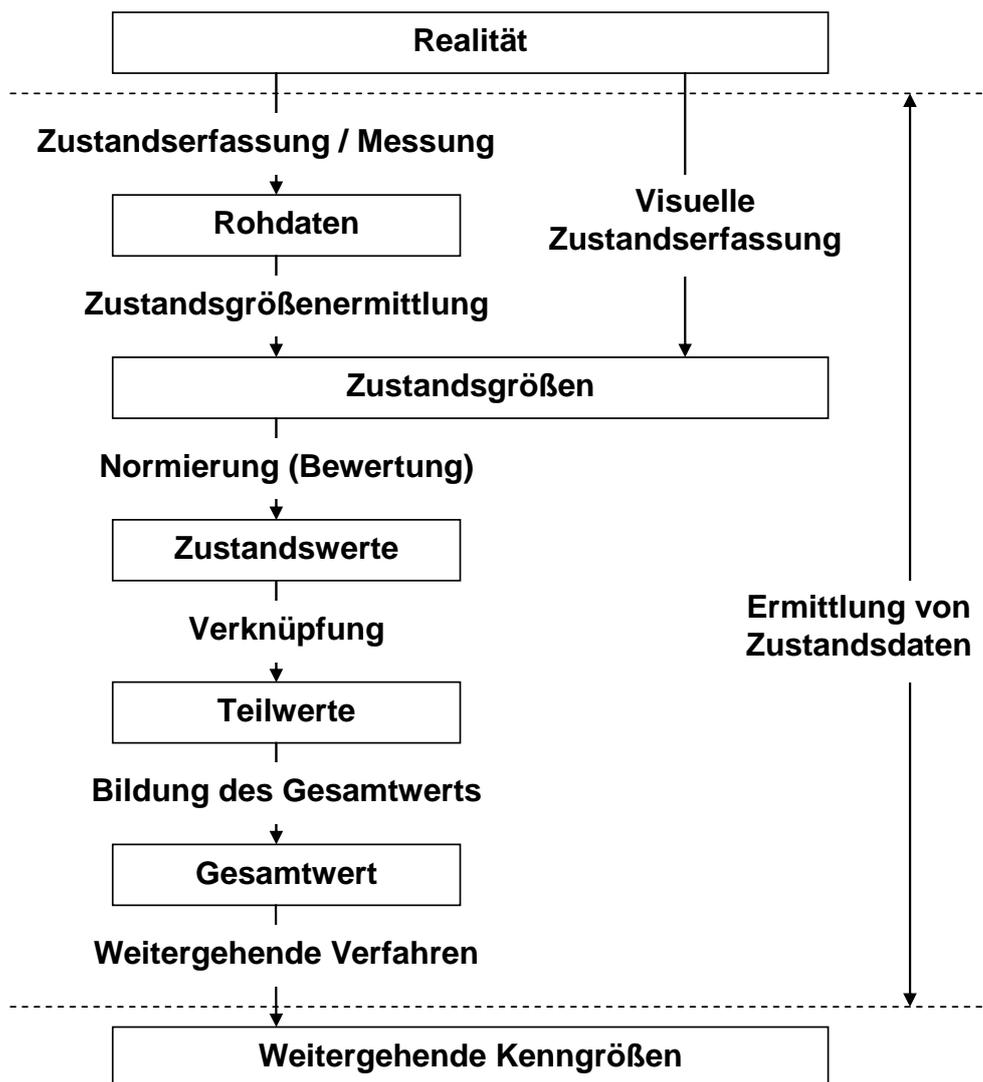


Abbildung 4: Teilprozesse und Zwischenergebnisse der Ermittlung von Zustandsdaten

Um eine korrekte Auswertung von Zustandsdaten durchführen zu können, ist es notwendig, zu wissen, welche Annahmen in den Daten enthalten sind. Bei der Durchführung der einzelnen Teilprozesse werden den resultierenden Datengruppen zusätzliche Annahmen hinzugefügt, um weitergehende Aussagen zu ermöglichen. So wird beispielsweise im Rahmen der Zustandsgrößenermittlung aus den Rohdaten eine Aussa-

ge zur Spurrinnentiefe ermittelt, wobei die exakte Form der Querunebenheit verloren geht. In den **Kapiteln 4 bis 6** werden diese Details der jeweiligen Teilprozesse beschrieben.

Die Ermittlung des Gesamtwertes ist nicht das Ende des Auswerteprozesses, sondern die Daten werden einer weitergehenden Nutzung zugeführt. Solche weiterführenden Auswerteverfahren sind Gegenstand der Ausführungen ab dem **Kapitel 7**.

Nachfolgend werden zunächst die Teilprozesse und Zwischenergebnisse kurz beschrieben. Anschließend wird der Aspekt der Datendichte der einzelnen Zwischenergebnisse behandelt.

### 3.1 Teilprozesse und Zwischenergebnisse

Der Anfang des Gesamtprozesses steht grundsätzlich die **Zustandserfassung**. Hierbei wird versucht, die physikalische Realität der Straße durch objektive Messwerte oder andere quantifizierbare oder skalierbare Kriterien abzubilden. Aufgrund der zugrunde liegenden Zieldefinition werden ausschließlich **Zustandsmerkmale** betrachtet, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie im direkten oder indirekten Zusammenhang mit dem Gebrauchsverhalten stehen. Auch die Erfassung der so genannten „Substanzmerkmale“ betrachtet diese nur insofern, als davon ausgegangen werden kann, dass die aufgenommenen Substanzschäden Indikatoren für ein längerfristiges Gebraucheinschränkungspotential darstellen.

Die Ergebnisse der Zustandserfassungen sind zunächst die so genannten **Rohdaten**, welche sich durch eine hohe Datendichte pro Erfassungstrecke auszeichnen und zum Teil auch Daten beinhalten, die nicht direkt als Zustandsdaten bezeichnet werden können, sondern eine Beschreibung der Fahrbahn liefern (z.B. Höhenpunkte von Querprofilen, nicht aber Spurrinnen). Die systematische, standardisierte Aufzeichnung und Dokumentation von Rohdaten wird in Österreich derzeit (Jahr 2006) nicht praktiziert.

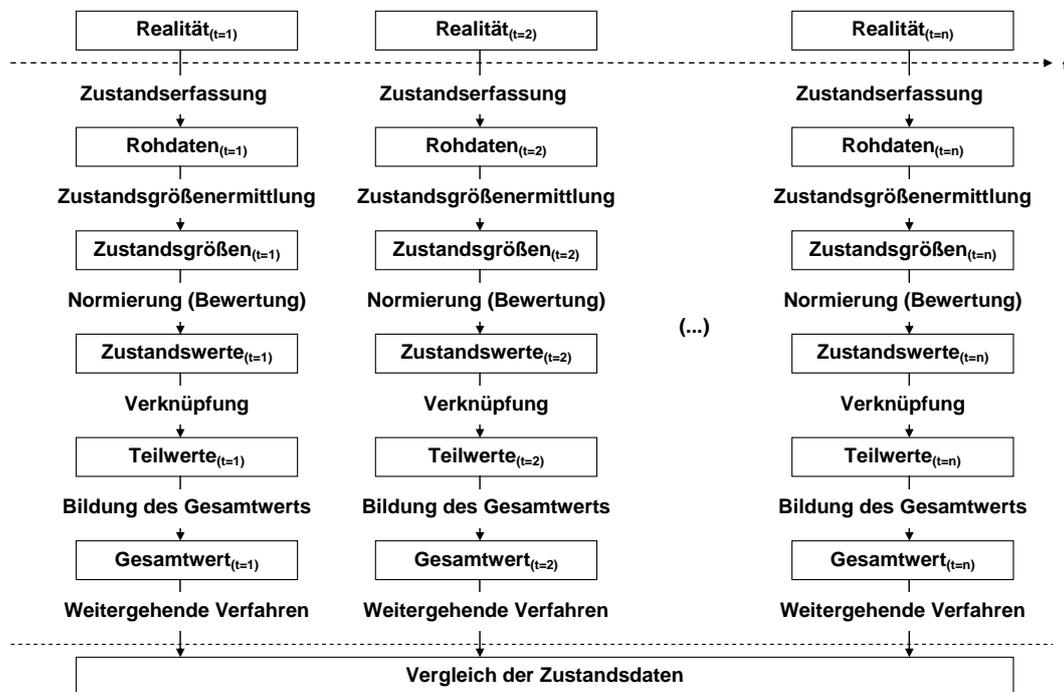
Der sich an die Erfassung anschließende Arbeitsschritt ist die Ableitung der **Zustandsgrößen**. Dieser Vorgang beinhaltet zwei Teilaspekte. Zum einen werden aus den zunächst noch zustandsfremden Datenmodellen (z.B. dem Querprofil) zustandsbezogene Kenngrößen (z.B. Spurrinnentiefe) ermittelt. Zum anderen werden die Daten längerer Strecken zu Auswerteabschnitten (Messabschnitte) aggregiert. Bei der visuellen Erfassung werden Zustandsgrößen direkt für zuvor festgelegte Erfahrungsabschnitte aufgenommen. Zustandsgrößen werden je nach Merkmal in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt, z.B. Spurrinnen in Millimetern.

Aufbauend auf die Zustandsgrößen werden durch die Normierung (auch Bewertung genannt) **Zustandswerte** ermittelt. Diesem Prozess liegt ein Wertehintergrund zugrunde, der die dimensionsbehafteten Zustandsgrößen in dimensionslose Werte überführt, deren Wertebereich in Anlehnung an das „Schulnotensystem“ zwischen 1 und 5 liegt.

Mehrere Zustandswerte werden zu den beiden **Teilwerten** „Substanzwert“ und „Gebrauchswert“ verknüpft. In Österreich werden hierfür auch die Begriffe „Substanzindex“ und „Gebrauchsindex“ verwendet.

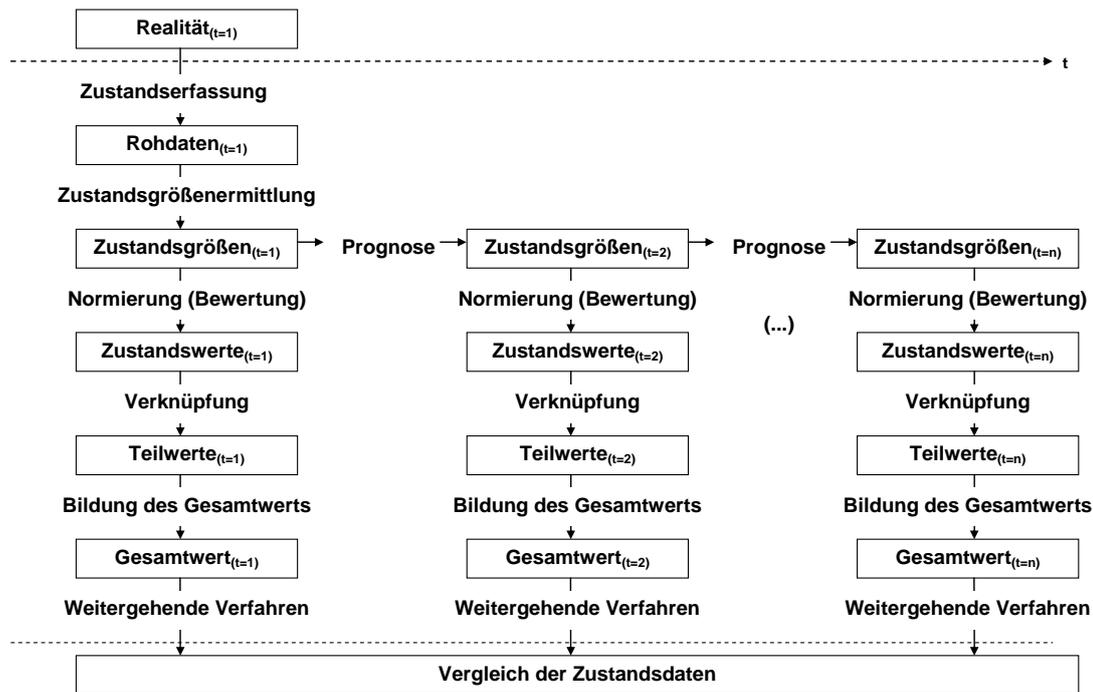
Das abschließende Zustandsdatum ist der **Gesamtwert**, welcher als meist Maximum der beiden Teilwerte definiert ist und eine gesamtheitliche Bewertung der Straße darstellt.

Die obigen Teilprozesse gelten für die einmalige Analyse eines statischen IST-Zustands. Für einige der im Kapitel 2 genannten Anwendungsfälle steht der Vergleich verschiedener Zustände, d.h. die Betrachtung der Zustandsdynamik im Vordergrund. Hierbei können sowohl reale als auch prognostizierte Zustände miteinander verglichen werden, so dass je nach Aufgabenstellung verschiedene Teilprozesse aufgrund einer aktualisierten Datenbasis wiederholt werden müssen. Für den Vergleich realer Zustände, die aufgrund wiederholter Zustandserfassungen ermittelt werden, ergibt sich beispielsweise der Arbeitsablauf aus Abbildung 5.



**Abbildung 5: Arbeitsprozesse zur Betrachtung der Dynamik realer Zustände**

Hierbei wird die Veränderung der Realität über die Zeit aus den regelmäßig aufgezeichneten Daten ermittelt. Demgegenüber muss bei dem Vergleich prognostizierter Zustandsdaten auf die Werte aufgesetzt werden, für die ein Prognosemodell vorhanden ist. Dies sind in Österreich die Zustandsgrößen (siehe Abbildung 6), in Deutschland derzeit noch die Zustandswerte. Letzteres soll zukünftig, auf der Basis von laufenden [7] bzw. abgeschlossenen [62] Forschungsaktivitäten geändert werden.



**Abbildung 6: Arbeitsprozesse zur Betrachtung prognostizierter Zustandsdynamiken**

Die weitergehenden Analysen zum Vergleich realer und prognostizierter Zustandsdaten können gleichartig entworfen werden, die Unterschiede ergeben sich ausschließlich in der Ermittlung der Datengrundlage.

### 3.2 Datendichte

In den nachfolgenden Kapiteln wird unter anderem ein Überblick über die Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit moderner Zustandserfassungssysteme gegeben und gezeigt, dass diese Systeme die Eigenschaften der Straßenoberfläche mit einer hohen Dichte aufzeichnen und digital speichern können, so dass beispielsweise Spurrinnentiefen für jeden einzelnen Streckenzentimeter ermittelt werden können. Um eine detaillierte Schadensanalyse durchführen zu können, erscheint es angebracht, dass bei der Erfassung zunächst eine größtmögliche Genauigkeit angestrebt werden sollte. Bei der anschließenden Auswertung sollten die Daten jedoch zusammengefasst werden, um sie für die jeweilige Aufgabenstellung anwenden zu können.

Die hier beschriebenen Verfahren der Zustandsanalyse werden in der Regel auf größeren Straßennetzen angewendet. Angesichts der Leistungsfähigkeit moderner Zustandserfassungssysteme führt dies im Rahmen einer vollständigen Erfassung zu einer relativ großen Datenmenge. Die Datendichte, welche durch solche Systeme geleistet werden kann, beträgt zum Teil mehr als tausend Messwerte pro laufenden Fahrstreifenmeter.

Die Praxis der letzten Jahre besteht darin, größere Strecken oder ganze Netze zunächst mit einer hohen Dichte zu erfassen, die Daten jedoch durch die Auswertever-

fahren anschließend wieder zu aggregieren, so dass die Datendichte der Auswertergebnisse geringer wird und somit geringere Datenmengen weiterverarbeitet werden müssen. Dies wird vor allem deswegen durchgeführt, da die auf die Zustandsdaten aufsetzenden Nutzungen hinsichtlich des praktisch verarbeitbaren Datenvolumens eingeschränkt sind. Dies gilt sowohl für DV-gestützte Verfahren (z.B. PMS), als auch für manuelle Analyseverfahren (z.B. der Sichtung und Beurteilung von Zustandskarten durch Experten). Da bei jeder Aggregation Informationen verloren gehen, wurden die angewendeten Aggregationsverfahren darauf ausgerichtet, die relevanten Informationen zu übernehmen und nur die irrelevanten herauszufiltern. Aufgrund der bisherigen Praxis kann die folgende Unterscheidung eingeführt werden:

- Datendichte während der Erfassung
- Datendichte der standardisierten Rohdaten
- Datendichte der Auswerteabschnitte / Messabschnitte (Erfassungsabschnitte)
- Datendichte der Erhaltungsabschnitte / Homogenen Abschnitte
- Datendichte der Teilnetzkenngößen

Diese werden nachfolgend im Einzelnen erläutert.

### 3.2.1 Erfassungsdichte während der Erfassung und auf Rohdatenebene

**Während der Erfassung** werden Daten mit einer messsystemspezifischen, hohen Datendichte aufgezeichnet. Beispielsweise wird beim Querebenenmesssystem des ARGUS-Erfassungsfahrzeugs eine Leistungsfähigkeit von 50.000 Abtastungen pro Sekunde angegeben. Unter Annahme der Einhaltung der Sollmessgeschwindigkeit auf Bundesstraßen von 60 km/h ( $\approx 16,7$  m/s) entspricht dies einer Datendichte von 3.000 Einzelwerten pro laufenden Fahrstreifenmeter. Dies ist mit der Anzahl der eingesetzten Lasersensoren zu multiplizieren, so dass bei 33 Lasersonden 99.000 Datenwerte pro Meter erhoben werden könnten. Dieser theoretischen Maximalleistung der Abtastung sind durch Einschränkungen bezüglich der Übertragungs- und Aufzeichnungsraten zum Datenträger sowie durch den begrenzten Datenspeicher praktische Grenzen gesetzt.

Da die Datendichte während der Erfassung je nach eingesetztem Messsystem variiert und zum Teil eine unverarbeitbar hohe Datenmenge erzeugt wird, wurde in Deutschland ein **standardisiertes Rohdatenformat** erarbeitet, dessen Datendichte sowohl von allen zugelassenen Messsystemen leistbar ist, als auch den Anforderungen einer metergenauen Zustandsanalyse genügt. Das Format hat den Zweck, die Messdaten mit einer solchen Präzision zu dokumentieren, dass darauf aufbauend die weitergehenden Auswertungen, insbesondere die Ermittlung der Zustandsgrößen, ohne zusätzliche Daten möglich werden. Für die oben genannte Querebeneheit ergibt sich eine Da-

tendichte von einem Querprofil pro laufenden Meter, wobei ein Querprofil aus bis zu 33 Höheneinzelwerten besteht.

### 3.2.2 Abschnitte

Da die aus der Erfassung bzw. Rohdatenerstellung resultierende Datendichte für die meisten Auswertezwecke noch immer zu hoch ist, muss eine weitergehende Date-naggregation stattfinden. In der Praxis wird die erfasste Strecke nach bestimmten Gesichtspunkten in mehrere Abschnitte eingeteilt. Je nach Anwendungshintergrund und Bildungsverfahren werden die gebildeten Abschnitte unterschiedlich bezeichnet. Häufig anzutreffende Begriffe sind:

- Messabschnitte
- Erfassungsabschnitte
- Auswerteabschnitte
- Homogene Abschnitte
- Erhaltungsabschnitte

In Österreich werden die Messdaten aus der Zustandsmessung mit schnellfahrenden Fahrzeugen in **Messabschnitte** eingeteilt. Die Bildung von Messabschnitten erfolgt nicht anhand von Streckeneigenschaften, sondern ausschließlich aufgrund einer vor der Messung festgelegten Abschnittslänge. Die Regellänge der Messabschnitte wurde in der messtechnischen Zustandserfassung im Jahr 2004 auf 50 m festgelegt. Die Messabschnittsbildung beginnt am Startpunkt der Erfassung und es werden in Befahrungsrichtung, im Abstand der vorgegebenen Messabschnittslänge, regelmäßig Abschnittsunterbrechungen eingefügt.

Für die visuelle Erfassung des Straßenzustands wird demgegenüber bereits im Vorfeld der Erfassung eine Einteilung der Strecke in **Erfassungsabschnitte** vorgenommen. Die Abschnittseinteilung kann hierbei sowohl aufgrund einer Regellänge als auch aufgrund von bautechnischen Bedingungen (Änderung der Fahrbahnbreite, der Fahrstreifenanzahl oder der Deckenbauweise) erfolgen. Die zuletzt durchgeführte visuelle Zustandserfassung in Österreich basierte auf einer Erfassungsabschnittslänge von 500 m auf Bundesstraßen der Kategorien A und S und 200 m auf Straßen der Kategorie B. Die Abschnittsbildung erfolgte richtungsunabhängig aufgrund der Kilometerzeichen. In früheren Messungen wurden Erfassungsabschnitte auch anhand der Homogenität des Schadensbildes festgelegt.

Der **Auswerteabschnitt** ist ein feststehender Begriff der Zustandserfassung und -bewertung in Deutschland und hat in der aktuellen Fachliteratur den zuvor verwendeten Begriff des Erfassungsabschnitts ersetzt. Erfassungsabschnitte der älteren Literatur

in Deutschland sind somit nicht mit den Erfassungsabschnitten aus Österreich gleichzusetzen. Auswerteabschnitte haben auf den Bundesfernstraßen außerorts eine festgelegte Regellänge von 100 m und innerorts<sup>2</sup> von 20 m und gelten sowohl für messtechnische, als auch für visuelle Zustandserfassungen. Der Begriff leitet sich daher ab, dass auf dem Abschnitt eine komplette Auswertung der gemessenen und erfassten Zustandsdaten bis zur Bildung des Gesamtwerts erfolgt. Die Bildung von Auswerteabschnitten erfolgt beginnend mit jedem Netzknoten, in Stationierungsrichtung, im Regelabstand bis zum folgenden Netzknoten. Endständige Auswerteabschnitte haben daher in der Regel eine kürzere Länge als die Regellänge.

Die Bestimmung der Abschnittsgrenzen für **Homogene Abschnitte** kann aufgrund verschiedener fachlicher Kriterien erfolgen, wobei angestrebt wird, dass die Abschnitte hinsichtlich bestimmter Merkmale weitestgehend gleiche Eigenschaften aufweisen. In der Regel bezieht sich die Homogenität auf Zustandsmerkmale, wobei z.T. mehrere Zustandsmerkmale gleichzeitig betrachtet werden und somit eine merkmalsübergreifende Gleichförmigkeit angestrebt wird. Gleichzeitig werden zusätzliche Kriterien zur Abschnittsbildung herangezogen, wie z.B. Unterschiede im Oberbau (Bauweisenwechsel), Unterschiede in der Verkehrsbelastung (Zu- und Abströme), signifikante Breitenunterschiede oder verschiedene Verwaltungseinheiten (Bauamtsgrenze, Landesgrenze). Die exakte Umsetzung der Bildung Homogener Abschnitte variiert sowohl in Deutschland als auch in Österreich je nach Einzelfall. Es existieren unterschiedliche Ansätze [5], [8], [9], die je nach Aufgabenstellung eingesetzt werden und somit zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Für die Erhaltungsplanung sowie für die Werkzeuge der Erhaltungsplanung, wie z.B. das PMS, ist zudem die Bildung von **Erhaltungsabschnitten** von besonderer Bedeutung. Erhaltungsabschnitte bilden die Grundlage der Erhaltungsplanung und können bei einer Bauausführung mit Baulosen bzw. mit Bauabschnitten gleichgesetzt werden. Die Bildung erfolgt anhand von bautechnischen und administrativen Kriterien, wie z.B. aufgrund von Bauweisenwechseln, Ortsdurchfahrten oder Bauamtswechseln. Darüber hinaus werden Erhaltungsabschnitte in der Praxis fallbezogen gebildet, d.h. sie werden dann festgelegt, wenn eine Erhaltungsmaßnahme ansteht. Die genauen Abschnittsgrenzen werden dann vor allem anhand eines über längere Strecken konstant schlechten Straßenzustands gebildet. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Bildung separater Erhaltungsabschnitte für Ingenieurbauwerke.

Eine Analyse der österreichischen PMS-Datenbank ergab eine durchschnittliche Erhaltungsabschnittslänge von 837 m, wobei aber auch die verhältnismäßig kurzen Bauwerksabschnitte berücksichtigt werden. Wenn die Bauwerke ausgeschlossen werden, ergibt sich eine durchschnittliche Länge von 1.116 m. In Deutschland ergab sich bei einer entsprechenden Auswertung eine durchschnittliche Erhaltungsabschnittslänge von 1.910 m.

---

<sup>2</sup> Die Auswerteabschnitts-Regellänge von 20 m innerhalb von Ortsdurchfahrten wurde 2003 erstmalig auf Bundestrassen eingeführt.

Für die Anwendung von Pavement-Management-Systemen wird häufig der Begriff des Erhaltungsabschnitts mit dem PMS-Abschnitt gleichgesetzt. Diese Bezeichnung beruht auf dem PMS-Mechanismus, für den Berechnungsabschnitt Maßnahmen vorzuschlagen, d.h. die intern geführten Abschnitte als Baulose zu behandeln. In der Praxis sind die PMS-Abschnitte aber eher den homogenen Abschnitten gleichzusetzen, da vor allem die Homogenität der zu prognostizierenden Zustandswerte für die Modellberechnungen im Vordergrund steht.

### **3.2.3 Teilnetze**

Neben der streckenbezogenen Analyse von Zustandsdaten existiert der häufige Anwendungsfall, dass die gesamten Daten eines Netzes zu einer oder mehreren Kennzahlen zusammengefasst werden. Dies kann beispielsweise der Mittelwert der Gesamtwerte aller Auswerteabschnitte oder der prozentuelle Anteil aller Strecken mit einer Griffigkeit unter dem Schwellenwert sein. Zusätzlich zur Betrachtung des gesamten erfassten Netzes kann es von Interesse sein, Teilnetze z.B. anhand von Landes-, Bezirks- oder Bauamtsgrenzen zu bilden und dafür Kenngrößen zu ermitteln. Die Bildung von Teilnetzen kann auch anhand nichtgeographischer Kriterien erfolgen, z.B. kann ein „Teilnetz aller Betonstrecken“ oder ein „Teilnetz aller Bundesstraßen der Kategorie S“ gebildet werden. Die Datendichte für Teilnetze ist nicht bestimmbar, da aus der zugrunde liegenden Datenmenge eine unüberschaubare Vielzahl an statistischen Kenngrößen gebildet werden kann. In der Praxis konzentriert sich die Auswertung netzweiter Kenngrößen auf einige wenige Werte und weist daher stets eine verhältnismäßig kleine Datendichte auf.

## 4. Zustandsmerkmale und -erfassung

Zur systematischen Erhaltungsplanung eines Straßennetzes ist es notwendig, dessen Zustand anhand von objektiven Kriterien beurteilen zu können. Aus diesem Grund werden netzweite Straßenzustandserfassungen durchgeführt. Im Zusammenhang mit dem Straßenzustand wird in der Regel von „Erfassung“ anstatt von „Messung“ gesprochen, da nicht in allen Fällen Messtechnik angewendet wird, sondern zum Teil auch visuell gestützte Erfassungsverfahren eingesetzt werden.

In der aktuellen Praxis hat es sich bewährt, zur Beurteilung des Straßenzustands unterschiedliche, im Wesentlichen voneinander unabhängige Merkmale gleichzeitig zu berücksichtigen. In weiterführenden Analyseschritten werden diese Merkmale in ihrem Zusammenhang betrachtet und zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt. Die Erfassung der einzelnen Merkmale kann mithilfe verschiedener Verfahren erfolgen.

Grundsätzlich kann zwischen **visuellen**, **sensitiven** und **messtechnischen** Straßenzustandserfassungen unterschieden werden. Die visuellen und sensitiven Erfassungen (häufig als visuell-sensitive Erfassungen zusammengefasst) werden i.d.R. durch geschultes Personal vorgenommen, welches die zu untersuchenden Strecken nach bestimmten, weitestgehend objektiven Kriterien beurteilt. Um bei visuellen Zustandserfassungen eine größtmögliche Objektivität zu erzielen, werden i.d.R. Kataloge mit Schadensbeispielen und den zugehörigen Standardbeurteilungen erarbeitet. In Österreich sind dies der „Österreichische Schadenskatalog“ [10] und die „Arbeitsanweisung zur visuellen Zustandserfassung 2000“ [11]. In Deutschland wird für diese Zwecke der „Katalog typischer Schadensbilder auf Bundesautobahnen“ [12] verwendet.

Visuell-sensitive Verfahren erfordern in der Regel Ortsbegehungen und können daher nicht mit schnellfahrenden Fahrzeugen durchgeführt werden. Aufgrund der damit verbundenen geringen Leistungsfähigkeit sind diese Verfahren für großflächige Zustandserfassungen weniger geeignet. Hiervon gibt es aber auch Ausnahmen, wie z.B. die Unebenheitsbeurteilung aufgrund des subjektiven Empfindens während einer Streckenbefahrung. Visuell-sensitive Erfassungen können durch punktuelle Messverfahren, wie z.B. die Unebenheitsmessung mittels 4 m-Richtlatte [13] oder die Griffigkeitsaufnahme mittels SRT-Reibungspendel [14] ergänzt werden.

Aufgrund des mit diesen Verfahren verbundenen, hohen personellen Aufwands ist die Leistungsfähigkeit visuell-sensitiver Verfahren sowie punktueller Messungen verhältnismäßig gering. Für die Zustandserfassung großer Streckennetze, wie z.B. des Bundesstraßennetzes in Österreich, werden vorwiegend hochleistungsfähige, dynamische Messverfahren eingesetzt, welche für die Erfassung bei hohen Geschwindigkeiten geeignet sind. Die nachfolgende Übersicht beschränkt sich auf solche Verfahren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen Methoden zur Zustandsanalyse auf Netzebene behandelt werden. Da diese Methoden in der Regel weitestgehend vollständige

Daten des Untersuchungsnetzes voraussetzen, werden nachfolgend nur Erfassungssysteme vorgestellt, welche in Österreich und in Deutschland für netzweite Zustandserfassungen standardmäßig eingesetzt werden. Die routinemäßig durchgeführten, netzweiten Erfassungen in diesen beiden Ländern betreffen die folgenden Merkmale:

- **Längsebenheit**
- **Querebenheit**
- **Griffigkeit**
- **Textur (nur Österreich)**
- **Oberflächenbild**

Darüber hinaus soll zudem auf die Methode der Straßensubstanzuntersuchung durch Messung der **Tragfähigkeit** mittels Falling Weight Deflektometer (FWD) eingegangen werden, welche zwar derzeit noch nicht im Rahmen einer netzweiten Erfassung durchgeführt wird, für projektbezogene Aufgabenstellungen jedoch eine wertvolle Ergänzung darstellt.

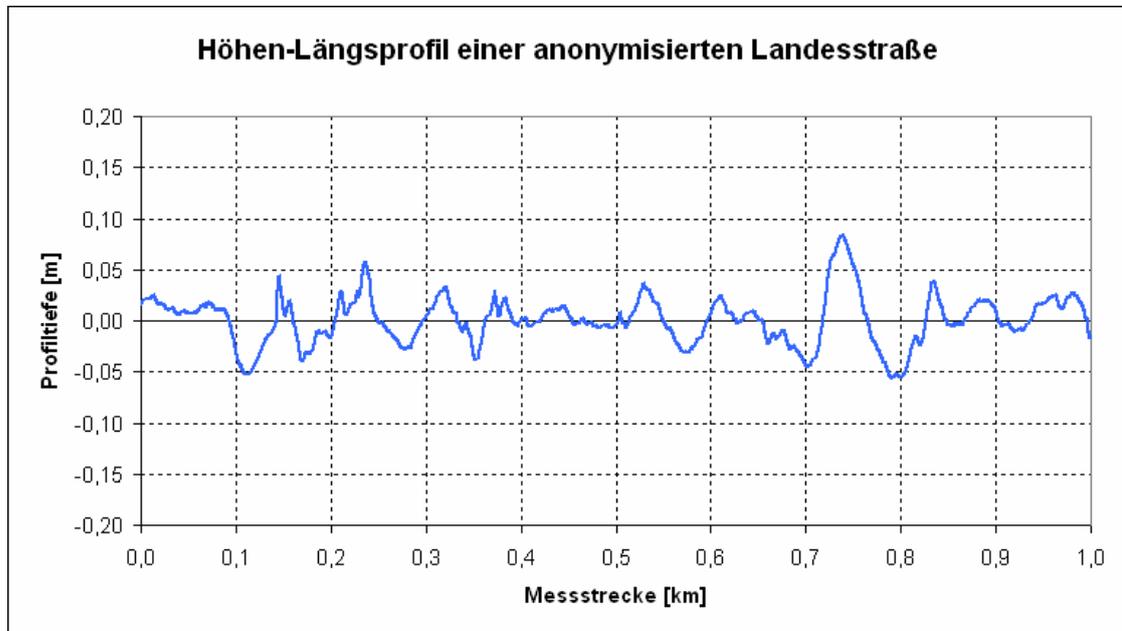
#### **4.1 Längsebenheit**

Das Merkmal Längsebenheit dient zur Beschreibung von Unebenheiten der Straßenoberfläche in Straßenlängsrichtung. Die Längsunebenheiten haben eine besondere Bedeutung für die Zustandsanalyse, da sie sowohl den Fahrkomfort als auch die Nutzerkosten, die Sicherheit und die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn negativ beeinflussen können. Durch das Überfahren der Unebenheiten entstehen Erschütterungen, bei denen sich Verminderungen und Verstärkungen von Fahrzeugauflegekräften einander abwechseln. Verminderungen führen zu geringeren Kraftschlüssen und somit zu einer geringeren Kontrolle des Fahrers über das Fahrzeug, während verstärkte Fahrzeugauflegekräfte zu erhöhten Belastungen und Beschädigungen an Fahrzeug und Fahrbahn führen.

Die Aufnahme der Längsebenheit erfolgt in der Regel entlang einer Erfassungslinie, deren Lage je nach Erfassungsverfahren unterschiedlich definiert ist. Die eindeutige Definition und, damit verbunden, die Sicherheit, mit der diese Erfassungslinie befahren wird, ist ein wesentlicher Faktor, um Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Erfassung sicherzustellen. Um das Spurfindungsverfahren zu verbessern, werden derzeit verschiedene Systeme zur Seitenabstandsführung erprobt, welche in der Lage sind, anhand von optischen Verfahren den Abstand zum linken Rand der rechten Fahrstreifenmarkierung zu messen und den Fahrer bei einer zu hohen Abweichung vom Soll-Abstand zu warnen. Aber auch ohne Unterstützung der Spurfindung können allein durch Aufzeichnung des Seitenabstandes wertvolle Aussagen zur Vergleichbarkeit von

Wiederholungsmessungen bzw. von verschiedenen Jahresmessungen abgeleitet werden.

Die Aufnahmetechnik der Längsebenheit besteht im Wesentlichen darin, entlang einer vorgegebenen Messlinie, in regelmäßigen Abständen Höhenprofilpunkte aufzunehmen. Das Ergebnis dieser Messung ist ein Höhen-Längsprofil wie in Abbildung 7.



**Abbildung 7: Beispiel eines Höhen-Längsprofils aufgrund einer Zustandserfassung**

Da die Einzelpunkthöhen gegenüber einer absoluten Bezugsebene (z.B. Normalnull) unter Umständen sehr große Zahlenwerte annehmen können, wird in der Praxis in Deutschland das wahre Höhen-Längsprofil durch Anwendung eines Berechnungsverfahrens gefiltert, so dass die aufgezeichneten Werte zwar die Unebenheitsverläufe wiedergeben, in der Regel aber nicht unverhältnismäßig weit vom Bezugshorizont entfernt sind. Über die Aufzeichnung des Höhen-Längsprofils der österreichischen Systeme kann keine Aussage getroffen werden, da diese Daten nur intern vorgehalten werden und nach außen bereits die aus den Höhendaten abgeleiteten Zustandsgrößen ausgegeben werden.

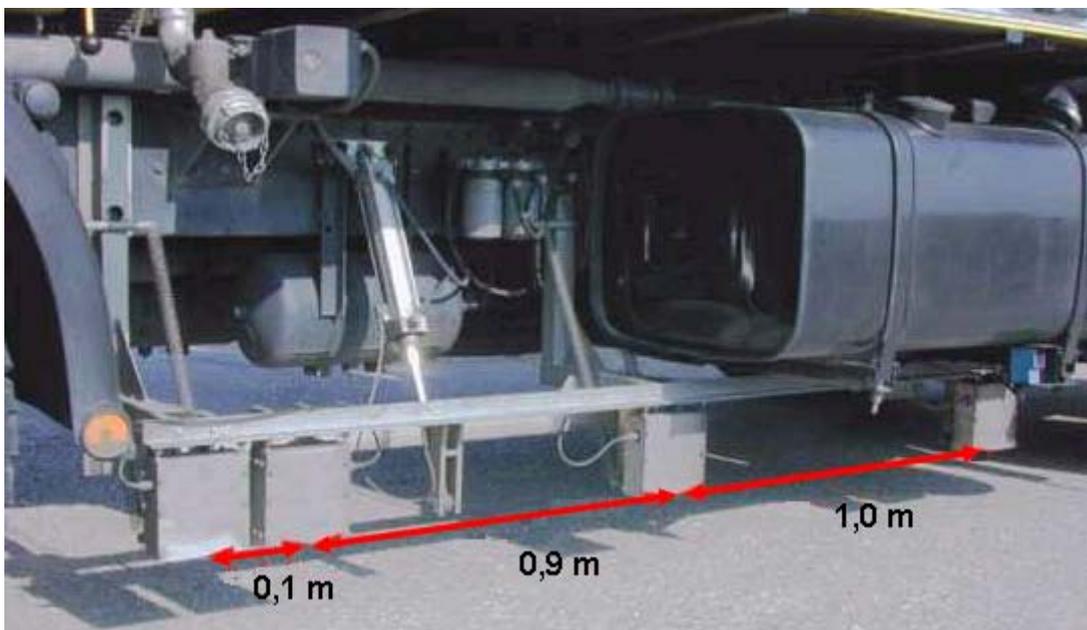
Zur Aufnahme des Längsprofils wird in Deutschland und Österreich derzeit das Prinzip der „berührungsfreien Abtastung“ eingesetzt. Unter diesem Oberbegriff lassen sich verschiedene Systeme zusammenfassen, die ein Ortungssystem mit einem berührungsfreien Unebenheitsabtastungssystem kombinieren. Die Abtastungssensoren können auf Basis von Ultraschall, Laser- oder Infrarot funktionieren und werden mit einem Ortungssystem kombiniert, welches in der Regel auf eine Kombination von Streckenmessung, GPS-Messung und / oder Inertial-Kreiselsystem beruht.

Bei den Systemen mit berührungsfreier Abtastung kann unterschieden werden zwischen:

- Einzelabtastung und
- Mehrfachabtastung.

Bei **Einzelabtastungssystemen** werden die Unebenheiten mit einer einzigen Sonde abgetastet und die Unebenheitshöhen in Bezug auf eine Inertial-Referenzlinie gemessen. Um das tatsächliche Unebenheitsprofil zu bestimmen, muss der absolute Verlauf der Referenzlinie möglichst genau bestimmt werden, was durch die mitgeführten Ortungssysteme geleistet werden muss. Aus diesem Grund ist die Präzision der Ortungssysteme nicht nur für die spätere Zuordnung der Messdaten zur Strecke von Bedeutung, sondern hat auch erheblichen Einfluss auf die Präzision der erfassten Profilhöhen. In der Praxis führt dies zu einer Verringerung der Aufnahmegenauigkeit, da die Ortung des Fahrzeugs über DGPS und Inertial-Kreiselsysteme im Vergleich zu den Infrarot-, Laser- und Ultraschallsystemen der Unebenheitsabtastung eine verhältnismäßig geringe Messpräzision aufweisen.

Dieser Nachteil wird bei **Mehrfachabtastungen** dadurch vermieden, dass jede Unebenheit von mehreren, in unregelmäßigen Abständen, hintereinander angebrachten Sensoren abgetastet wird. Die Position der Sensoren zueinander wird durch eine steife Rahmenkonstruktion konstant gehalten (siehe z.B. Abbildung 8).



**Abbildung 8: Sensorabstände beim RoadSTAR-Längsebenheits-Erfassungssystem [15]**

Durch eine entsprechende Anordnung von vier Sonden lässt sich das wahre Höhen-Längsprofil rechnerisch auch ohne Inertialsystem-Erfassung bestimmen. In Deutschland und in Österreich werden für die netzweiten Erfassungen routinemäßig Systeme

mit vier Lasersensoren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung verwendet. Bei dem in Deutschland verwendeten ARGUS-System sind die vier Messsensoren über eine Länge von 4 Metern verteilt. Es hat eine horizontale Auflösung von 10 cm und eine vertikale Auflösung von 0,025 mm. Das System „RoadSTAR“ aus Österreich (siehe Abbildung 8) verfügt über einen 2 m-Messbalken mit vier Sensoren und erreicht eine vertikale Präzision von 0,1 mm. Beide Systeme können geschwindigkeitsunabhängig betrieben werden und sind mit Ortungssystemen (DGPS und Intertial-Kreiselsystemen) gekoppelt.

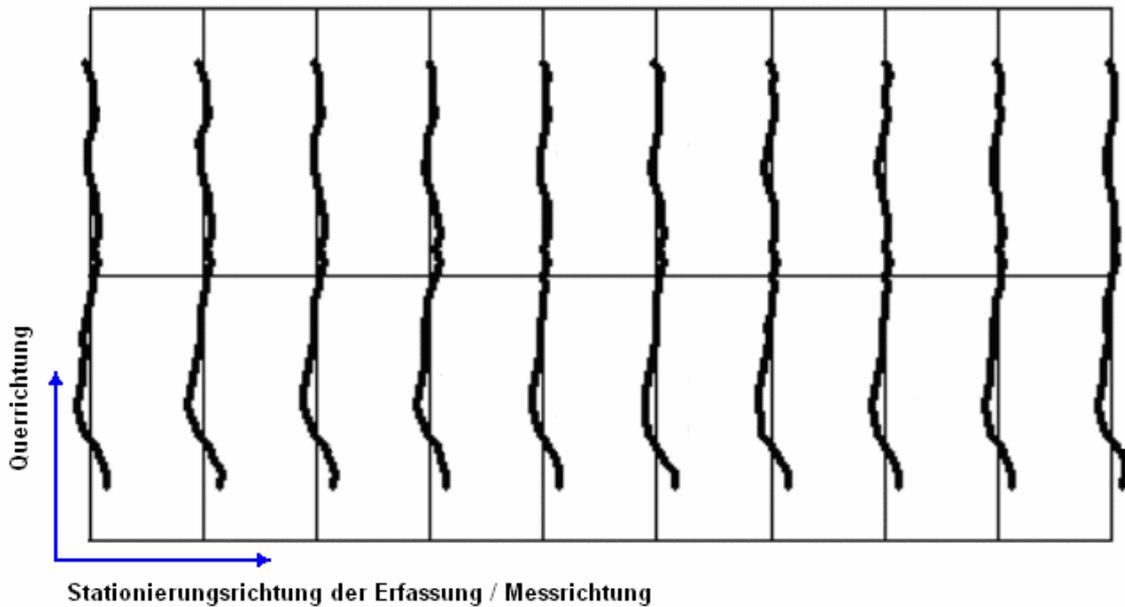
Um die Wiederholbarkeit der Messungen sicherzustellen, gilt die Konvention, Längsebenenmessungen ausschließlich in der rechten Radspur durchzuführen. Die offensichtliche Schwierigkeit ist hierbei für den Fahrer, während der Messung die rechte Radspur sicher zu identifizieren und dieser während der gesamten Messfahrt präzise zu folgen.

## **4.2 Querebenheit**

Dieses Merkmal umfasst die Unebenheiten im Querprofil, welche z.B. im Falle von Spurrinnenbildung sowohl einen direkten Einfluss auf das Gebrauchsverhalten und die Verkehrssicherheit haben als auch Rückschlüsse auf die Verformung bzw. Zerstörung der unterliegenden Schichten erlauben. Spurrinnen beeinflussen das Lenkverhalten vor allem von einspurigen Kraftfahrzeugen und führen aufgrund des möglichen Wasserrückhalts bei Regen zur Aquaplaninggefahr. Sie treten dort auf, wo der Aufbau der vorhandenen Verkehrsbelastung nicht bzw. nicht mehr gerecht wird und entsprechend verformt worden ist.

Die Erfassung der Querebenheit wurde in der Vergangenheit ausschließlich auf Projektebene, ähnlich wie bei der Längsebenheit, manuell mittels einer Messlatte durchgeführt. Hierbei wurde die Latte mit einer Messlänge von 2 m quer über zuvor visuell erkannte Spurrinnen aufgelegt und durch einen eingeschobenen Messkeil die Tiefe gemessen. Bei dem Verfahren wird somit nicht das Querprofil aufgezeichnet, sondern direkt die maximale Spurrinnentiefe eines Untersuchungsabschnittes ermittelt. Das Verfahren erlaubt somit ausschließlich Aussagen zu einer Messgröße, nämlich der Spurrinnentiefe. Weitere Informationen über Spurrinnenform, Spurrinnenabstand oder Wasserhaltungsvermögen können hierdurch nicht gewonnen werden.

Heutige Systeme gehen in der Regel darüber hinaus und haben das Ziel, das gesamte Querprofil eines Fahrstreifens aufzunehmen. Hierzu werden in regelmäßigen Abständen Querprofile des betrachteten Fahrstreifens aufgezeichnet (siehe Abbildung 9).



**Abbildung 9: Exemplarische Folge einzelner Querprofile**

Die Bestimmung der Spurrinnentiefe und anderer Merkmale wird aufbauend auf das vorhandene Querprofil entweder im Post-Processing oder online bereits während der Erfassung durchgeführt. Für die Abtastung des Querprofils haben sich berührungsfreie Lasermessverfahren etabliert. Der wesentlichste Unterschied zwischen den Verfahren besteht in der Anordnung der Lasersensoren. Es kann zwischen der Abtastung mit senkrecht und mit schräg angebrachten Lasersensoren unterschieden werden.

#### **4.2.1 Senkrechte Lasersensoren**

Das Prinzip der Querprofilaufnahme besteht darin, durch mehrere, an einem Querbalken nebeneinander angebrachten Lasersensoren die Fahrbahn regelmäßig abzutasten. In Deutschland wurden im Routinebetrieb bislang ausschließlich Systeme verwendet, bei denen die Lasersensoren äquidistant in einem Abstand von 10 cm angebracht worden sind und senkrecht auf die Fahrbahn ausgerichtet wurden (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Frontansicht des ARGUS-Messsystems [X4]

Das in der ZEB eingesetzte ARGUS-Messsystem verfügt über 33 nebeneinander angebrachte Messsensoren, wodurch maximal eine Fahrstreifenbreite von 3,2 m abgetastet werden kann. Obwohl eine Aufzeichnungsdichte von 50.000 Datenpunkten pro Sekunde möglich ist, wird in der Praxis ein Querprofil pro laufenden Meter aufgezeichnet.

#### 4.2.2 Schräge Lasersensoren

Durch senkrecht abstrahlende Sensoren kann immer nur eine Erfassungsbreite realisiert werden, die gleich der Messbalkenbreite ist. Um bei begrenzter, zulässigen Messbalkenbreite eine größere Erfassungsbreite zu realisieren, wurde bei einigen Systemen, wie z.B. dem in Österreich eingesetzte RoadSTAR (siehe Abbildung 11), dazu übergegangen, die Messbreite durch schräg angebrachte Lasersensoren zu erweitern.

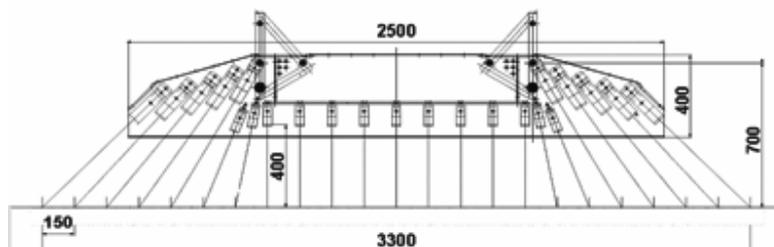


Abbildung 11: Schräge Messsensoren am RoadSTAR-Messsystem [15]

Die Anordnung wurde hier derart gewählt, dass die Messpunkte auf der Straße in der Regel einen einheitlichen Abstand von 15 cm aufweisen. Das Messsystem erlaubt die

Erfassung eines 3,3 m breiten Fahrstreifens bei einer Konstruktionsbreite von 2,5 m. Da dies der zulässigen Fahrzeugbreite entspricht, ist das Fahrzeug in der Lage, die Messung eines kompletten Fahrstreifens im regulären Verkehr durchzuführen. Es können bis zu 10 Querprofile pro Meter aufgezeichnet werden, wobei in der Praxis alle 5 m Kenngrößen zum Querprofil berechnet werden.

Bei der Verwendung von schräg abstrahlenden Lasersensoren sind einige Besonderheiten zu berücksichtigen, die den Einsatz z.T. erschweren. Die schrägen Lasersensoren erfordern aufgrund der größeren Abtastungsentfernung eine größere Abtastungsenergie, um eine gleichwertige Messpräzision erzielen zu können. Die Herstellung, der Betrieb und die Wartung der Geräte sind dementsprechend aufwändiger und kostenintensiver.

Durch die schräge Abstrahlung besteht zudem eine größere Gefahr, dass die Laserstrahlen Objekte und Personen außerhalb der Fahrbahn anstrahlen. Dies kann beispielsweise an Böschungen, bei Brückenüberfahrungen oder durch Reflektion bedingt sein. Der RoadSTAR verwendet derzeit Lasersensoren der Laserklasse 3a, welche bei kurzzeitiger Bestrahlung als ungefährlich eingestuft werden. Da eine weitere Verbreiterung des aufnehmbaren Querprofils eine größere Laserleistung der äußeren Sensoren erfordert, würde hiermit auch die Gefahr für Außenstehende steigen. Aus diesem Grund werden ähnliche Systeme, wie z.B. das System EVA der Bundesanstalt für Straßenwesen, mit einer automatischen Abschaltvorrichtung mit Bewegungssensoren ausgestattet.

Ein weiterer Nachteil der schrägen Lasermessung ist, dass aufgrund der geometrischen Anordnung die Einheitlichkeit der Abstände zwischen den Abtastungspunkten nicht präzise eingehalten werden kann, sondern dass immer eine geringfügige, nicht exakt bestimmbare Differenz vorliegt. Diese Differenz ist aber in der Regel vernachlässigbar.

Demgegenüber besteht der wesentliche Vorteil schräger Messsensoren darin, dass eine größere Fahrstreifenfläche gemessen werden kann, als es durch senkrechte Sensoren, aufgrund der beschränkten Messbalkenbreite zulässig wäre, ohne den Verkehrsfluss zu behindern oder die Messstrecke zu sperren. In Österreich kann, wie in Abbildung 11 skizziert, bei einer Messbalkenbreite von 2,50 m die komplette Fahrstreifenbreite von 3,30 m durch die Sensoren erfasst werden

### **4.3 Griffigkeit**

Die Griffigkeitserfassung hat das Ziel, die Fähigkeit der Straßenoberfläche zu messen, einen Kraftschluss mit dem Fahrzeugreifen herzustellen. Aufgrund der sehr komplexen, physikalischen Vorgänge bei der Interaktion Reifen/Fahrbahn haben viele verschiedene Faktoren (Fahrbahntextur, Reifenprofil, Temperatur, Witterungsverhältnisse, Fahr-

zeuggeschwindigkeit oder Jahreszeit während der Messung) einen erheblichen Einfluss auf die übertragbaren Reibkräfte.

Trotz intensiver Bemühungen [16], [17] und [18] ist es bisher nicht gelungen, ein befriedigendes, physikalisches Modell für diese Vorgänge zu erarbeiten, so dass Griffigkeitsmessungen nach wie vor (Stand 2006) darauf angewiesen sind, Reib- und Bremsvorgänge unter normierten Bedingungen zu simulieren und den dabei erzeugten Kraftschluss zu messen. Eine Messung der Fahrbahntextur mit schnellfahrenden Systemen und eine Ermittlung der Griffigkeit anhand der Mikrotextrur konnte derzeit noch nicht zufrieden stellend realisiert werden.

Bei trockener Fahrbahn wird allgemein davon ausgegangen, dass in der Regel ein ausreichender Kraftschluss vorhanden ist. Die Betrachtung des erzielbaren Reibwertes unter Variation des Reifenschlupfes (siehe weiter unten) zeigt, dass sich bei einem Bremsschlupf von ca. 10 % bis 20 % größere Kräfte übertragen lassen, als bei 100 %, d.h. beim blockierten Rad.

Da moderne Fahrzeuge in der Regel mit ABS ausgestattet sind, finden Bremsvorgänge häufig im Bereich des optimalen Bremsschlupfes statt. Da die tatsächlich, unter Realbedingungen übertragbaren Bremskräfte aus verkehrssicherheitstechnischer Sicht von besonderer Bedeutung sind, wird bei der Griffigkeitserfassung angestrebt, die Umstände des kritischen Bremsvorgangs weitestgehend nachzubilden, d.h. es ist insbesondere der maximal erzielbare Kraftschluss bei Nässe unter optimalem Schlupf von Interesse.

Aufgrund der mangelnden Möglichkeiten direkt aus der Fahrbahntextur auf die Kraftschluss-Übertragungsfähigkeit zu schließen, wird bei der Griffigkeitserfassung mit schnellfahrenden Fahrzeugen ein Messreifen über die zu untersuchende Straßenoberfläche geführt und es wird ermittelt, welche Reibkräfte auf den Messreifen ausgeübt werden. Um eine größtmögliche Wiederholbarkeit der Messungen zu erreichen, werden die Messreifen sowohl in Hinblick auf das Profil als auch auf den Bau der Karkasse, den Radius, die Breite, den Reifeninnendruck und die Materialeigenschaften normiert. Um die Bremsverhältnisse bei nasser Fahrbahn nachzubilden, ist es zudem notwendig, einen Wasserfilm von mindestens 0,5 mm auf die Fahrbahn aufzutragen. Einige Systeme verwenden hierzu eine geschwindigkeitsabhängige Dosiervorrichtung, die bei höheren Messgeschwindigkeiten entsprechend höhere Wassermengen auftragen. Bei großflächigen Erfassungen ist die Vorhaltung ausreichender Wassermenge eine Herausforderung, weswegen einige Geräte mit großen Wassertanks ausgerüstet worden sind.

Griffigkeitsmessungen finden in der Regel ausschließlich in einer der beiden Rollspuren statt, da dort die höchste Verkehrsbeanspruchung vorliegt und durch die damit verbundenen Poliervorgänge die Makrotextrur am stärksten reduziert wird.

Eine weitere Gemeinsamkeit aller Systeme ist die Notwendigkeit einer konstanten Messgeschwindigkeit. Der messbare Reibwert ist keine absolute Größe der Fahrbahn, sondern wesentlich von der Geschwindigkeit des Messfahrzeugs abhängig. Eine Messung, die auch bei einer Wiederholung ähnliche Ergebnisse liefern soll, ist dementsprechend darauf angewiesen, eine annähernd konstante Messgeschwindigkeit einzuhalten.

Um das Prinzip der heutigen Griffigkeits-Messverfahren zu erläutern muss zunächst auf die Unterschiede zwischen

- Messungen mit blockiertem Rad,
- Messungen mit Bremsschlupf sowie
- Messungen mit Seitenschlupf

eingegangen werden.

#### **4.3.1 Blockiertes Rad**

Die einfachste Methode zur Messung des Reibwertes besteht darin, einen Reifen ohne Rollbewegung über die Fahrbahn zu führen und die Widerstandskraft zu messen. Um einen zu schnellen Reifenverschleiß entgegenzuwirken, wird der Reifen regelmäßig, nach einer kurzen Messtrecke, geringfügig weitergedreht.

Diese Erfassungsmethode, welche im Wesentlichen eine Vollbremsung ohne ABS nachbildet, wurde insbesondere zu Beginn der Griffigkeitsmessungen praktiziert. Mittlerweile entsprechen Fahrzeuge ohne ABS nicht mehr dem Stand der Fahrzeugtechnik und ihr Anteil am Gesamtfahrzeugbestand nimmt stetig ab. Die Ergebnisse dieser Erfassungen erlauben daher nur bedingte Aussagen über das tatsächliche Griffigkeits- und Bremsverhalten in der Realität. Aus diesem Grund ist diese Methode für flächendeckende Griffigkeitserfassungen in den Hintergrund gerückt, wird aber noch von vielen Erfassungsgeräten, neben den moderneren Messmethoden, nach wie vor unterstützt.

#### **4.3.2 Konstanter und variabler Bremsschlupf**

Wie bereits erwähnt, können mit einem blockiertem Rad weniger Reibkräfte übertragen werden als mit einem Rad, das mit einem bestimmten Schlupf bewegt wird. Das Phänomen „Schlupf“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Reifen weder über den vollen Umfang frei abrollt noch vollständig blockiert ist, sondern sich in einem Zwischenzustand befindet (siehe Abbildung 12)

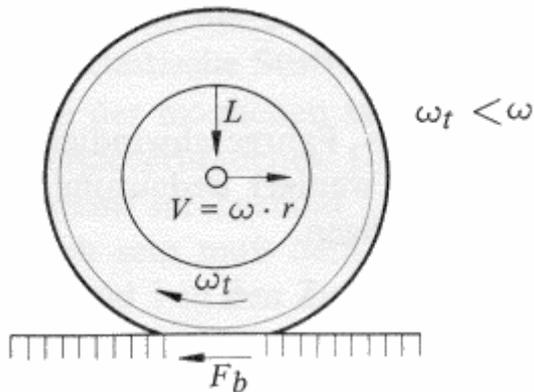


Abbildung 12: Prinzipskizze zum Bremschlupf

Ein Bremschlupf von 15 % bedeutet beispielsweise, dass der Reifen auf einer bestimmten Strecke nur 85 % der Winkelgeschwindigkeit hat, die er beim freien Rollen haben würde bzw. dass er nur 85 % des Reifenumfangs abrollt, obwohl die zurückgelegte Strecke einem vollen Reifenumfang entsprechen würde.

Bei einer Variation des Reifenschlupfes unter ansonsten gleichen Bedingungen kann festgestellt werden, dass der erzielbare Kraftschluss bei ca. 15 % Bremschlupf am höchsten ist. Wenn Reifenschlupf und Reibwert in einem Diagramm aufgetragen werden, ergibt sich die „Schlupfkurve“, welche je nach Messparameter unterschiedliche Werte enthalten kann, i.d.R. aber einen einheitlichen Verlauf hat. In der Abbildung 13 ist eine repräsentative Schlupfkurve wiedergegeben.

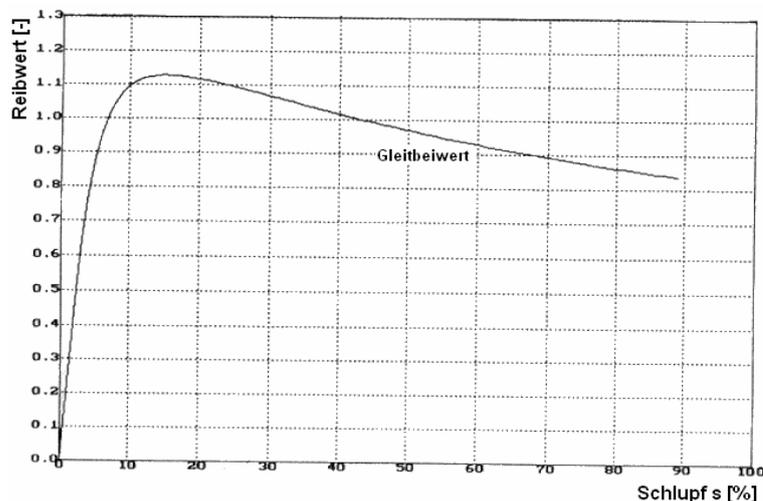


Abbildung 13: Beispiel einer Reibwert-Schlupf-Kurve für einen bremsenden Pkw-Reifen 195/65R15 Pirelli P600 bei 30 km/h auf trockener Fahrbahn [20]

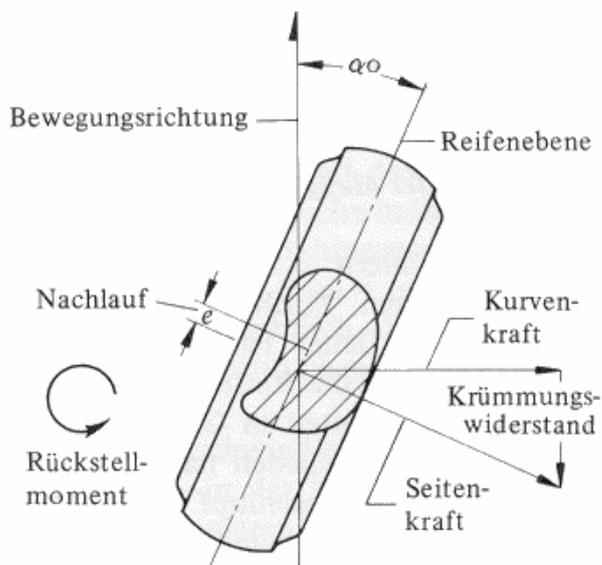
Bei einigen Griffigkeitserfassungssystemen wurde dazu übergegangen, auf den Messreifen einen **konstanten Bremschlupf** aufzubringen. Dadurch können Reibwerte in der Nähe des optimalen Bremsbereiches ermittelt werden.

Eine Analyse der verschiedenen Schlupfkurven auf unterschiedlichen Fahrbahndecken zeigt, dass der Wert des optimalen Schlupfs mit den äußeren Bedingungen variiert. Eine Messung mit konstantem Schlupf entspricht demnach in der Regel nicht dem optimalen Schlupf und korrespondiert nur bedingt mit den realen Verhältnissen eines Bremsvorgangs. Um die Reibverhältnisse einer Bremsung mit ABS besser nachbilden zu können, wurden daher einige Erfassungssysteme mit einem ABS ausgestattet, welches den optimalen Schlupf während der Messfahrt ermittelt und anhand dessen den **Bremsschlupf des Messreifens variiert**.

### 4.3.3 Seitenschlupf

Eine Alternative zur Griffigkeitsmessung mit Bremsschlupf ist die Erfassung des Kraftschlusses unter Seitenschlupf. Hierbei wird ein Rad ohne Bremsschlupf, jedoch mit einer Schrägstellung von  $20^\circ$  zur Fahrtrichtung gezogen und die Zugkraft in Fahrtrichtung mit der Reifenauflegekraft in Beziehung gesetzt, um den „**Seitenkraftbeiwert**“ zu ermitteln.

Wie bei der Kurvenfahrt nimmt der Reifen einen Winkel  $\alpha$  zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs an und fährt dabei mit „**Seitenschlupf**“. Die Bewegung der Elemente in der Reifenaufstandsfläche haben dann eine seitwärts gerichtete Komponente. Der Seitenschlupf wird gemäß Abbildung 14 definiert als  $S_c = \sin(\alpha)$ .



**Abbildung 14: Betriebszustand Seitenschlupf [21]**

Der Seitenschlupf ist die Grundlage des in Deutschland für netzweite Erfassungen eingesetzten Systems SCRIM.

#### 4.3.4 Erfassungssysteme

Mittlerweile werden weltweit eine Vielzahl unterschiedlicher Griffigkeits-Erfassungssysteme angeboten, welche verschiedene Erfassungsprinzipien unterstützen. Einige Systeme verfügen über die Möglichkeit, mehrere Erfassungsprinzipien alternativ oder in Kombination einzusetzen.

In Deutschland werden für weniger umfangreiche Griffigkeitserfassungen hauptsächlich der **Grip-Tester** (s. Abbildung 15) oder der Stuttgarter Reibungsmesser (**SRM** – siehe Abbildung 16) eingesetzt.



**Abbildung 15: Grip-Tester am Anhänger und im Handschiebebetrieb [23]**

Beide Systeme erlauben die Messung mit festem Bremsschlupf. Der Stuttgarter Reibungsmesser (s. Abbildung 16) erlaubt zudem die Messung mit blockiertem Rad und mit ABS.



**Abbildung 16: Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) [24]**

Für die Erfassung mit Seitenschlupf wird die **SCRIM** (Sideway-Force-Coefficient-Routine-Investigation-Machine) eingesetzt, deren Haupteinsatzgebiet die netzweite Erfassung auf Bundesfernstraßen in Deutschland ist (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: SCRIM-Fahrzeug Ansicht und Draufsicht auf den Messreifen (Skizze) [X4]

Die Messungen mittels SCRIM wurden 2001 in der Richtlinie *TP-Griff-StB* [22] standardisiert. Die Einhaltung von bestimmten Mindestwerten gilt erstmals seit 2001 als Abnahmebedingung für Fahrbahndecken gemäß den aktuellen Ausgaben der *ZTV Asphalt-StB* [25] und *ZTV Beton-StB* [26].

In Österreich wird vor allem das Erfassungssystem **RoadSTAR** verwendet (siehe Abbildung 18), welches sowohl die Messung mit blockiertem Rad, als auch mit konstantem Schlupf oder mit ABS unterstützt.



Abbildung 18: Griffigkeitserfassung am RoadSTAR [15]

Zusätzlich wird in Österreich auch lokal der Grip-Tester eingesetzt.

#### 4.4 Oberflächenbild

Die Erfassung des Oberflächenbildes hat das Ziel, sichtbare Schäden an der Fahrbahnoberfläche zu erkennen und zu quantifizieren, um Hinweise auf substantielle Schäden in den untenliegenden Schichten zu gewinnen. Typische Oberflächenschäden sind Risse und beschädigte Betonplatten, aber auch Spuren von Eingriffen, wie z.B. Flickstellen können als erkennbare Hinweise für tiefer liegende Beschädigungen herangezogen werden.

In Deutschland wird grundsätzlich zwischen dem Oberflächenbild von Asphaltstraßen und von Betonstraßen unterschieden. Zu beiden Bauweisen werden nach der ZTV-ZEB [27] standardmäßig unterschiedliche Merkmale ausgewertet. Sonderformen wie z.B. bituminös überbaute Betondecken, unversiegelte Straßen oder Pflasterbauweise werden entweder aufgrund von Ad-hoc-Entscheidungen ausgewertet oder aufgrund ihrer Seltenheit auf den Bundesfernstraßen generell von der Auswertung ausgeschlossen. In Österreich werden für Asphalt- und Betonstraßen unterschiedliche Merkmale erfasst und ausgewertet, für die beiden Bauweisen werden aber im späteren Verlauf der Auswertung gleichnamige Zustandsgrößen (Oberflächenschäden OS und Risse RI) gebildet (siehe Kapitel 5.2.2).

Die Auswertung des Oberflächenbildes beruht historisch auf visuellen Schadenserfassungen, geht aber heute darüber hinaus, da auch nicht oder nur geringfügig beschädigte Strecken aufgezeichnet werden. Somit werden nicht nur Schäden, sondern auch „Nicht-Schäden“ flächendeckend erfasst.

Die messtechnische Erfassung des Oberflächenbildes mit schnellfahrenden Fahrzeugen wird derzeit in Deutschland nur teilautomatisiert durchgeführt und erfordert stets eine kostenintensive, manuelle Nachbearbeitung. In Österreich wurde bis 2005 noch keine netzweite, messtechnische Erfassung des Oberflächenbilds durchgeführt. Das Oberflächenbild wurde dort bisher ausschließlich anhand von visuellen Zustandserfassungen mit Ortsbegehungen aufgenommen. Seit 2006 werden auf den Landesstraßen messtechnische Zustandserfassungen des Oberflächenbildes mit einem Hochleistungserfassungsgerät und nachfolgender manueller Auswertung vorgenommen.

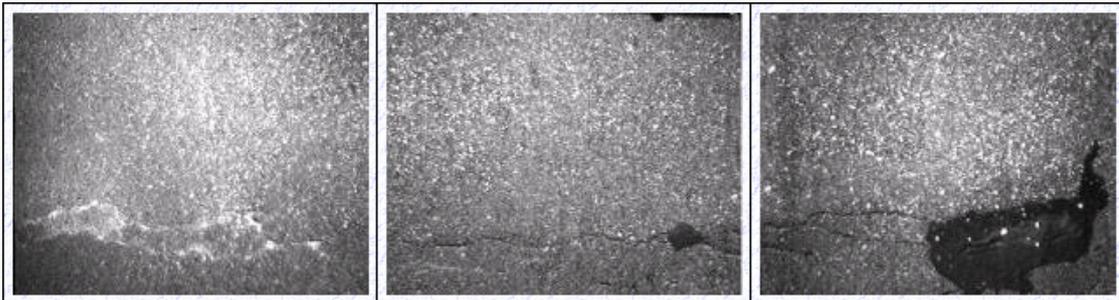
Die Identifikation von Oberflächenschäden sollte stets durch geschultes Personal erfolgen, wobei zur Schulung und zur Abgrenzung der Schäden so genannte „Schadenskataloge“ verwendet werden. Die netzweite, messtechnische Zustandserfassung in Deutschland basiert auf den Schadenskatalog der ZTV-ZEB [27]. In Österreich werden für die visuelle Zustandserfassung der „Österreichische Schadenskatalog“ [10] sowie die „Arbeitsanweisungen zur Visuellen Zustandserfassung“ [11] verwendet.

Nachfolgend werden zunächst die Aufzeichnungs- und Auswerteverfahren für schnellfahrende Systeme vorgestellt. Anschließend werden die aufnehmbaren Merkmale der beiden Bauweisen behandelt.

#### 4.4.1 Videoaufnahmetechnik und visuelle Auswertung

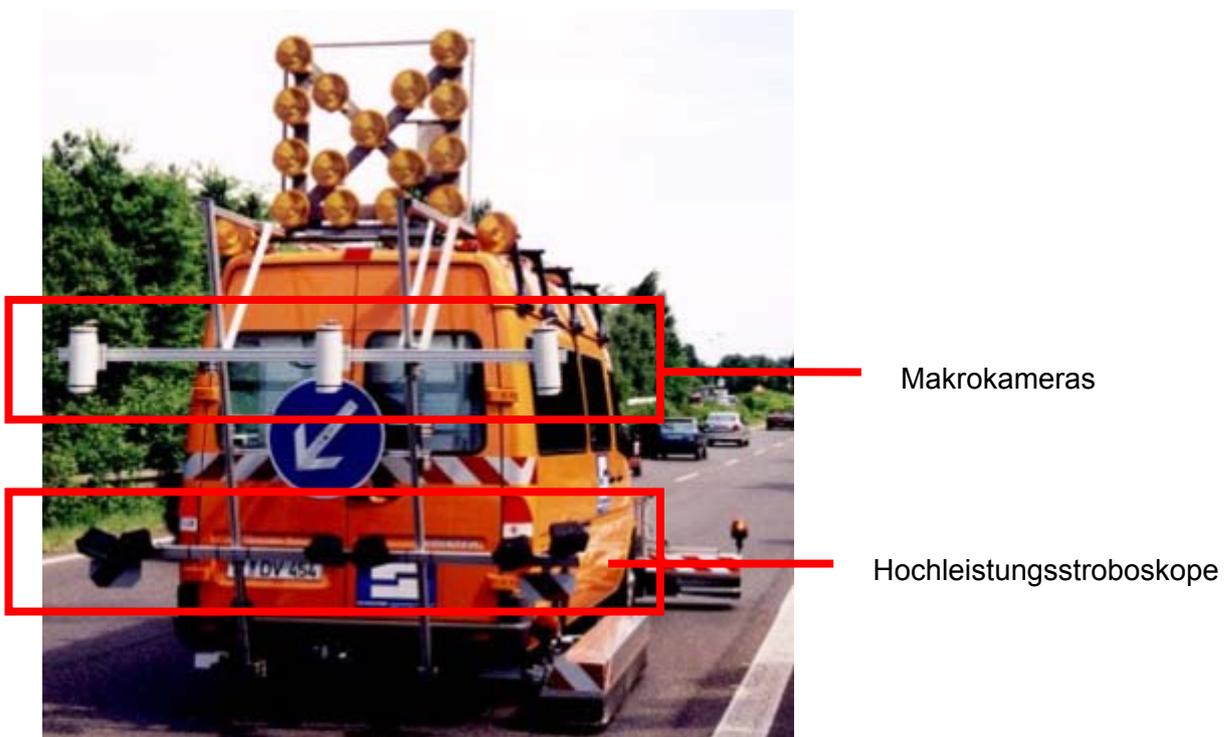
Das derzeit in Deutschland etablierte Erfassungsverfahren für das Oberflächenbild besteht bei schnellfahrenden Messsystemen darin, Bilder der Fahrbahnoberfläche aufzuzeichnen und diese Aufnahmen in einem zweiten Bearbeitungsschritt nachträglich im Labor auszuwerten.

Nach dem aktuellen Standard wird derzeit der Fahrstreifen in Querrichtung in drei Teile (Links, Mitte, Rechts) aufgeteilt und für jeden Meter Erfassungstrecke wird zu jedem der Fahrstreifenteile ein Bild aufgenommen (siehe Abbildung 19).



**Abbildung 19: Bilder der nebeneinander liegenden Fahrstreifendrittel [X4]**

Die Aufzeichnung erfolgt durch Makrovideosysteme, deren Aufnahmebereich durch Hochleistungsstroboskope (siehe Abbildung 20) ausgeleuchtet werden. Hierdurch wird eine gleich bleibende, von den Lichtverhältnissen unabhängige Aufzeichnungsqualität gewährleistet. Nach Angaben des Herstellers lassen sich somit Risse mit einer Rissbreite  $>0,5$  mm erkennen.



**Abbildung 20: Heckansicht des ARGUS mit den Aufzeichnungsgeräten für das Oberflächenbild [X4]**

Die Auswertung der Bilder erfolgt nachträglich im Labor anhand einer Sichtung durch geschultes Personal. Für die Aufzeichnung der Schäden erfolgt durch automatische Verfahren eine Vorauswahl der Bilder, auf denen durch Computeranalyse das Vorhandensein von Schäden festgestellt wurde. Anhand der Vorauswahl werden durch das Laborpersonal Schäden quantifiziert und aufgezeichnet werden. Hierzu muss ein Großteil des aufgezeichneten Bildmaterials gesichtet werden, so dass von einer „teilautomatisierten Erfassung“ gesprochen wird.

Im Rahmen von Forschungen im In- und Ausland werden derzeit verschiedene Verfahren zur automatisierten Risserkennung erprobt (eine Übersicht ist beispielsweise in [28] zu finden) und zum Teil auch bei umfangreichen Netzerfassungen eingesetzt (z.B. in [29]). Der derzeitige Stand der Technik erlaubt für netzweite Erfassungen eine vollautomatische Erkennung von Rissen mit einer Breite von über 2 mm (siehe z.B. [30] oder [29]), was aber wesentlich ungenauer ist, als die Risse mit 0,5 mm Breite, welche durch visuelles Post-Processing erkannt werden können. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Risse nur eines von mehreren Schadensmerkmalen sind, welche für das Erhaltungsmanagement von Bedeutung sind. Es ist zu erwähnen, dass bei der Literaturrecherche auch Hinweise auf genauere, vollautomatisierte Risserkennungsverfahren (z.B. Risse > 1 mm in [31]) gefunden werden können. Diese existieren aber derzeit nur als Testanwendung bzw. als Konzeptentwurf und können noch nicht für Routinemessungen eingesetzt werden.

In der Literatur sind für verschiedene Schadensmerkmale mehrere, sehr detailliert ausgearbeitete Modelle zu finden. Beispielsweise existieren verschiedene Rissmodelle, die einen Zusammenhang zwischen bestimmten Risseigenschaften, den Rissursachen und der weiteren Rissentwicklung herstellen. Eine gute Übersicht über diese Verfahren ist z.B. in [32] zu finden. Um diese bekannten Zusammenhänge vollständig für die Erhaltungsplanung nutzen zu können, wäre es aber notwendig, verschiedene Rissmerkmale (Rissrichtung, Rissbreite, Risslänge, Risstiefe) flächendeckend zu erfassen. Dies wird mit der derzeitigen Aufzeichnungs- und Auswertetechnik aus Praktikabilitätsgründen nicht durchgeführt.

Nachfolgend wird eine Übersicht über die derzeit durch die teilautomatisierte Erfassung aufgezeichneten Schadensmerkmale auf Asphalt- und Betonfahrbahnen gegeben.

#### **4.4.2 Asphaltmerkmale**

Auf Fahrbahnen deren Decksicht in Asphaltbauweise ausgeführt ist, werden die folgenden Merkmale erfasst:

- **Risse**<sup>3</sup>: Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse entstehen an der Fahrbahnoberfläche, wenn der Oberbau bzw. die Deckschicht den Beanspruchungen durch Witterung und Verkehr nicht mehr gerecht wird. In vielen Fällen entstehen Risse bereits in den tiefer liegenden Schichten des Untergrunds und werden erst erkannt, wenn sie an die Oberfläche durchbrechen. Die Ursachen für Risse sind vielfältig. So kann eine mangelnde Verarbeitung (z.B. Verdichtungsfehler, Materialfehler, etc.) oder aber auch eine gestiegene Verkehrslast zu verstärkter Rissbildung führen. In jedem Fall sind Risse ein wertvoller Indikator für einen nicht mehr funktionsgerechten Oberbau und stellen darüber hinaus eine zusätzliche Gefahr dar, da Niederschlagswasser in offene Risse eindringen und durch Frost und Ausspülvorgänge weitere Schäden verursachen kann. In der Abbildung 21 ist ein Beispiel für Risse in Asphaltdecken aufgezeigt.



**Abbildung 21: Beispiel für das Schadensbild „Risse“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Offene und vergossene Risse werden gleichermaßen berücksichtigt.

- **Flickstellen**: Durch die Aufzeichnung von Flickstellen wird in der Regel angestrebt, zu erfahren, inwiefern die untenliegende Substanz des Aufbaus angegriffen ist. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein Flicker aufgrund einer vorangeschrittenen Rissbildung aufgebracht wurde und dass die eigentliche Rissursache (z.B. mangelnde Verdichtung, zu geringe Konstruktionsdicke, ungeeignete Entwässerung) nicht beseitigt worden ist. Dem gegenüber können aber auch tiefer gehende Sanierungen, so genannte „Reparaturstellen“ oberflächlich als Flicker wahrgenommen werden. Da solche Reparaturstellen durchaus mit einer Beseitigung der Schadensursache einhergehen können, wird die Bedeu-

---

<sup>3</sup> Bis einschließlich der ZEB-Jahresmessung 2003 auf Bundesstraßen wurde in Deutschland auf Asphaltdecken zwischen Netzrissen, Risshäufungen und Einzelrissen unterschieden. Aufgrund der problematischen Abgrenzung dieser unterschiedlichen Rissarten werden sie seit der ZEB-Jahresmessung 2004 auf Bundesstraßen unter dem Merkmal „RISS“ zusammengefasst.

tung des Merkmals „Flickstellen“ in der Praxis unterschiedlich beurteilt. In der Abbildung 22 ist ein exemplarisches Schadensbild abgebildet.



**Abbildung 22: Beispiel für das Schadensbild „Flickstellen“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Darüber hinaus können Flickstellen nicht nur aufgrund von Fahrbahnschäden entstehen, sondern z.B. auch nach Aufgrabungen für Leitungsverlegungen. Um dies zu unterscheiden, wird seit 2004 bei der Erfassung auf Bundes- und Landesstraßen in Deutschland zwischen „Aufgelegten Flickstellen“, welche aufgrund von Rissen und Oberflächenschäden aufgebracht worden sind und „Eingelegten Flickstellen“, welche z.B. aufgrund von Rohrleitungsverlegungen oder ähnlichen Straßenbauarbeiten entstanden sind, unterschieden. Die Auswirkung von schlecht ausgearbeiteten Flickstellen, z.B. auf die Unebenheit der Fahrbahnen oder auf die Griffigkeit, steht bei der Erfassung dieses Merkmals nicht im Vordergrund, da dieser Aspekt durch die anderen Merkmalerfassungen (Längsebenheit, Querebenheit und Griffigkeit) behandelt wird.

Vollflächige Deckschichtreparaturen über die gesamte Fahrstreifenbreite sowie konstruktiv bedingte Deckenanschlüsse gelten nicht als Flickstellen im Sinne der ZTV-ZEB [27]

- **Ausbrüche:** Das Herausbrechen von Teilen der Fahrbahnoberfläche infolge von Verkehr oder Witterungseinfluss wird als Ausbruch aus der Fahrbahndecke bezeichnet. Ein typisches Schadensbild ist der Abbildung 23 wiedergegeben.



**Abbildung 23: Beispiel für das Schadensbild „Ausbrüche“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Ähnlich wie Risse sind Ausbrüche Hinweise auf einen nicht mehr anforderungsgerechten Oberbau und stellen gleichzeitig ein Gefahrenpotential dar, da durch die nunmehr unversiegelte Oberfläche das Wasser in die tieferen Schichten eindringen und dort die Feinteile herauspülen kann.

- **Offene Arbeitsnähte:** Arbeitsnähte entstehen auf Asphaltdecken aufgrund der beschränkten Breite des eingesetzten Fertigers und treten in diesem Fall in der Regel in der Fahrbahnmitte auf. Darüber hinaus entstehen bei Einbauunterbrechungen und bei Deckschichtwechseln Arbeitsnähte in Querrichtung. Falls Arbeitsnähte nicht korrekt vergossen werden bzw. wenn sie aufgrund von sonstigen Fahrbahnschäden fein bis klaffend aufgebrochen sind, werden sie als „Offene Arbeitsnähte“ erfasst. Dieses Merkmal ist ein Hinweis auf eine ungenügende Verarbeitung und ist gleichzeitig aufgrund des eindringenden Wassers eine Gefahr für die tiefer liegenden Schichten.
- **Bindemittelanreicherungen:** Bindemittelanreicherungen, auch als Bindemittelaustritt oder „Schwitzen der Fahrbahn“ bezeichnet, treten als einzelne Inhomogenitäten an der Fahrbahnoberfläche auf. In der Abbildung 24 ist ein Beispiel für das Schadensbild wiedergegeben.



**Abbildung 24: Beispiel für das Schadensbild „Bindemittelanreicherung“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Mögliche Ursachen für Bindemittelanreicherungen sind Bindemittelüberschuss beim Einbau, verkehrliche Überbelastung bzw. eine zu frühe Verkehrsfreigabe [6]. Aufgrund des mangelnden Kornanteiles können solche Stellen ein geringes Griffigkeitsniveau aufweisen.

Die Erfassungsmethode in Deutschland nach der ZTV-ZEB [27] sieht für alle Asphaltmerkmale vor, dass unterschieden wird, ob das entsprechende Schadensbild innerhalb eines Meters eines Fahrstreifendrittels vorkommt oder nicht. Es wird somit nur ein binärer Wert für jedes Merkmal pro Fahrstreifendrittel und Meter erfasst. Eine darüber hinausgehende Quantifizierung, z.B. der Risslänge, Rissbreite oder der Fläche der Flickstellen, findet nicht statt.

#### **4.4.3 Betonmerkmale**

Auf Fahrbahnen deren Deckschicht in Betonbauweise ausgeführt ist, werden die folgenden Merkmale erfasst:

- **Längs- und Querrisse:** Risse in Betonplatten können vielfältige Ursachen haben, wie z.B. Unterdimensionierung des Gesamtoberbaus oder der Decke, ungeeignete Betonzusammensetzung oder mangelhafte Entwässerung. Darüber hinaus können Risse unterschiedliche Rissrichtungen, Rissbreiten, Risstiefen und Risslängen haben, was unterschiedliche Aussagen über die Schadensursache zulässt. Das Merkmal „Längs- und Querrisse“ der ZEB fasst alle Rissbilder auf Betondecken zusammen, die nicht im Rand- oder Eckbereich der Platten auftreten. In der Abbildung 25 ist ein Beispiel für einen Querriss über die gesamte Betonplatte abgebildet.



**Abbildung 25: Beispiel für das Schadensbild „Längs- und Querrisse“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Bei der Aufnahme des Schadens werden die beschädigten Betonplatten sowie die plattenbezogene Gesamtlänge der Risse aufgenommen. Darüber hinaus werden auch die Längen der unbeschädigten Betonplatten festgehalten. Offene und vergossene Risse werden gleichermaßen behandelt.

- **Eckabbrüche:** Abgebrochene Ecken von Betonplatten stellen Schwachstellen dar, über welche die Verkehrslast weitere, schwerere Schäden verursachen kann. Ein Beispiel ist in der Abbildung 26 wiedergegeben.



**Abbildung 26: Beispiel für das Schadensbild „Eckabbrüche“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Die Anzahl der beschädigten Ecken wird separat für jede beschädigte Platte aufgenommen. Darüber hinaus werden auch die Plattenlängen der unbeschädigten Platten aufgezeichnet.

Offene und vergossene Eckabbrüche werden gleichermaßen berücksichtigt, wobei offene, abgebrochene Ecken in der Regel sehr schnell durch die zuständigen Straßenmeistereien behandelt werden und bisher im Rahmen der ZEB nur sehr selten festgestellt worden sind.

- **Kantenschäden:** Durch abgebrochene oder anderweitig zerstörte Kanten entsteht am Anschlussbereich zwischen zwei Platten eine Stufe, welche die weitere Zerstörung durch Verkehrseinwirkung fördert. Kantenschäden sind wie Risse in der Betonplatte oder Eckabbrüche ein Hinweis auf eine nicht funktionsgerechte Deckschicht. In der Abbildung 27 ist ein Beispiel einer beschädigten Kante zu sehen.



**Abbildung 27: Beispiel für das Schadensbild „Kantenschäden“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Kantenschäden werden nur dann aufgenommen, wenn sie mindestens 3 cm Länge aufweisen. Es wird die Gesamtlänge der beschädigten Kanten pro Platte aufgenommen, wobei reparierte und nicht reparierte Kantenschäden gleichermaßen berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird die Plattenlänge aller beschädigten und unbeschädigten Kanten registriert.

- **Nester und Abplatzungen:** Das Herauslösen von Teilen der Fahrbahnoberfläche infolge von Verkehr oder Verwitterung wird unter dem Merkmal „Nester und Abplatzungen“ zusammengefasst. Es wird ausschließlich festgehalten, ob eine Platte von diesem Schadensmerkmal betroffen ist oder nicht. Weitere quantitative Unterscheidungen werden nicht getroffen.

- **Schadhafte Fugenfüllungen:** Fugen werden auf Betonfahrbahnen aus konstruktiven Gründen eingeführt und werden bei bestimmten Einbauverfahren mit Füllmaterial dicht verschlossen. Falls der Fugenfüllstoff von der Fugenkante gelöst, in sich gerissen, abgesackt, porös oder nicht mehr vorhanden ist, muss dies als schadhafte Fugenfüllung aufgezeichnet werden. Bei diesem Schadensmerkmal wird ebenfalls ausschließlich festgehalten, ob bei einer Platte schadhafte Fugenfüllungen festzustellen sind oder nicht.
- **Flickstellen und bituminöser Teilersatz:** Bei größeren Betonschäden werden die betroffenen Betonplatten durch eine bituminöse Deckschicht auf Teilflächen ausgebessert (siehe Abbildung 28).



**Abbildung 28: Beispiel für das Schadensbild „Flickstellen und bituminöser Teilersatz“ gemäß ZTV-ZEB [27]**

Diese als bituminöser Teilersatz bezeichnete Erhaltungsmaßnahme hinterlässt auch bei korrekter Ausführung eine Störung im Gesamtgefüge der Betonplatte und wird daher als Schadensmerkmal aufgenommen. Darüber hinaus ist der zugrunde liegende Betonschaden ein Hinweis auf einen nicht funktionsgerechten Gesamtoberbau. Auch hier wird ausschließlich festgehalten, ob eine Betonplatte von diesem Zustandsmerkmal betroffen ist oder nicht. Sind mehr als vier aufeinander folgende Platten vollständig durch Asphalt ersetzt, so wird dieser Teilabschnitt der Bauweise Asphalt zugeordnet und das Merkmal „bituminöser Teilersatz“ nicht mehr ausgewertet.

Es ist festzuhalten, dass die Erfassung aller Merkmale parallel abläuft und somit zu jeder Betonplatte alle Schäden aber auch alle Nicht-Schäden aufgezeichnet werden. Dies bedeutet, dass in allen Auswerteabschnitten die Anzahl der beschädigten Platten, die mittlere Ausprägung des jeweiligen Zustandsmerkmals auf den beschädigten Platten und das Verhältnis zwischen beschädigten Platten und unbeschädigten Platten bei

jedem Merkmal ermittelt werden kann. Diese Berechnung erfolgt später im Rahmen der Zustandsgrößenermittlung.

#### **4.5 Textur**

Die hochauflösende Abtastung der Feingestalt der Fahrbahnoberfläche wird als Texturerfassung bezeichnet. Grundsätzlich kann eine Texturerfassung auch als zweidimensionale Flächenerfassung erfolgen, wird aber nach dem heutigen Stand der Technik nur eindimensional durchgeführt. Ähnlich wie bei der Erfassung des Höhen-Längsprofils wird die Oberfläche in Längsrichtung abgetastet und das Feinprofil aufgezeichnet. Der Unterschied besteht ausschließlich in der Genauigkeit der Erfassung und der Abtastungsdichte.

Bei der Auswertung der Textur wird in der Regel das Profil durch eine mathematische Transformation als Überlagerung von verschiedenen Sinuswellen mit unterschiedlicher Wellenlänge ausgedrückt, so dass jeder Wellenlänge eine unterschiedliche Amplitude zugeordnet werden kann. Es wird zwischen Mikrotextur (Wellenlängenbereich bis 0,5 mm), Makrotextur (Wellenlängenbereich 0,5 mm – 50 mm) und Megatextur (50 mm – 500 mm Wellenlänge) unterschieden.

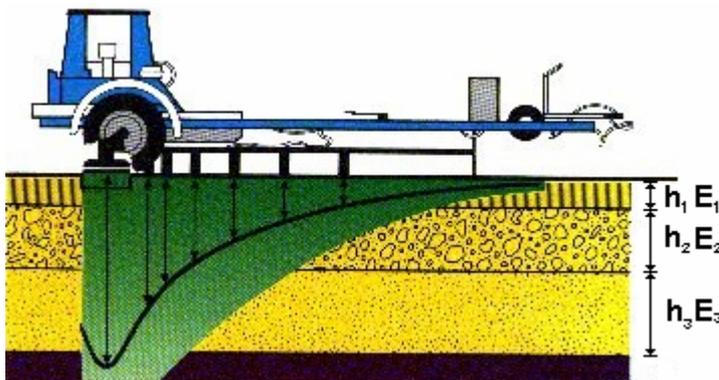
Bereits seit 1970 [33] ist bekannt, dass das Zusammenspiel zwischen Mikro- und Makrotextur das Griffigkeitsverhalten der Straße beeinflusst. Die derzeit eingesetzten Systeme zur Texturerfassung mit schnellfahrenden Fahrzeugen sind aber noch nicht in der Lage, beide Größen mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Das in Österreich eingesetzte Messsystem RoadSTAR ist in der Lage, die Makrotextur eines 127 mm langen Bereichs für jeden Erfassungsmeter aufzunehmen und auszuwerten.

Die internationale Organisation für Standardisierung (ISO) hat in der in der ISO 13473 [34] die Berechnung einer Texturkenngroße, der mittleren Profiltiefe (Mean Profile Depth - MPD), normiert. In Deutschland ist bisher noch keine neztweite Erfassung der Textur durchgeführt worden. In Österreich wurde die Textur mit dem Messsystem RoadSTAR bei der messtechnischen Zustandserfassung im Jahr 1999 aufgenommen, wird aber nicht zur Gesamtbewertung der Straße herangezogen (siehe Kapitel 6).

#### **4.6 Tragfähigkeit**

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit und in der Folge zur Ermittlung der Elastizitätsmodule der einzelnen Aufbauschichten der Fahrbahnbefestigung werden „Falling-Weight-Deflektometer“ (FWD) verwendet. Im Gegensatz zu den bisher behandelten Erfassungsverfahren werden hierbei keine Oberflächeneigenschaften, sondern direkt Eigenschaften von tiefer liegenden Aufbauschichten gemessen. Die Tragfähigkeitsmessungen mittels FWD werden häufig zur Bestimmung der Lebensdauer des Aufbaus herangezogen und haben für die Bewertung der Fahrbahnsubstanz eine besondere Bedeutung.

Das Prinzip des FWD besteht darin, dass auf die Fahrbahnoberfläche eine Last aufgebracht wird, die in Hinblick auf Dauer und Auflast in etwa einer Überführung mit einem Rad eines Schwerverkehr-Fahrzeugs entspricht [35]. Dieser Impuls wird dadurch hergestellt, dass ein Gewichtskörper aus einer vordefinierten Höhe auf mehrere Gummipuffer fällt, die den Impuls über eine Aufstandsplatte an die Fahrbahnoberfläche abgeben. Durch diesen Impuls verformt sich die Fahrbahnoberfläche geringfügig, wobei die Verformung kreisförmig vom Zentrum der Impulseintragung abnimmt. Die messbare Verformungsabnahme ist zum einen von dem Abstand zum Verformungszentrum abhängig, zum anderen von den Elastizitätsmoduli der einzelnen, tiefer liegenden Schichten. Durch mehrere Deflexionssensoren, von denen der erste im Zentrum der Aufstandsplatte und der weiteste in einem Abstand von bis zu 2,5 m angebracht wird, werden die Deflexionen gemessen und damit die Verformungsmulde aufgezeichnet.



**Abbildung 29: Messprinzip beim Falling Weight Deflectometer (FWD)**

Falls die jeweiligen Schichtdicken ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ) bekannt sind, können durch entsprechende Modellrechnungen die **Elastizitätsmoduli** ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) der Schichten bestimmt werden. Aus diesen Angaben lassen sich Aussagen zur **Gesamtragfähigkeit des Aufbaus** und unter Einbeziehung der Verkehrsbelastung auch zur **Lebensdauer der Substanz** ableiten. Durch FWD-Messungen lassen sich zudem Schwachstellen in tieferliegenden Schichten durch zerstörungsfreie Messung detektieren, was auf Projektebene von besonderer Bedeutung ist.

Die Kräfte, die durch das FWD auf die Fahrbahnoberfläche übertragen werden, variieren mit Masse und Fallhöhe des Fallkörpers und liegen je nach Anwendungsbereich zwischen 10 kN und 140 kN. Das System kann nur in Temperaturbereichen zwischen 0 °C und 30 °C Aussagen zum gewöhnlichen Verformungsverhalten des Bodens liefern. Bei Messungen mit Temperaturen unter 0 °C kann der Einfluss von Frost auf die Tragfestigkeit untersucht werden. Bei Temperaturen über 30 °C können die viskosen Eigenschaften der Schichtmaterialien eine höhere Bedeutung erlangen, was durch die aktuell verwendeten Rechenmodelle zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls nicht korrekt berücksichtigt werden kann.

Gegenüber der Substanzuntersuchung mittels Bohrkernentnahme unterscheidet sich der Einsatz des FWD vor allem dadurch, dass keine Schädigung an der Substanz ver-

ursacht wird („zerstörungsfreie Messung“). Demgegenüber erlauben die Ergebnisse des FWD aber nicht so weitgehende Schlussfolgerungen, wie die Bohrkernauswertung und benötigen zudem bereits im Vorfeld Kenntnis über die vorhandenen Schichtdicken.



**Abbildung 30: FWD im Anhängetrieb**

Das FWD wird in der Regel an ein Betriebsfahrzeug angehängt (siehe Abbildung 30), welches in regelmäßigen Abständen (ca. 20 m bis 50 m) anhält und punktuelle Messungen vornimmt. Diese Methode ist somit deutlich zeitaufwändiger als die bisher vorgestellten, schnellfahrenden Erfassungssysteme.

Aus diesen Gründen wird das FWD in Deutschland und in Österreich nicht für netzweite Zustandserfassungen, sondern nur für lokale Untersuchungen auf Projektebene eingesetzt. FWD werden darüber hinaus bereits seit Jahren zur zerstörungsfreien Tragfähigkeitsuntersuchung von Flugbetriebsflächen eingesetzt. Das US-Verkehrsministerium hat hierfür bereits 1976 eine entsprechende Arbeitsanweisung herausgegeben [36] und es werden für diesen Aufgabenbereich kontinuierlich neue Modelle entwickelt, welche auch große Auflasten simulieren können, wie sie durch Flugzeugreifen verursacht werden.

In den letzten Jahren wird in Fachartikeln (z.B. in [37], [38]) eine dynamische Methode der Deflektionsmessung mittels Rolling Weight Deflectometer (RWD) vorgestellt. Hierbei wird das Verformungsverhalten nicht wie beim FWD durch Simulation einer Überrollung durch das Fallgewicht analysiert, sondern es werden Messsensoren an einem schweren Lastkraftwagen angebracht, welche die Verformung der Befestigung während der Überfahrt messen können. Dies erlaubt in der Theorie eine zerstörungsfreie Bestimmung der Elastizitätsmoduli im fließenden Verkehr. In der Praxis können nach Aussage der Hersteller gute Übereinstimmungen der Messergebnisse des RWD mit den FWD-Messungen bei warmen, trockenen Fahrbahnoberflächen erzielt werden. Für abweichende Messbedingungen, wie z.B. niedrige Bodentemperaturen und hohe Bodenfeuchte sowie für variierende Messgeschwindigkeiten, müssten aber noch weitergehende Untersuchungen und Kalibrierungsarbeiten vorgenommen werden. Diese

Systeme befinden sich somit derzeit noch im Teststadium, könnten aber gegebenenfalls zukünftig eine wertvolle Ergänzung der netzweiten Zustandserfassung darstellen.

## 5. Rohdaten und Zustandsgrößenermittlung

In dem vorangegangenen Kapitel wurde vorgestellt, mit welchen Messverfahren Zustandsdaten durch schnellfahrende Systeme erfasst werden können. Die erfassten Zustandsdaten werden zunächst in digitaler Form aufgezeichnet und für die weitere Verarbeitung z.B. als Inputdaten für das PMS oder zur Visualisierung in Form von Karten und Streckenbändern weitergegeben.

In der Regel werden die Daten zunächst direkt durch die Erfassungssysteme in einem jeweils systemspezifischen Format aufgezeichnet und es werden daraus durch geeignete Software Zustandsgrößen für zuvor festgelegte Auswerteabschnitte berechnet. Die weiteren Arbeitsschritte nutzen in der Regel die auswerteabschnittsbezogenen Zustandsgrößen. Diese Vorgehensweise ist in Österreich wie auch in den meisten weltweit bekannten Anwendungsfällen des PMS üblich.

In Deutschland existiert zwischen den systemspezifischen Aufzeichnungen und den Zustandsgrößen noch eine weitere Verarbeitungsstufe, nämlich die so genannten „standardisierten Rohdaten“. Nachfolgend werden die Hintergründe erläutert, die zur Einführung dieses Zwischenschrittes geführt haben.

### 5.1 Rohdaten

In Deutschland entstand eine besondere Situation dadurch, dass es bei den regelmäßig durchgeführten Zustandserfassungen gewünscht war, einen Wettbewerb zwischen unterschiedlichen Erfassungssystembetreibern zuzulassen. Um dies umzusetzen, wurde unter anderem die Wahl des Erfassungssystems und der eingesetzten Software freigegeben, so dass auch unterschiedliche Systeme verwendet werden können.

Zusätzlich bestand auch der Wunsch des Auftraggebers, die Berechnung der Zustandsgrößen auch nach der Erfassung ohne Hinzuziehen der Erfassungssystembetreiber durchführen zu können. Dies galt insbesondere dann, wenn Algorithmen geändert werden sollten oder neue Algorithmen (z.B. die Entwicklung des Längsebenenheitswirkindexes LWI [39]) zum Einsatz kommen sollten. Dies erforderte einen Übergang der Verantwortung für die Zustandsgrößenberechnung von den Erfassungssystembetreibern zum Auftraggeber.

Eine weitere Besonderheit ergab sich dadurch, dass die Qualität der Erfassungstätigkeit im Laufe einer Jahresmessung durch einen Gutachter gesichert werden sollte. Bestandteil dieser Qualitätssicherung war die Überprüfung der Algorithmen zur Ermittlung von Zustandsgrößen. Hierzu hätte der Gutachter auf die so genannten „Maschinenrohdaten“ der Erfassungssystembetreiber zurückgreifen müssen, was sich aber als zu problematisch darstellte. Die „Maschinenrohdaten“ waren weder standardisiert noch dokumentiert und unterschieden sich bei jedem Anbieter. Eine zeitnahe Prüfung (vor-

gegeben war die Erstellung eines ausführlichen Prüfberichtes innerhalb von zwei Wochen nach Dateneingang) war auf dieser Basis nicht möglich.

Aus diesen Gründen wurde in Deutschland ein standardisiertes Rohdatenformat definiert und es wurde 1998 erstmalig im Rahmen des Erfassungsauftrages gefordert, die Daten zusätzlich zu den Zustandsgrößen in diesem standardisierten Rohdatenformat auszuliefern. Aufgrund einiger notwendiger Ergänzungen sowie aufgrund neuer Erfassungstechnologien (GPS, Abstandsmessung) war es notwendig, das Rohdatenformat weiterzuentwickeln. Aktuell wird ein auf XML basiertes Rohdatenformat [40] als Grundlage des gesamten Erfassungsauftrags vorgegeben.

In den standardisierten Rohdaten werden die Zustandsdaten mit einer vergleichsweise hohen Datendichte aufgezeichnet, die je nach Erfassungsmerkmal variiert.

- Für die Längsebenheit werden Höhenpunkte alle 10 cm aufgezeichnet.
- Für die Querebenheit werden meterweise Querprofile aufgezeichnet, die aus 33 Einzel-Höhenwerten zusammengesetzt sind.
- Für die Griffigkeit werden die SCRIM-Reibwerte sowie die Temperatur von Reifen, Fahrbahn, Wasser und Luft meterweise aufgezeichnet.
- Für die Substanzschäden auf Asphaltdecken wird für jeden Quadratmeter (1m mal ein Fahrstreifendrittel) das Vorhandensein unterschiedlicher Schadensbilder (Flickstellen, Netzrisse, etc.) mit „Ja / Nein“ aufgezeichnet.
- Für das Oberflächenbild auf Betondecken wird für jede Platte die Plattenlänge, die Anzahl abgebrochener Ecken, die Anzahl beschädigter Kanten und die Länge eventuell vorhandener Risse aufgezeichnet

Die Einführung des standardisierten Rohdatenformates hat in Deutschland zudem die Grundlage für eine Vielzahl von neuen Anwendungen geschaffen. Das Format hat sich derart bewährt, dass es in den zukünftigen Messungen ab 2006 nicht mehr vorgesehen ist, Zustandsgrößen oder Zustandswerte durch die Erfassungssystembetreiber auszuliefern. Alleiniger Auftragsinhalt ist die Erstellung der Rohdatendateien nach dem aktuellen Format, welches öffentlich zugänglich, im Internet verfügbar ist.

## **5.2 Verfahren zur Ermittlung von Zustandsgrößen**

In Deutschland und Österreich werden zum Teil unterschiedliche Zustandsgrößen ermittelt und auch unterschiedliche Verfahren angewendet. Während in Deutschland in der Vergangenheit durch die in den Ausschreibungsunterlagen definierten Berechnungsverfahren und aktuell durch die vom Auftraggeber bereitgestellte Standardsoftware die Vorgaben zur Ermittlung der Zustandsgrößen definiert worden sind, werden in

Österreich vor allem internationale Normen und standardisierte Zustandsgrößenbildungsverfahren eingesetzt.

Die Verwendung eigener Verfahren hat den Vorteil, auf landesspezifische Charakteristiken des Straßennetzes besser Rücksicht nehmen und eigene Schwerpunkte setzen zu können. Die Verwendung international anerkannter Standards hat dagegen den Vorteil, weitestgehend abgesicherte Verfahren mit einem großen Erfahrungshintergrund nutzen zu können und auch die Erfassungsergebnisse international vergleichen zu können.

Eine erschöpfende Beschreibung aller Zustandsgrößenermittlungsverfahren ist an dieser Stelle aus Umfangsgründen nicht vorgesehen. Solche Algorithmenbeschreibungen, welche den Anspruch auf Vollständigkeit und genaue mathematische Definition erfüllen müssen, werden in der Regel in umfangreichen Normen definiert. Für das Verständnis der weiteren Arbeitsschritte soll nachfolgend eine Übersicht über die jeweils eingesetzten Verfahren und die Bedeutung der resultierenden Zustandsgrößen gegeben werden. Die Vorgehensweisen in Deutschland und in Österreich werden getrennt behandelt.

### 5.2.1 Vorgehensweise in Deutschland

Durch die Einführung der standardisierten Rohdaten ging in Deutschland die Verantwortung für die Ermittlung der Zustandsgrößen von den Betreibern der Erfassungssysteme auf den Auftraggeber über. Dieser hat hierzu eine Standardsoftware erstellen lassen, welche anhand der Rohdaten die Zustandsgrößen automatisch berechnet. Diese Software wird den Erfassungssystembetreibern zu Beginn der Messung zur Verfügung gestellt und zwischen den Jahresmessungen kontinuierlich weiterentwickelt. Das Ergebnis sind standardisierte Ergebnistabellen mit Zustandsgrößen für Auswertabschnitte mit einer Regellänge von 100 m auf Autobahnen und auf Freien Strecken der anderen Straßenklassen sowie von 20 m in den Ortsdurchfahrten.

Durch die Standardsoftware werden verschiedene Zustandsgrößen ermittelt. Nachfolgend werden jene aufgeführt, welche in die Zustandsbewertung (siehe Kapitel 6) eingehen.

- **Allgemeine Unebenheit AUN:** Die Allgemeine Unebenheit dient der Charakterisierung des Längsebenheitsprofils und ist eine rein geometrische Größe, bei der die regellosen Unebenheiten durch die so genannte „Spektrale Dichte“ quantifiziert werden. Die Bestimmung der AUN beinhaltet eine Reihe komplexer, mathematischer Berechnungsverfahren, die an dieser Stelle nicht ausführlich vorgestellt werden können. Wesentliche Schritte sind die Vorglättung des Profils durch einen gleitenden Mittelwert, das Ermitteln eines Frequenzspektrums Komplexer Zahlen anhand einer „Schnellen Fouriertransformatuon“ (Fast-Fourier-Transformation FFT), und die Ermittlung einer „Spektraldichte der Leistung“ (Power Spektrum Density).

- **Längsebenheitswirkindex LWI:** Dieses Merkmal soll nicht die Geometrie von Unebenheiten, sondern deren Auswirkungen auf das Schwingungsverhalten von drei Komponenten, dem Menschen, der Ladung und des Rades, eines standardisierten Modellfahrzeugs quantifizieren. Die Auswirkungen aller drei Komponenten werden nach unterschiedlichen Verfahren gewichtet und der nach der Gewichtung maximale Ausschlag bildet den LWI. Der LWI wurde erst in den vergangenen Jahren entwickelt [39] und ist derzeit noch kein bewertungsrelevantes Merkmal, d.h. noch nicht Bestandteil von Gebrauchs-, Substanz- oder Gesamtwert. In einer aktuell laufenden Studie [41] sollen die Voraussetzungen zur zukünftigen Berücksichtigung dieses Merkmals geschaffen werden.

Der Berechnungsvorgang ist relativ komplex und soll hier nicht ausführlich vorgestellt werden. Nachfolgend wird nur eine kurze Übersicht über die einzelnen Berechnungsschritte aufgeführt. Zur Berechnung des LWI wird das aufgenommene Höhenprofil durch „Schnelle Fouriertransformation“ (FFT) in ein Frequenzspektrum überführt. Das Frequenzspektrum wird durch ein mathematisches Verfahren entfärbt (Decolouring) und durch inverse Fouriertransformation in ein Höhenprofil zurück überführt. Das Resultat wird mit den „Filtern“ für Mensch, Ladung und Rad durch „Diskrete Faltung“ verrechnet. Die Filter drücken aus, wie die jeweiligen Komponenten aufgrund von Einheitsunebenheiten in Schwingung versetzt werden. Die jeweiligen Filterantworten werden durch Kalibrierungsfunktionen angeglichen und einander gegenübergestellt. Das Maximum bildet den LWI. Zusammenfassend lässt sich ausdrücken, dass der LWI die Wirkung der Längsunebenheiten auf genormte Fahrzeugmodelle ausdrückt und als eine wertvolle Ergänzung der Allgemeinen Unebenheit AUN betrachtet wird.

- **Spurrinntiefe SPT:** Die Ermittlung der Spurrinntiefe orientiert sich historisch an der Anwendung der Lattenmessung. Für die softwaregestützte Berechnung wird eine starre Latte modelliert, welche über die höchsten Punkte des Querprofils bewegt wird. In jeder möglichen Position wird der maximale vertikale Abstand zum Profilboden so bestimmt, als ob ein Keil eingeschoben werden würde. Auf diese Weise wird in jedem Querprofil sowohl die Spurrinntiefe links als auch die Spurrinntiefe rechts ermittelt. Diese beiden Werte werden innerhalb des gesamten Auswerteabschnitts für jedes Querprofil ermittelt und es wird eine mittlere Spurrinntiefe links und eine mittlere Spurrinntiefe rechts bestimmt. Das Maximum dieser beiden Werte ist die Spurrinntiefe des Auswerteabschnitts.
- **Fiktive Wassertiefe SPH:** Anhand des Querprofils wird unter Berücksichtigung der Querneigung ermittelt, wie hoch das Regenwasser an den Rändern abfließen bzw. wie hoch es im Profil links und rechts stehen bleiben würde. Bei diesem Verfahren wird vereinfachend der Abfluss in Längsrichtung nicht berücksichtigt. Wie auch bei der Spurrinntiefe wird der mittlere Wert links und rechts

für den gesamten Auswerteabschnitt bestimmt und das Maximum als Fiktive Wassertiefe definiert.

- **Griffigkeit GRI:** Die Griffigkeit wird ermittelt, indem die meterweise aufgezeichneten Reibwert- und Geschwindigkeitswerte durch ein Ausgleichsverfahren verrechnet werden. Dadurch wird die Griffigkeit stets in Bezug auf eine bestimmte Soll-Messgeschwindigkeit (Bundesautobahnen 80 km/h; Freie Strecke der Bundesstraßen 60 km/h und Ortsdurchfahrten 40 km/h) ermittelt. In der Praxis werden somit je nach Straßenkategorie drei unterschiedliche, nicht direkt miteinander vergleichbare Zustandsgrößen bestimmt. In neueren Auswertungen wird daher die bisher allgemein verwendete Zustandsgröße „GRI“ durch eine der neuen Größen „GRI\_80“, „GRI\_60“ oder „GRI\_40“ ersetzt.
- **Risse RISS:** Diese Zustandsgröße enthält den Anteil der durch Netzzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse beschädigten Fläche als Quotient aus Schadensfläche geteilt durch die Gesamtfläche des Auswerteabschnitts. Dieses Merkmal wird in dieser Form nur für Strecken mit Asphaltdecken erfasst.
- **Flickstellen FLI:** Wie bei den Netzzrissen wird auch bei den Flickstellen der Anteil der von Flickstellen betroffenen Fläche durch die Gesamtfläche des Auswerteabschnitts geteilt. Auch die Flickstellen werden nur für Asphaltdecken erfasst.
- **Längs- und Querrisse LQRL und LQRP:** Die Bestimmung der Merkmale für die Betondecken erfolgt sowohl für die Ausprägung als auch für deren Häufigkeit. Bei den Längs- und Querrissen ist die Ausprägung LQRL definiert als die durchschnittliche Länge an Längs- und Querrissen auf allen beschädigten Platten eines Auswerteabschnitts. Die Häufigkeit LQRP ist definiert als der mit der Plattenlänge gewichtete Anteil der durch Längs- und Querrisse beschädigten Platten an der Gesamtlänge aller Platten im Auswerteabschnitt.
- **Eckabbrüche EABF und EABP:** Auch für die Eckabbrüche wird eine zweidimensionale Betrachtung der Ausprägung und der Häufigkeit dieses Schadensmerkmals durchgeführt. Das Merkmal EABF ist die durchschnittliche Anzahl abgebrochener Ecken der Betonplatten eines Auswerteabschnitts, bei denen Ecken abgebrochen sind. Die Häufigkeit EABP ist definiert als der mit der Plattenlänge gewichtete Anteil der durch Eckabbrüche beschädigten Platten an der Gesamtlänge aller Platten im Auswerteabschnitt.
- **Kantenschäden KASL und KASP:** Das Merkmal KASL ist definiert als die durchschnittliche beschädigte Kantenlänge auf den Betonplatten eines Auswerteabschnitts, bei denen Kantenschäden festgestellt worden sind. Die Häufigkeit KASP ist definiert als der mit der Plattenlänge gewichtete Anteil der durch Kantenschäden beschädigten Platten an der Gesamtlänge aller Platten im Auswerteabschnitt.

Aus Umfangsgründen wurde hier nur eine kurze Übersicht über die Zustandsgrößenbildungsverfahren gegeben. Die jeweiligen Details sind der Algorithmenbeschreibung [42] zu entnehmen, welche durch die Entwickler der Standardsoftware erstellt worden ist.

### 5.2.2 Vorgehensweise in Österreich

In Österreich werden die Zustandsgrößen direkt durch den Erfasser berechnet und digital aufgezeichnet. Als Verfahrensrichtlinie gelten dabei weitgehend internationale Standards. Nachfolgend werden die in Österreich aufgezeichneten Zustandsgrößen sowie deren Ermittlungshintergrund nach [5] kurz vorgestellt.

- **Oberflächenschäden OS:** Die Berechnung der Zustandsgröße Oberflächenschäden für bituminöse Befestigungen berücksichtigt das Ausmaß und die Schadensschwere von Schäden und Flickstellen, wobei zu den Schäden Bindemittelaustritt, Ausmagerungen, Kornabbrüche, Ablösungen und Abplatzungen sowie Schlaglöcher gezählt werden. Bei Betondecken und Betondecken mit bituminösem Überzug werden darüber hinaus Ausmaß und Schadensschwere festgehalten sowie die Reparaturstellen berücksichtigt.
- **Risse RI:** Die Risse werden in Österreich getrennt von den Oberflächenschäden ausgewertet und bilden eine eigene Zustandsgröße. Zur Zustandsgrößenbildung werden auch hier Ausmaß und Schadensschwere berücksichtigt, wobei bei bituminösen Befestigungen die Einzelrisse und die Netzrisse ausgewertet werden, während bei Betondecken sowie Betondecken mit bituminösem Überzug Einzelrisse und flächenhafte Rissausbreitungen in die Zustandsgrößenbildung eingehen.
- **Spurrinnen SR:** Diese Zustandsgröße wird aus der maximalen Spurrinnentiefe unter der fiktiven 2 m Latte ermittelt.
- **Längsebenheit LE:** Zur Quantifizierung der Längsebenheit wird in Österreich das internationale Unebenheitsmaß IRI (International Roughness Index) berechnet. Die Ermittlung des IRI anhand von Höhenprofilwerten wurde erstmalig im Rahmen eines Großversuches [43] erarbeitet und das Berechnungsverfahren wird derzeit durch die University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI) [44] mit einem standardisiert Sourcecode veröffentlicht.
- **Griffigkeit GR:** Die Griffigkeit wird anhand der Reibwerte ermittelt, welche mit dem Roadstar unter einem konstantem Schlupf von 18 % gemessen worden sind. Falls die Messgeschwindigkeit des Fahrzeugs von der vorgegebenen Soll-Messgeschwindigkeit abweicht, wird eine Geschwindigkeitskorrektur vorgenommen.

- **Textur:** Die Textur wird derzeit in Österreich nur informativ erfasst. Sie wird weder bewertet noch geht sie bei der Teilwertermittlung oder der Ermittlung des Gesamtwertes ein. Als Zustandsgröße werden derzeit vor allem die mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth - MPD) und die geschätzte Profiltiefe (Estimated Profile Depth – ETD) nach der ISO-Norm 13473 [34] berechnet.

## 6. Zustandsbewertung

Die Zustandsgrößen erlauben, Aussagen über die Quantität bestimmter Schadensausprägungen zu erhalten und erlauben somit den Vergleich unterschiedlicher Auswertungsabschnitte bzw. Messabschnitte in Hinblick auf ein bestimmtes Zustandsmerkmal. Für einen merkmalsübergreifenden Vergleich mehrerer Auswertungsabschnitte sind Zustandsgrößen dagegen nicht geeignet, da die Zustandsmerkmale mit unterschiedlichen Einheiten und Skalen quantifiziert werden. So werden beispielsweise Spurrinnen in Millimeter [mm] erfasst, während die Griffigkeit durch einen dimensionslosen Kraftschlussbeiwert ausgedrückt wird. Auch Zustandsgrößen mit gleichen Einheiten lassen sich nicht ohne weiteres vergleichen, so können z.B. zwei Millimeter Spurrinnentiefe als vernachlässigbar betrachtet werden, während zwei Millimeter fiktive Wassertiefe bereits eine unerwünschte Beschädigung der Fahrbahn darstellen.

Um merkmalsübergreifende Vergleiche durchführen zu können, muss daher eine einheitliche Vergleichsbasis geschaffen werden. Sowohl in Deutschland [27], als auch in Österreich [5] wurde dabei der Weg begangen, aus den Zustandsgrößen so genannte „Zustandswerte“ abzuleiten. Zustandswerte sind dimensionslos und haben in beiden Ländern einen Wertebereich zwischen 1 und 5, wobei der Wert 1 einen sehr guten und der Wert 5 einen sehr schlechten Zustand impliziert. Die Skalierung wurde dem Schulnotensystem nachempfunden und erlaubt eine Wertbeurteilung der Zustandsmerkmale, d.h. die zuvor objektiven, physikalischen Messgrößen erhalten durch die Bewertung ein Werturteil. Dies wird besonders deutlich durch die Begriffe „Zielwert“<sup>4</sup> (Note 1,5) „Warnwert“ (Note 3,5) und „Schwellenwert“ (Note 4,5) ausgedrückt. Diese Wertzuweisung an bestimmte Schadensausprägungen erfolgt anhand eines in Forschungsgremien abgestimmten Wertehintergrunds.

Die Verwendung einer einheitlichen Werteskala erlaubt zudem in späteren Auswerteprozessen die Verknüpfung mehrerer Zustandsmerkmale zu Teilzielwerten und zum Gesamtwert. Für die Zustandsbewertung werden die folgenden Begriffe verwendet:

- Die Ermittlung von Zustandswerten aus Zustandsgrößen wird als „**Normierung**“ bezeichnet [27].
- Die Verbindung mehrerer Zustandswerte zu einem Teilwert wird als „**Verknüpfung**“ bezeichnet. Sowohl in Deutschland als auch in Österreich werden jeweils zwei Teilwerte ermittelt
- Die Verbindung der beiden Teilwerte zu einem Gesamtwert hat keine besondere Bezeichnung sondern wird allenfalls als „**Bildung des Gesamtwertes**“ oder als Bestandteil der „Verknüpfung“ (z.B. in [45], [46]) bezeichnet.

---

<sup>4</sup> Mittlerweile wird der Begriff „Zielwert“ nicht mehr verwendet und wurde durch den Begriff „1,5-Wert“ ersetzt.

Der Prozess, welcher die Normierung, die Verknüpfung und die Bildung des Gesamtwertes umfasst, wird zusammenfassend als „Zustandsbewertung“ bezeichnet. Nachfolgend werden die einzelnen Normierungs- und Verknüpfungs- bzw. Bewertungsschritte sowohl für Deutschland als auch für Österreich dargestellt.

## 6.1 Vorgehensweise in Deutschland

Obwohl die Zustandsbewertung seit 1993 jährlich nach einem weitestgehend einheitlichen Muster durchgeführt wird, existieren keine verbindlichen Normen oder Richtlinien zur Normierung, Verknüpfung und Bildung des Gesamtwertes. Die Bewertung beruht in jeder Jahresmessung auf den Vorgaben des Auftraggebers, welche stets auf Empfehlungen und Arbeitspapieren der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen beruhen.

Falls aus fachlichen Gründen eine Modifikation der Bewertungsalgorithmen stattfinden sollte, wurde für die Zustandserfassung- und Bewertung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen angestrebt, zunächst die Arbeitspapiere der Forschungsgesellschaft entsprechend anzupassen und anschließend diese Arbeitspapiere als Vertragsbestandteil in den Ausschreibungsunterlagen einzufügen.

Ein erster Ansatz, die Arbeitspapiere in einem zusammenfassenden, der Öffentlichkeit zugänglichen Dokument zusammenzuführen, wurde mit der „Erstellung eines Leitfadens für die Erfassung und Bewertung des Zustandes von Straßen“ [46] unternommen. Dieses Dokument beschreibt die Vorgehensweise zur Zustandsbewertung, ist aber im Wesentlichen ein Forschungsbericht und hat somit keinen Richtliniencharakter.

Ergänzend wurden daher im Jahr 2005 durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“ (ZTV-ZEB [27]) verabschiedet, welche alle Teilbereiche der ZEB abdeckt und ab der Jahresmessung 2005 Bestandteil der Ausschreibungsunterlagen geworden sind. Durch den Charakter einer „Technischen Vertragsbedingung“ erhalten die Vorgaben eine höhere Rechtsverbindlichkeit bzw. einen Richtliniencharakter, den sie zuvor als Arbeitspapiere bzw. Leitfaden [46] nicht hatten.

Von den generellen Vorgaben der Arbeitspapiere, des Leitfadens [46] und der ZTV-ZEB [27] wurde in der Vergangenheit in einzelnen ZEB-Kampagnen auf Länderebene abgewichen. Dies begründet sich dadurch, dass die Vorgaben der FGSV-Arbeitspapiere auf die Belange der Bundesautobahnen und Bundesstraßen ausgerichtet sind und die Besonderheiten von Landesstraßen nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt wurden. Es wurden daher in Einzelfällen bei Landesstraßenerfassungen vertraglich abweichende Bewertungsvorgaben gemacht.

Da sich die vorliegende Untersuchung auf die Aspekte der Bundesfernstraßen beschränkt, soll dies nicht weiter vertieft werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass

ein Vergleich zwischen Bundesstraßen und Landesstraßen bzw. zwischen einzelnen Landesstraßenerfassungen auf der Basis von Zustandswerten nur bedingt zulässig ist.

In der Abbildung 31 und in der Abbildung 32 ist der gesamte Bewertungsvorgang schematisch für die Deckenbauweisen „Asphalt“ und „Beton“ gemäß dem ZEB-Leitfaden [46] dargestellt. Die abgebildete, grundsätzliche Vorgehensweise ist in die ZTV-ZEB übernommen worden.

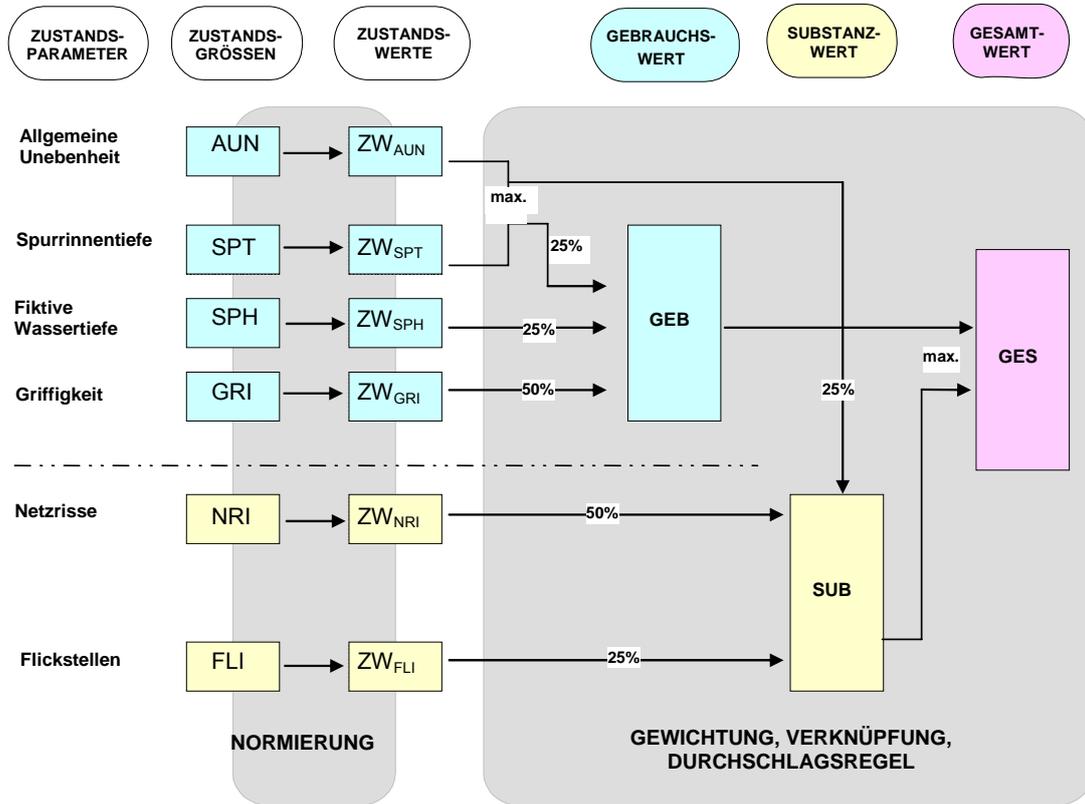


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bewertung von Asphaltdecken [46]

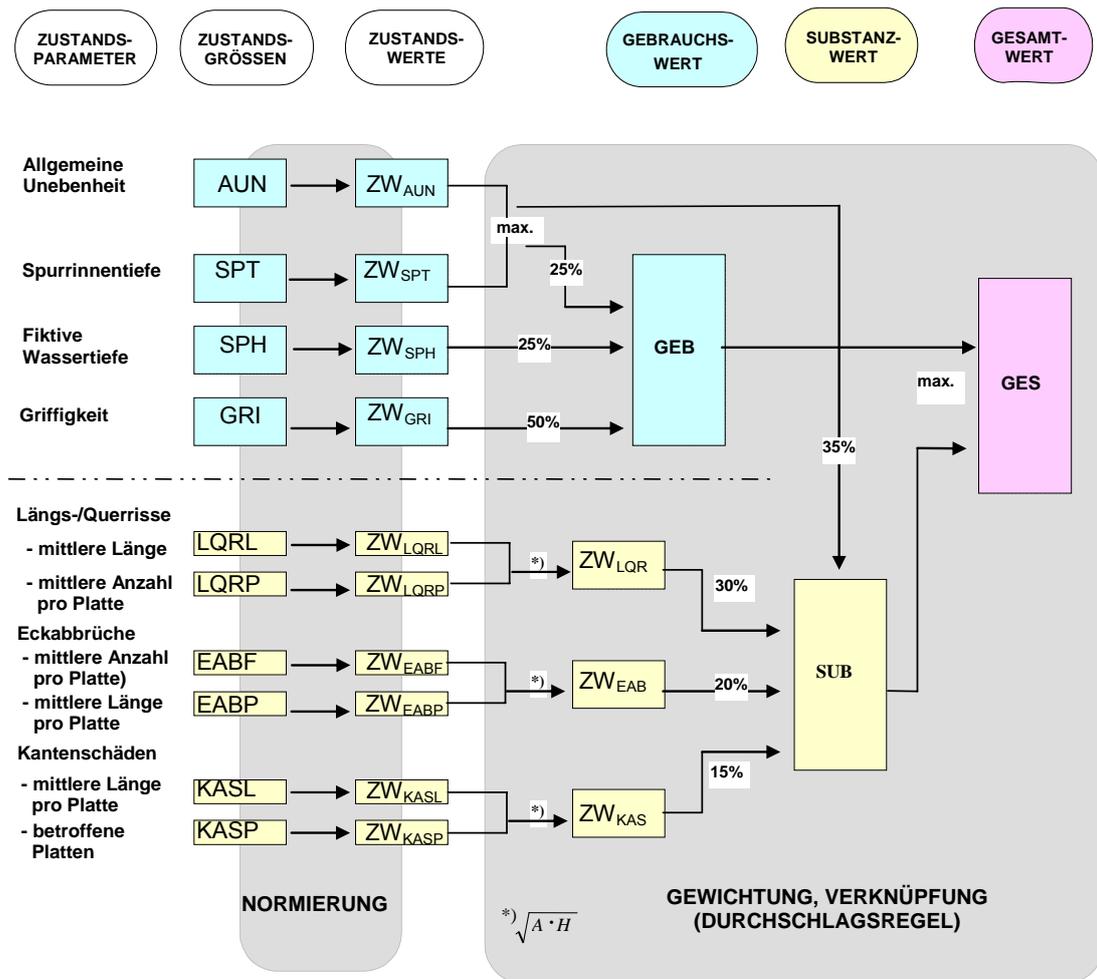


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Bewertung von Betondecken [46]

### 6.1.1 Normierung

In Deutschland wird die Normierung nur für einen Teil der Zustandsgrößen durchgeführt. Diese werden als „bewertungsrelevante Zustandsgrößen“ bezeichnet, da die aus der Normierung resultierenden Zustandswerte im weiteren Verlauf des Bewertungsprozesses, d.h. zur Teilwertbildung und zur Gesamtwertbildung, benötigt werden. Einzige Ausnahme hiervon ist die Zustandsgröße LWI (Längsebenheitswirkindex), welche im Rahmen einer gesonderten Untersuchung [39] als Ergänzung zum bisher einzig bewertungsrelevanten Unebenheitsmaß AUN (Spektrale Dichte) entwickelt worden ist. Für den LWI werden im Rahmen der regulären ZEB Zustandswerte ermittelt, die nicht in die Teilwert- oder Gesamtwertbildung einfließen. Derzeit wird der Bewertungshintergrund für dieses Merkmal im Rahmen eines Forschungsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen geprüft und ggf. neu überarbeitet [41].

Grundsätzlich erfolgt eine Normierung anhand einer Normierungsfunktion, welche in der Regel in vier Teilbereiche eingeteilt ist, die durch drei Kennzahlen (1,5-Wert, Warnwert und Schwellenwert) definiert werden. Die allgemeine Normierungsfunktion kann wie folgt dargestellt werden:

$$ZW = 1,0 \quad \text{für} \quad ZG \leq ZG_1 \quad (6.1)$$

$$ZW = 1,5 + 2 \cdot \frac{ZG - ZG_1}{ZG_2 - ZG_1} \quad \text{für} \quad ZG_1 < ZG \leq ZG_2 \quad (6.2)$$

$$ZW = 3,5 + \frac{ZG - ZG_2}{ZG_3 - ZG_2} \quad \text{für} \quad ZG_2 < ZG \leq ZG_3 \quad (6.3)$$

$$ZW = 5,0 \quad \text{für} \quad ZG_3 < ZG \quad (6.4)$$

Mit:  $ZW$  = aufgrund der Normierung zu ermittelnder Zustandswert

$ZG$  = zu normierende Zustandsgröße

$ZG_1$  = 1,5-Wert des Zustandsmerkmals (ehemals Zielwert)

$ZG_2$  = Warnwert des Zustandsmerkmals

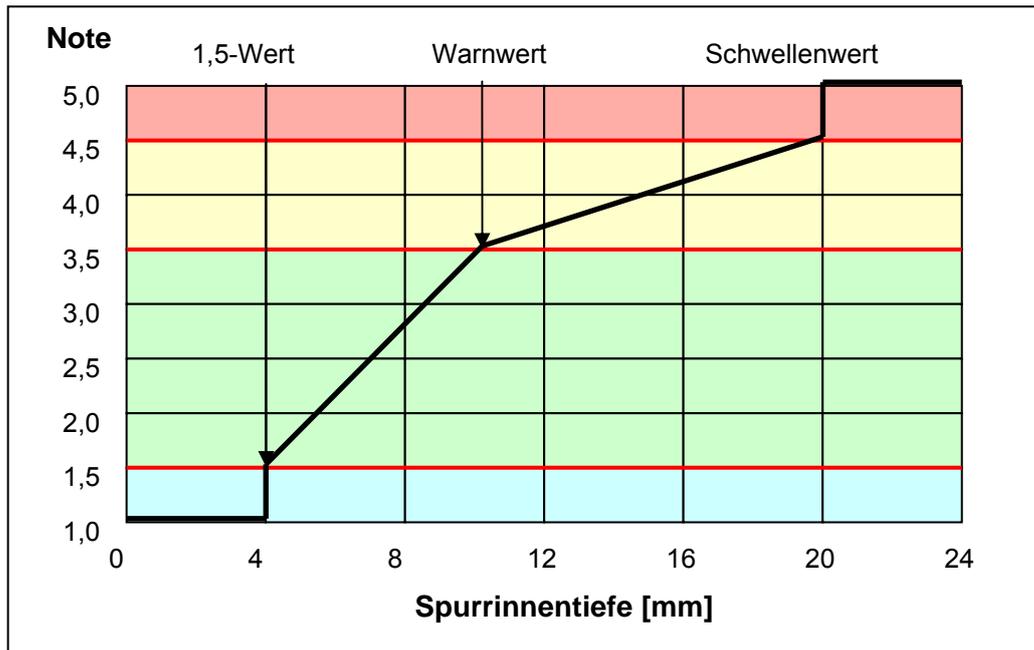
$ZG_3$  = Schwellenwert des Zustandsmerkmals

Die jeweils merkmalsbezogen definierten Kennzahlen zum 1,5-Wert, Warnwert und Schwellenwert werden als „Normierungsparameter“ des Zustandsmerkmals bezeichnet. In der Tabelle 2 sind die Normierungsparameter gemäß ZTV-ZEB [27] wiedergegeben.

Zustandsindikator	Kürzel	Einheit	Freie Strecken		
			1,5-Wert (1,5)	Warnwert (3,5)	Schwellenwert (4,5)
Allgemeine Unebenheit	AUN	cm <sup>3</sup>	1 cm <sup>3</sup>	3 cm <sup>3</sup>	9 cm <sup>3</sup>
Längsebenheitswirkindex	LWI	-	1	3	9
Spurrinntiefe	SPT	mm	4 mm	10 mm	20 mm
Fiktive Wassertiefe	SPH	mm	0,1 mm	4,0 mm	6,0 mm
Griffigkeit $v_{\text{Soll}} = 40$ km/h (BStr – OD)	GRI40	-	0,63	0,49	0,42
Griffigkeit $v_{\text{Soll}} = 60$ km/h (BStr)	GRI60	-	0,58	0,44	0,37
Griffigkeit $v_{\text{Soll}} = 80$ km/h (BAB)	GRI80	0	0,53	0,39	0,32
Risse	RISS	%	1 %	5 %	10 %
Flickstellen	FLI	%	1 %	10 %	15 %
Längs-/Querrisse, mittlere Länge	LQRL	m	0,1 m	2,0 m	4,0 m
Längs-/Querrisse, betroffene Platten	LQRP	%	1 %	23 %	35 %
Eckabbrüche, mittlere Anzahl / Platte	EABF	-	0,01	2,00	3,00
Eckabbrüche, betroffene Platten	EABP	%	1 %	23 %	35 %
Kantenschäden, mittlere Länge	KASL	m	0,1 m	4,0 m	8,0 m
Kantenschäden, betroffene Platten	KASP	%	1 %	23 %	35 %

**Tabelle 2: Normierungsparameter der Freien Strecke der Bundesfernstraßen**

In der Abbildung 33 ist exemplarisch die Normierungsfunktion der Spurrinntiefe anhand der Normierungsgrenzen der ZTV-ZEB [27] wiedergegeben.



**Abbildung 33: Darstellung der Normierungsfunktion für die Spurrinntiefe [27]**

Wie aus dem Diagramm entnommen werden kann, werden für das Zustandsmerkmal „Spurrinntiefe“ bei der Zustandserfassung und -bewertung auf Bundesfernstraßen die folgenden Normierungsparameter vorgegeben:

- SPT = 4 mm (1,5-Wert)
- SPT = 10 mm (Warnwert)
- SPT = 20 mm (Zielwert)

Die oben aufgeführte Darstellung zeigt zudem zwei wesentliche, mathematische Eigenschaften von Normierungsfunktionen.

- Die heutigen Normierungsfunktionen sind im Bereich des 1,5-Wertes und des Schwellenwertes (Note 4,5) unstetig, d.h. die Funktion weist an diesen beiden Stellen einen Sprung auf.
- Der Wertebereich des Zustandswertes ist auf 1 bis 5 beschränkt. Für die zugrunde liegenden Zustandsgrößen gilt hingegen, dass die Werteskala theoretisch sowohl nach unten in den negativen Wertebereich, als auch nach oben unbegrenzt ist. In der Praxis ist zu berücksichtigen, dass auch für die Zustandsgrößen Gültigkeitsbereiche definiert sind [27], so dass diese nur in einem bestimmten, merkmalspezifischen Wertebereich vorkommen können.

Die Unstetigkeiten resultieren aus der historischen Entwicklung der Normierungsfunktionen, welche ursprünglich für die Bewertung visueller Zustandserfassungen konzipiert wurden. Mit der allmählichen Etablierung messtechnischer Zustandserfassungen wurden sie zwar geringfügig modifiziert, aber nie komplett anforderungsgerecht überarbeitet. Sowohl die Unstetigkeit als auch die generelle Aufteilung der Normierungsfunktion in unterschiedliche Steigungsbereiche führen zu Komplikationen bei weiterführenden Auswertemethoden, wie z.B. Prognoseverfahren oder Zustandswertverknüpfungen. Diese Problematik wurde sowohl in den Arbeitspapieren der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen als auch im Leitfaden [46] erkannt und dokumentiert und es wurden Verbesserungsvorschläge formuliert. Durch ein entsprechendes Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen [45] wird derzeit (2005) eine aufgabengerechte Modifikation des Bewertungssystems angegangen.

### 6.1.2 Besonderheiten der Griffigkeit

Die Normierung des Zustandsmerkmals „Griffigkeit“ weist in Hinblick auf die oben formulierte allgemeine Bewertungsfunktion mehrere Besonderheiten auf:

- Im Gegensatz zu den anderen Zustandsmerkmalen führen höhere Werte bei der Zustandsgröße zu kleineren Werten beim Zustandswert. Für die Griffigkeit gilt somit die nachfolgende Normierungsfunktion (Der Unterschied ist nur bei den Zeichen [ $< \leq \geq >$ ] der Bedingungen):

$$ZW = 1,0 \quad \text{für} \quad ZG \geq ZG_1 \quad (6.5)$$

$$ZW = 1,5 + 2 \cdot \frac{ZG - ZG_1}{ZG_2 - ZG_1} \quad \text{für} \quad ZG_1 > ZG \geq ZG_2 \quad (6.6)$$

$$ZW = 3,5 + \frac{ZG - ZG_2}{ZG_3 - ZG_2} \quad \text{für} \quad ZG_2 > ZG \geq ZG_3 \quad (6.7)$$

$$ZW = 5,0 \quad \text{für} \quad ZG_3 > ZG \quad (6.8)$$

- Die Griffigkeit wird auf den beiden Bundesfernstraßenkategorien (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) mit unterschiedlichen Soll-Messgeschwindigkeiten erfasst. Da bei der Zustandsgrößenermittlung die Griffigkeit stets auf eine bestimmte Bezugsgeschwindigkeit bezogen werden muss, werden für Bundesautobahnen ( $v_{\text{soll}}=80$  km/h) und Bundesstraßen (außerorts  $v_{\text{soll}}=60$  km/h und innerorts  $v_{\text{soll}}=40$  km/h) faktisch unterschiedliche Zustandsgrößen berechnet, die nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind. Die ZEB unterscheidet daher zwischen der Zustandsgröße GRI80, GRI60 und GRI40. Dies hat die Folge, dass auch unterschiedliche Normierungsfunktionen erstellt worden sind.

### 6.1.3 Besonderheiten beim Oberflächenbild der Betonfahrbahnen

Für die Strecken, deren Fahrbahndecken in Betonbauweise ausgeführt sind, werden anhand des Oberflächenbildes die Zustandsmerkmale „Längs- und Querrisse“ (LQR), „Eckabbrüche“ (EAB) und „Kantenschäden“ (KAS) aufgenommen. Zu jedem Merkmal werden jeweils zwei Zustandsgrößen ermittelt, welche zum einen die absolute Schadensmenge, zum anderen die relative Beschädigung des Auswerteabschnitts quantifizieren.

Bei jedem Merkmal existieren zu beiden Zustandsgrößen jeweils eigene Normierungsfunktionen, so dass zu jedem Merkmal jeweils zwei Zustandswerte ermittelt werden können. So werden z.B. für das Merkmal „Kantenschäden“ sowohl ein Zustandswert zur mittleren absoluten Länge der Kantenschäden (ZWKASL) als auch zum relativen Anteil der betroffenen Platten (ZWKASP) ermittelt. Dies verhält sich ähnlich wie bei der Auswertung des Querprofils, bei dem aus einem Querprofil ebenfalls zwei unterschiedliche, unabhängige Zustandsgrößen (Spurrinnentiefe und Fiktive Wassertiefe) ermittelt werden, die auch jeweils getrennt normiert werden. Anders als beim Querprofil werden aber die Zustandswerte des Oberflächenbildes bei Betonfahrbahndecken zu einem gemeinsamen merkmalsbezogenen Zustandswert zusammengefasst, d.h. dass die Zustandswerte ZWKASL und ZWKASP zu einem Zustandswert ZWKAS verbunden werden.

Die Verbindung der Zustandswerte zu den Betonschäden erfolgt für alle drei Zustandsmerkmale durch die Bildung des geometrischen Mittelwertes.

$$ZWLQR = \sqrt{ZWLQRL \cdot ZWLQRP} \quad (6.9)$$

$$ZWEAB = \sqrt{ZWEABF \cdot ZWEABP} \quad (6.10)$$

$$ZWKAS = \sqrt{ZWKASL \cdot ZWKASP} \quad (6.11)$$

### 6.1.4 Besonderheiten der Ortsdurchfahrten

In Deutschland werden Teilstrecken von Bundesstraßen durch geschlossene Ortslagen geführt. Grundlage für die Behandlung dieser so genannten Ortsdurchfahrten sind die Ortsdurchfahrtenrichtlinien ODR [47], in denen unter anderem die Baulastzugehörigkeit geregelt ist. Im Einzelnen ist vorgegeben, dass Bundesstraßen, welche durch Gemeinden mit weniger als 80.000 Einwohnern verlaufen, in der Baulast des Bundes verbleiben, während bei Gemeinden mit mehr als 80.000 Einwohnern die Baulast der Gemeinde zufällt<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Gemeinden mit mehr als 50.000, aber weniger als 80.000 Einwohnern können verlangen, Träger der Baulast der Bundesstraßen für den Ortsdurchfahrtsbereich zu werden.

Da die regelmäßigen Zustandserfassungen auf Bundesfernstraßen durch den Baulastträger „Bund“ veranlasst, organisiert und finanziert werden, werden dabei nur Ortsdurchfahrten erfasst, die sich in der Baulast des Bundes befinden. Diese Teilstrecken unterscheiden sich von den „Freien Strecken“, da in Ortslagen das Nutzungsspektrum des Baukörpers Straße durch die Einbindung in eine bebaute und bewohnte Ortschaft erweitert wird. Bei der Gestaltung von Ortsdurchfahrtbereichen müssen folgende Punkte zusätzlich beachtet werden:

- Bei der Verkehrssicherheit muss verstärkt auf die Belange des nichtmotorisierten Verkehrs und der Fußgänger Rücksicht genommen werden.
- Die Lärm- und Schadstoffimmissionen der Fahrzeuge betreffen eine größere Anzahl von Personen. Viele davon werden durch die Immissionen in ihrem Wohnraum betroffen.
- Der Straßenraum soll zusätzlich auch Möglichkeiten für den ruhenden Verkehr erhalten.
- Der Straßenraum hat in Ortslagen auch Aufenthaltsfunktion (Gaststätten, Volksfeste).
- Bestehende Bebauung schränkt die Möglichkeiten der Trassenführung ein.
- Die Gestaltung des Straßenraums muss sich in das allgemeine Ortsbild einfügen und hat einen höheren Stellenwert als in unbebauten Gebieten.

Unter diesen zusätzlichen Anforderungen ist es gerechtfertigt, die Zielsetzungen der Straßengestaltung in Ortsdurchfahrten gegenüber der Freien Strecke zu modifizieren und die Zielerfüllung in bestimmten Teilbereichen zu reduzieren [48]. Insbesondere erscheint es angebracht, zuzulassen, dass die Befahrungsqualität durch Einführung von Geschwindigkeitsbeschränkungen reduziert wird, wenn dadurch die Erfüllung anderer Teilziele (Sicherheit, Immissionsminderung, mehr Straßenraum) erhöht werden kann. Andere Maßnahmen, wie z.B. die Einführung von Kreuzungshilfen für Fußgänger (Lichtsignalanlagen, Fußgängerüberwege), das Zulassen starker Trassenkrümmungen oder die Verminderung der Querschnittsbreite zugunsten ortsbildgerechter Bebauung oder von Parkflächen, führen häufig ebenfalls zu einer Verminderung der Befahrungsqualität zugunsten anderer Teilziele.

Vor diesem Hintergrund wurden im Jahr 2002 in einer Untersuchung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen [49] modifizierte Normierungsparameter für die Zustandserfassung und -bewertung in Ortsdurchfahrten erarbeitet. Es wurde angenommen, dass durch die allgemein praktizierte Geschwindigkeitsreduktion Straßenschäden eine geringere Auswirkung haben, so dass die gleiche Schadensausprägung (die gleiche Zustandsgröße) in Ortsdurchfahrten zu einem günstigeren Zustandswert führen sollte, als auf der Freien Strecke. In der Tabelle 3 sind die vorge-

schlagenen Normierungsparameter für die Ortsdurchfahrtsbereiche wiedergegeben, welche seit der ZEB-Jahresmessung 2003 bereits regulär angewendet werden.

Zustandsindikator	Kürzel	Einheit	Ortsdurchfahrten		
			1,5-Wert (1,5)	Warnwert (3,5)	Schwellenwert (4,5)
Allgemeine Unebenheit	AUN	cm <sup>3</sup>	2 cm <sup>3</sup>	6 cm <sup>3</sup>	18 cm <sup>3</sup>
Längsebenheitswirkindex	LWI	-	1	3	9
Spurrinntiefe	SPT	mm	4 mm	20 mm	30 mm
Fiktive Wassertiefe	SPH	mm	0,1 mm	8,0 mm	12,0 mm
Griffigkeit $v_{\text{soil}} = 40 \text{ km/h}$ (BStr)	GRI40	-	0,67	0,53	0,46
Risse	RISS	%	1 %	15 %	25 %
Aufgelegte Flickstellen	AFLI	%	1 %	15 %	25 %
Längs-/Querrisse, mittlere Länge	LQRL	m	0,1 m	2,0 m	4,0 m
Längs-/Querrisse, betroffene Platten	LQRP	%	1 %	23 %	35 %
Eckabbrüche, mittlere Anzahl pro Platte	EABF	-	0,01	2,00	3,00
Eckabbrüche, betroffene Platten	EABP	%	1 %	23 %	35 %
Kantenschäden, mittlere Länge	KASL	m	0,1 m	2,0 m	4,0 m
Kantenschäden, betroffene Platten	KASP	%	1 %	23 %	35 %

**Tabelle 3: Normierungsparameter der Ortsdurchfahrten der Bundesfernstraßen [27]**

Neben den Normierungsparametern unterscheiden sich nach Vorgabe des Forschungsberichtes [49] die Ortsdurchfahrten von der Freien Strecke dadurch, dass das Zustandsmerkmal „Flickstellen“ unterschiedlich ausgewertet wird. In Ortsdurchfahrtsbereichen wird seit der Zustandserfassung und -bewertung des Jahres 2004 zwischen eingelegten Flickstellen (EFLI) und aufgebrauchten Flickstellen (AFLI) unterschieden.

Der Hintergrund ist, dass manche Flickstellen zur Flickung und Versiegelung von Rissen aufgebracht werden, während andere durch sonstige Arbeiten, z.B. durch Aufgrabungen, Leitungsverlegungen oder Ähnliches entstehen und eingelegt werden. Weiterhin wird angenommen, dass eingelegte Flickstellen bei korrekter Ausführung keinen wesentlichen Schaden des Oberbaus darstellen bzw. die dadurch entstehenden Schäden durch die Erfassung der anderen Zustandsmerkmale (Längs- und Querebenheit, Griffigkeit) ausreichend berücksichtigt werden. Demgegenüber sind aufgebrauchte Flickstellen weiterhin ein Indiz für einen tief beschädigten Oberbau. Im Gegensatz zu den Freien Strecken treten in Ortsdurchfahrten eingelegte Flickstellen besonders häufig auf.

Ein besonderes Problem ergibt sich dadurch, dass bei der Verknüpfung der Zustandswerte zu den Teilwerten und zum Gesamtwert (siehe unten) schlechte Flickstellen-Zustandswerte verfahrensbedingt „durchschlagen“ und somit nach der alten Bewertungsmethode korrekt ausgeführte, eingelegte Flickstellen zu einer ungerechtfertigt

schlechten Gesamtbeurteilung führen. Nach der im Forschungsbericht [49] neu vorgeschlagenen Bewertungsmethode werden in Ortsdurchfahrtsbereichen nur noch die aufgelegten Flickstellen bewertet.

### 6.1.5 Teilwertbildung

Wie bereits oben ausgeführt, werden die Zustandsgrößen und Zustandswerte jeweils aus einzelnen Zustandsmerkmalen abgeleitet und bilden einzeln betrachtet den Gesamtzustand der Straße nur unvollständig ab. Für eine gesamtheitliche Betrachtung ist es daher notwendig, die verschiedenen Merkmale zu einer merkmalsübergreifenden Beurteilungsgröße zu verknüpfen.

In Deutschland und in Österreich werden zwei zustandsabhängige Teilziele des Erhaltungsmanagements unterschieden:

- Die Qualität der Straße aus Sicht des Straßennutzers, ausgedrückt durch den **Gebrauchswert**
- Die Qualität der Straße aus Sicht des Erhalters, ausgedrückt durch den **Substanzwert**

Der Unterscheidung dieser beiden Größen ist nicht unmittelbar augenfällig, da der Erhalter rechtlich die Aufgabe hat, den Gebrauchszustand der Straße (ausgedrückt durch die beiden Teilziele Sicherheit und Fahrkomfort) aufgrund der ihm gegebenen Möglichkeiten bestmöglich zu erhalten und sich somit seine Qualitätssicht mit der des Nutzers decken sollte. In der Praxis berücksichtigt der Erhalter aber zusätzliche Anforderungen. Bei seinen Entscheidungen sind auch die Ziele „Umweltfreundlichkeit“ und „Wirtschaftlichkeit“ zu verfolgen.

In manchen Fällen kann es vorkommen, dass auf einer Strecke mit ausreichendem Gebrauchszustand aus langfristigen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen eine Erhaltungsmaßnahme angebracht erscheint. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn eine verstärkte Rissbildung bei ansonsten guter Ebenheit und ausreichender Griffigkeit auftritt. Es wird davon ausgegangen, dass Risse die Sicherheit und den Fahrkomfort einer Strecke nicht direkt beeinflussen. Da aber durch Wassereindringung, Auswaschung und Frost langfristig gebrauchsmindernde Schäden entstehen können, die nur durch kostenaufwändige Maßnahmen behoben werden können, erscheint es angebracht, die Risse durch eine kostengünstige Oberflächenmaßnahme (z.B. Flicker) rechtzeitig zu versiegeln.

Bei der Bildung des Gebrauchswertes werden nur Zustandsmerkmale einbezogen, bei denen ein unmittelbarer Einfluss auf Fahrkomfort und Sicherheit unterstellt wird:

- Die Allgemeine Unebenheit (AUN) vermindert unmittelbar den Fahrkomfort und führt bei Überfahrungen mit erhöhter Geschwindigkeit zu einer stellenweise

verminderten Auflagekraft und somit zu einer Verringerung der übertragbaren Brems- und Lenkkräfte. Letzteres beeinflusst die Fahrsicherheit negativ.

- Der Längsebenheitswirkindex (LWI) ist ein die AUN ergänzendes Merkmal, welches über ein Schwingungsmodell die Auswirkungen der Längsebenheiten auf Mensch, Ladung und Achse modelliert und quantifiziert. Dieses Merkmal wurde erst vor wenigen Jahren [39] entwickelt und wird bisher nicht bei der Bildung der Teilwerte oder des Gesamtwertes berücksichtigt. Zur Einbindung des LWI in den regulären Bewertungsprozess wird derzeit eine gesonderte Forschung [41] durchgeführt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der LWI sowohl für den Gebrauchswert als auch für den Substanzwert relevant sein sollte.
- Spurrinnen (SPT) vermindern ebenfalls den Fahrkomfort und stellen insbesondere für Krafträder aufgrund der Spurführung eine Sicherheitsgefahr dar.
- Die Fiktive Wassertiefe (SPH) ist ein unmittelbares Indiz für Wasseransammlungen bei Regen und somit für die Gefahr von Aquaplaning.
- Die Griffigkeit (GRI) ist ebenfalls ein Faktor, der die Fahrsicherheit einer Strecke direkt beeinflusst. Er ist ein direkter Ausdruck für die Fähigkeit der Straßenoberfläche, Kraftschluss mit dem Fahrzeugreifen herzustellen und ist somit relevant für die Umsetzbarkeit aller Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge.

Bei der Bildung des Substanzwertes werden jene Zustandsmerkmale berücksichtigt, die auf eine dauerhafte Beschädigung der Fahrbahnsubstanz hindeuten.

- Die Allgemeine Unebenheit (AUN) ist das Resultat von Schäden, die in allen Schichten des Oberbaus bzw. sogar im Unterbau vorkommen können. Gründe für solche Unebenheiten sind Mängel der tiefer liegenden Schichten, mangelnde Fertigungsqualität (Einbau, Verdichtung, Material), nicht anforderungsgerechte Dimensionierung (Fehldimensionierung, Überlastung durch Anstieg des Schwerverkehrs) oder Überschreitung der Nutzungsdauer eines Streckenabschnitts.
- Auch der Längsebenheitswirkindex (LWI) ist ein Indikator für Längsunebenheiten und sollte somit wie auch die AUN in Hinblick auf die Bildung des Substanzwertes berücksichtigt werden. Wie bereits oben erwähnt, wird der LWI derzeit noch nicht bei der Verknüpfung berücksichtigt, was aber auf Basis einer aktuell noch laufenden Studie [41] zukünftig geändert werden soll.
- Spurrinnen (SPT) sind Unebenheiten und Verwerfungen, welche in Analogie zu der AUN aus Schäden in allen Schichten des Oberbaus und im Unterbau resultieren können.

- Netzrisse (NRI) von Asphaltdecken sind aufgrund des eindringenden Wassers eine Gefahr, da sie zu langfristigen Beschädigungen tiefer liegender Schichten führen können. Darüber hinaus können sichtbare Risse an der Oberfläche die Ausläufer von tiefer liegenden Rissen sein, die auf eine Beschädigung des gesamten Oberbaus hindeuten.
- Flickstellen (FLI) auf Asphaltdecken sind (außerorts) ein Hinweis auf versiegelte Netzrisse. Unter der Annahme, dass Netzrisse auch aufgrund von tiefer liegenden Beschädigungen des Oberbaus entstanden sein können, können Flickstellen ein Hinweis für unbehandelte Substanzschäden sein.
- Längs- und Querrisse (LQR) auf Decken in Betonbauweise resultieren in der Regel aus Unebenheiten im Untergrund oder in den Tragschichten bzw. aus einer zu hohen Verkehrsbelastung und stellen ähnlich wie auf Asphaltdecken durch den Wassereindrang eine Gefahr für den gesamten Oberbau dar.
- Eckabbrüche (EAB) auf Decken in Betonbauweise können, sofern sie unversiegelt bleiben, zu weitergehenden Schäden an Betonplatten führen.
- Kantenschäden (KAS) auf Decken in Betonbauweise sind ebenfalls eine langfristige Schadensquelle und ein Hinweis auf fehlerhafte Fugenherstellung, mangelnde Betongüte, besondere Einflüsse (z.B. Überanspruchung durch Verkehr) oder fehlerhafte (schief liegende) Verdübelung.

Die Bildung der beiden Teilwerte ist an dem Verfahren der Nutzwertanalyse angelehnt. Die Zustandswerte werden mit Gewichtungsfaktoren multipliziert und addiert. Im Unterschied zur gewöhnlichen Nutzwertanalyse enthält die Verknüpfungsfunktion eine Logarithmusbildung (siehe weiter unten) und es muss zudem die „Durchschlagsregel“ beachtet werden, welche gemäß ZTV-ZEB [27] folgendermaßen definiert wird:

*„Ist der errechnete Teilwert kleiner als die zum Teilwert zugehörigen Zustandswerte oder kleiner als mehrere zugehörige Zustandswerte, die gleich oder größer als der Warnwert sind, so wird jeweils der größte aller teilwertrelevanten Zustandswerte als Teilwert gesetzt.“*

Bei der Bildung des Substanzwertes wird zwischen Asphalt- und Betondecken unterschieden, indem verschiedene Zustandsmerkmale in die Teilwertbildung einfließen. Zudem muss seit der Messkampagne 2004 auf Strecken in Asphaltbauweise auch zwischen Freier Strecke und Ortsdurchfahrten unterschieden werden, da in Ortsdurchfahrten ausschließlich das Zustandsmerkmal AFLI (aufgebrachte Flickstellen) bewertungsrelevant ist.

Nachfolgend sind die Gleichungen für die Teilwertbildung wiedergegeben. Die aufgeführten Merkmalskürzel sind dabei stets als Zustandswerte (z.B. AUN → ZWAUN) zu verstehen.

Für  $AUN < 3,5$  und  $SPT < 3,5$  und  $SPH < 3,5$  und  $GRI < 3,5$ : (6.12)

$$GEB = 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN; SPT) - 1) \cdot 25 + (SPH - 1) \cdot 25 + (GRI - 1) \cdot 50}{4} \right)^{2,14} \right)$$


---

Für  $AUN \geq 3,5$  oder  $SPT \geq 3,5$  oder  $SPH \geq 3,5$  oder  $GRI \geq 3,5$ : (6.13)

$$GEB = Max \left( 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN; SPT) - 1) \cdot 25 + (SPH - 1) \cdot 25 + (GRI - 1) \cdot 50}{4} \right)^{2,14} \right); AUN; SPT; SPH; GRI \right)$$


---

Für Asphaltdecken der Freien Strecke mit  $AUN < 3,5$  und  $SPT < 3,5$  und  $NRI < 3,5$  und  $FLI < 3,5$ :

$$SUB_{A,FS} = 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN; SPT) - 1) \cdot 25 + (NRI - 1) \cdot 50 + (FLI - 1) \cdot 25}{4} \right)^{2,14} \right) \quad (6.14)$$


---

Für Asphaltdecken der Freien Strecke mit  $AUN \geq 3,5$  oder  $SPT \geq 3,5$  oder  $NRI \geq 3,5$  oder  $FLI \geq 3,5$ : (6.15)

$$SUB_{A,FS} = Max \left( 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN; SPT) - 1) \cdot 25 + (NRI - 1) \cdot 50 + (FLI - 1) \cdot 25}{4} \right)^{2,14} \right); AUN; SPT; NRI; FLI \right)$$


---

Für Asphaltdecken der Ortsdurchfahrten mit  $AUN < 3,5$  und  $SPT < 3,5$  und  $NRI < 3,5$  und  $AFLI < 3,5$ :

$$SUB_{A,OD} = 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN; SPT) - 1) \cdot 25 + (Max(NRI; AFLI) - 1) \cdot 75}{4} \right)^{2,14} \right) \quad (6.16)$$


---

Für Asphaltdecken der Ortsdurchfahrten mit  $AUN \geq 3,5$  oder  $SPT \geq 3,5$  oder  $NRI \geq 3,5$  oder  $AFLI \geq 3,5$ : (6.17)

$$SUB_{A,OD} = Max \left( 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN; SPT) - 1) \cdot 25 + (Max(NRI; AFLI) - 1) \cdot 75}{4} \right)^{2,14} \right); AUN; SPT; NRI; AFLI \right)$$


---

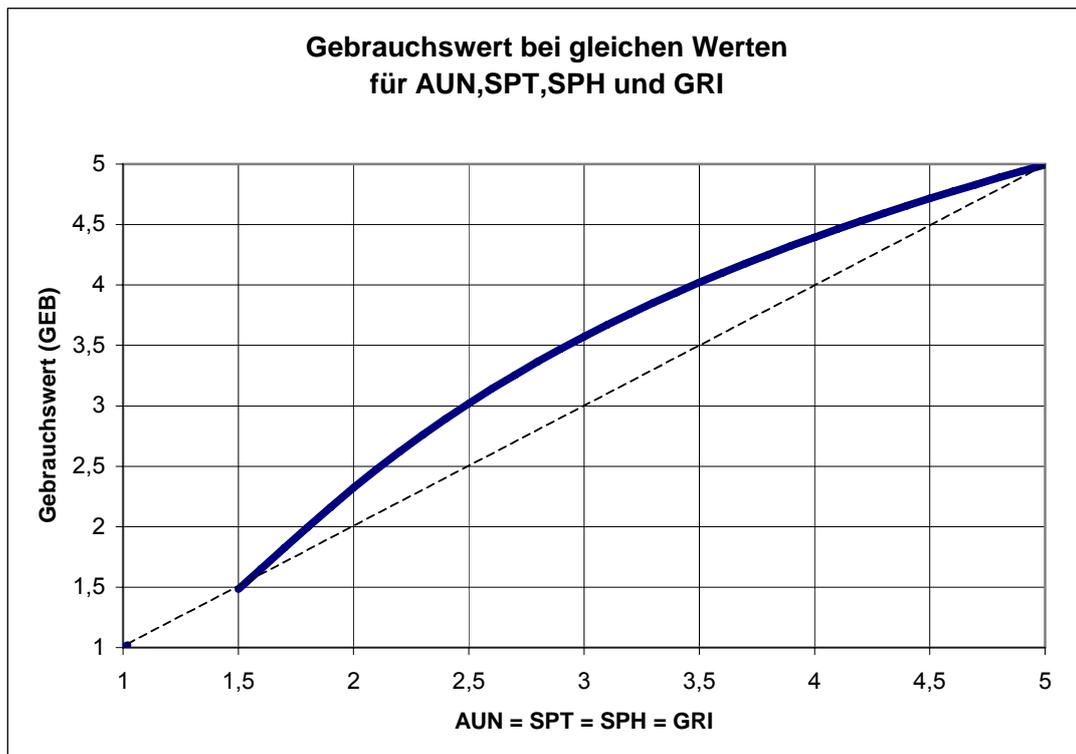
Für Betondecken mit  $AUN < 3,5$  und  $SPT < 3,5$  und  $LQR < 3,5$  und  $EAB < 3,5$  und  $KAS < 3,5$ :  
 (6.18)

$$SUB_B = 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN;SPT)-1) \cdot 35 + (LQR-1) \cdot 30 + (EAB-1) \cdot 20 + (KAS-1) \cdot 15}{4} \right)^{2,14} \right)$$

Für Betondecken mit  $AUN \geq 3,5$  und  $SPT \geq 3,5$  und  $LQR \geq 3,5$  und  $EAB \geq 3,5$  und  $KAS \geq 3,5$ :  
 (6.19)

$$SUB_B = \text{Max} \left( 1 + \ln \left( 1 + 0,0028 \cdot \left( \frac{(Max(AUN;SPT)-1) \cdot 35 + (LQR-1) \cdot 30 + (EAB-1) \cdot 20 + (KAS-1) \cdot 15}{4} \right)^{2,14} \right); AUN; SPT; LQR; EAB; KAS \right)$$

Die Logarithmusbildung führt dazu, dass die Teilwerte einer Strecke schlechter werden können, als der arithmetische Mittelwert. In der Abbildung 34 ist dargestellt, wie sich der Gebrauchswert verhält, wenn die Eingangsgrößen (Zustandswerte für AUN, SPT, SPH und GRI) kontinuierlich um den gleichen Betrag erhöht werden.



**Abbildung 34: Einfluss der Logarithmusbildung auf den Gebrauchswert**

Die Durchschlagsregel führt dazu, dass beim Überschreiten des Warnwertes (Note 3,5) durch einen der teilwertrelevanten Zustandswerte der Gebrauchswert auf diesen Wert angehoben wird. In der Abbildung 35 ist der Fall dargestellt, dass gebrauchswertrelevante Zustandsmerkmale in sehr gutem Zustand (Note = 1,0) bleiben, während die Griffigkeit kontinuierlich verschlechtert wird.

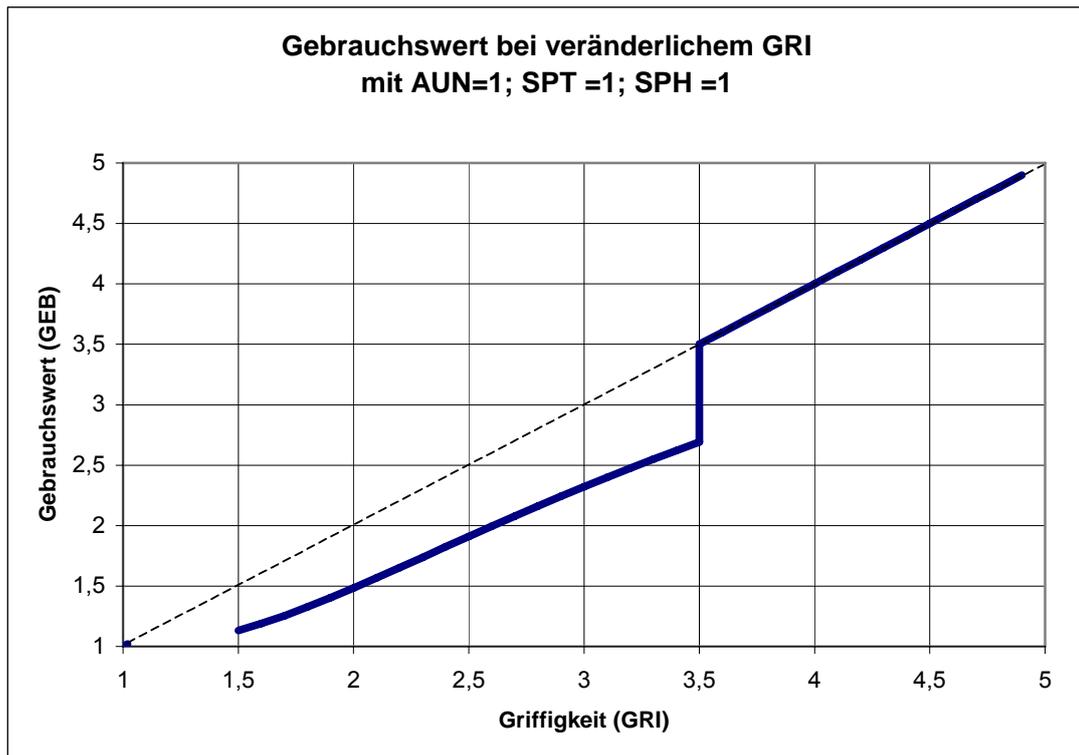


Abbildung 35: Einfluss der Durchschlagsregel auf den Gebrauchswert

Der Gebrauchswert bleibt zunächst aufgrund der sehr guten Ebenheit im unteren Bereich, sobald aber die Griffigkeit den Warnwert überschreitet, erhält die Kurve eine Unstetigkeit.

In Deutschland berücksichtigt die allgemeine Definition des Substanzwertes nach [27] nicht das Alter des Oberbaus als Einflussfaktor. Im Rahmen der Sonderanwendung „PMS“ wird aber unterschieden zwischen einem rein zustandsabhängigen „Substanzwert Zustand“ und einem altersbedingten „Substanzwert Bestand“. Diese Unterscheidung begründet sich vor allem aufgrund technischer Randbedingungen des PMS, die ansonsten dazu führen, dass kurzfristige Oberflächenbehandlungen im Rahmen der Maßnahmenanalyse favorisiert werden würden.

### 6.1.6 Gesamtwertbildung

Aus den beiden Teilwerten „Gebrauchswert“ und „Substanzwert“ geht der Gesamtwert als Maximum der beiden Werte hervor.

$$GW = \text{Max}(GEB; SUB) \quad (6.20)$$

Mit:  $GW$  = Gesamtwert

$GEB$  = Gebrauchswert

$SUB$  = Substanzwert

Dies entspricht der Vorstellung, dass die Gesamtbeurteilung einer Straße dann schlecht ausfallen sollte, wenn auch nur eines der beiden Belange Gebrauchsverhalten oder Substanzerhalt ungenügend bewertet wurden.

## 6.2 Vorgehensweise in Österreich

Wie in Deutschland folgt die Zustandsbewertung in Österreich einem weitgehend einheitlichen Muster, das durch die wiederholt durchgeführten Straßenzustandserfassungen geprägt und aufgrund von kontinuierlichen Weiterentwicklungen bedarfsgerecht erweitert worden ist. Die erste, bundesweite messtechnische Zustandserfassung (Autobahnen, Schnellstraßen und Straßen der Kategorie B) wurde in den Jahren 1991 bis 1996 durchgeführt. Hierbei wurde auch erstmalig ein Bewertungsverfahren [50] erarbeitet und angewendet. Dieses Verfahren wurde bei der Folgerfassung [51] im Jahr 1999 unverändert beibehalten. Die Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches PMS führte im Jahr 2001 zu einer erneuten kritischen Auseinandersetzung mit dem praktizierten Bewertungsverfahren. In der entsprechenden Arbeit [5] wurde vorgeschlagen, die bis dahin verwendeten polygonalen Normierungsfunktionen zu vereinfachen, indem Näherungskurven mit einer geringeren Anzahl von Stützpunkten eingesetzt werden. In der Ausarbeitung wurden Vorschläge für vereinfachte Kurven erarbeitet und mit Erfolg angewendet. Diese Vereinfachung erlaubte bei der Anwendung des PMS eine Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeit, ohne dass die Bewertungsergebnisse wesentlich beeinflusst werden.

Gleichzeitig ergab sich mit dem Einsatz des PMS 1999 auch die Notwendigkeit, nicht nur die Einzelmerkmale getrennt zu bewerten, sondern auch ein Verfahren zu entwickeln, welches zusammengefasste, auf das Erhaltungsziel bezogene, charakteristische Kennwerte liefern kann. Diese Arbeiten stellen die Grundlage des heutigen österreichischen Zustandsbewertungsverfahrens dar, welches wie auch in Deutschland aus den folgenden, aufeinander aufbauenden Schritten besteht.

- **Normierung:** Überführung der unterschiedlich dimensionierten Zustandsgrößen in Zustandswerte mit einheitlicher Notenskala (Note 1 bis 5)
- **Verknüpfung:** Zusammenfassung unterschiedlicher Zustandswerte zum Gebrauchs- und Substanzwert. Dies erfolgt in Österreich unter Einbeziehung des Alters unterschiedlicher Schichten.
- **Bildung des Gesamtwertes**

Die derzeitige Praxis der Bewertung der Bundesstraßen der Kategorien A und S folgt weitestgehend dem im Jahr 1999 erarbeiteten, auf vereinfachte Bewertungsfunktionen basierenden Verfahren. In den folgenden Jahren wurde zudem eine bis dahin fehlende vereinfachte Bewertungsfunktion für das Zustandsmerkmal Griffigkeit entwickelt und im Rahmen einer zusammenfassenden Beschreibung des Bewertungsverfahrens [52]

dokumentiert. Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben den aktuellen Stand (2005) des Bewertungsverfahrens.

### 6.2.1 Normierung

Ähnlich wie in Deutschland in Österreich erfolgt die Bestimmung von Zustandswerten aus Zustandsgrößen anhand von abschnittsweise linearen Normierungsfunktionen. In den ursprünglichen Ansätzen konnten pro Normierungsfunktion bis zu fünf stetige, lineare Bereiche unterschieden werden. In den aktuellen Ansätzen [52] ist für jedes Merkmal jeweils nur ein Bereich definiert.

Die allgemeine Normierungsfunktion<sup>6</sup> lautet:

$$ZW = d_i + k_i \cdot ZG \quad \text{wobei: } ZW_{Min} \leq ZW \leq ZW_{Max} \quad (6.21)$$

Mit:  $ZW$  = Zu ermittelnder Zustandswert in den Grenzen  $ZW_{Min}$  und  $ZW_{Max}$

$d_i, k_i$  = Normierungsparameter des Merkmals  $i$

Die Normierungsparameter der einzelnen Funktionen sind in der Tabelle 4 systematisch zusammengestellt worden.

Zustandsmerkmal	d	k	ZW <sub>Min</sub>	ZW <sub>Max</sub>
Oberflächenschäden	1	0,0875	1,0	5,0
Risse (jeweils für Decke und geb. TS)	1	0,35	1,0	5,0
Spurrinnen	1	0,175	1,0	5,0
Längsebenheit	1	0,7778	1,0	5,0
Griffigkeit	9,9286	-14,286	1,49	5,0

**Tabelle 4: Normierungsparameter für die Zustandsbewertung entsprechend [52]**

Für die weiterführende Beurteilung des Merkmals „Risse“ wird je nach Bauweise unterschiedlich vorgegangen. Bei Asphaltbefestigungen wird ein über die Dicke der Deckschicht und der obersten bituminösen, gebundenen Tragschicht gewichteter Mittelwert errechnet.

$$ZW_{RI,Asphalt} = \frac{ZW_{RI,Decke} \cdot D_{Decke} + ZW_{RI,geb.TS} \cdot D_{geb.TS}}{D_{Decke} + D_{geb.TS}} \quad (6.22)$$

Mit:  $ZW_{RI,Asphalt}$  = Zustandswert Risse der Asphaltbefestigung

$ZW_{RI,Decke}$  = Zustandswert Risse der Asphaltdecke

<sup>6</sup> In allen Gleichungen dieses Kapitels wurde auf die in [5] und [52] üblichen Indizes  $j$  und  $t$  verzichtet. Diese Indizes drückten aus, dass unterschiedliche Abschnitte (Index  $j$ ) zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Index  $t$ ) mit unterschiedlichen Attributgrößen, also auch unterschiedlichen Zustandsdaten belegt werden. Diese Form der Indizierung ist für die Algorithmendefinition eines PMS unverzichtbar, kann aber bei der hier gegebenen, allgemeinen Verfahrensvorstellung entfallen.

$ZW_{RI,geb.TS}$  = Zustandswert Risse der gebundenen Tragschicht

$D_{Decke}$  = Dicke der der Asphaltdecke

$D_{geb.TS}$  = Dicke der gebundenen Tragschicht

Bei Betondecken ohne bituminösen Überzug wird der Zustandswert Risse dem Zustandswert der Decke gleichgesetzt.

$$ZW_{RI,Beton} = ZW_{RI,Decke} \quad (6.23)$$

Mit:  $ZW_{RI,Beton}$  = Zustandswert Risse für Betondecken ohne bituminösem Überzug

$ZW_{RI,Decke}$  = Zustandswert Risse der Decke

Bei Betondecken mit bituminösem Überzug wird der Zustandswerte Risse dem der Tragschicht gleichgesetzt.

$$ZW_{RI,Beton+bit.Überzug} = ZW_{RI,geb.TS} \quad (6.24)$$

Mit:  $ZW_{RI,Beton+bit.Überzug}$  = Zustandswert Risse für Betondecken mit bituminösem Überzug

$ZW_{RI,geb.TS}$  = Zustandswert Risse der gebundenen Tragschicht

## 6.2.2 Bildung des Substanzwertes

Zur Bildung des Substanzwertes wird in Österreich nicht nur der Zustand der Straße berücksichtigt, sondern auch zusätzlich das Alter des Oberbaus. Diese Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass ein Oberbau allein durch den Alterungsprozess Schaden nimmt, auch wenn noch keine Schäden an der Oberfläche sichtbar geworden sind (z.B. durch Bindemittelverhärtung, Mikrorisse, noch nicht an die Oberfläche durchgedrungene Tiefenrisse).

Gemäß diesen Ansätzen werden zunächst zwei Teilindizes gebildet:

- $SI_Z$ : Substanzwert (Substanzindex) aufgrund des Zustands
- $SI_O$ : Substanzwert (Substanzindex) aufgrund des Oberbualters

Über eine Verknüpfungsvorschrift wird aus den beiden Teilindizes der zusammengefasste Substanzwert  $SI$  gebildet. Diese grundsätzliche Vorgehensweise ist für alle Fahrbahndecken identisch, wobei sich die Bildungsvorschriften für die Teilindizes je nach Deckenbauweise unterscheiden.

Bei Asphaltdecken werden dichter und hohlraumreicher Asphalt (Drainasphalt) verschieden bewertet. Bei Betondecken wird bei der Bildung des Substanzwerts „Zustand“ zwischen reinen Betondecken und Betondecken mit bituminösem Überzug unterschieden. In der Tabelle 5 werden die Bildungsvorschriften tabellarisch aufgeführt.

Deckentyp	Substanzwert Zustand $SI_z =$
Asphalt (dicht)	$Max(ZW_{RI}; ZW_{OS}; 1 + 0,000109375 \cdot ZG_{SR}; 1 + 0,03841 \cdot ZG_{LE})$
Asphalt (hohlraumreiche und dünne Deckschichten)	$Max(ZW_{RI}; 1 + 0,000109375 \cdot ZG_{SR}; 1 + 0,03841 \cdot ZG_{LE})$
Betondecken ohne bituminösem Überzug	$Max(ZW_{LE}; ZW_{OS}; ZW_{RI})$
Betondecken mit bituminösem Überzug	$Max(ZW_{LE}; ZW_{RI})$

**Tabelle 5: Bildungsvorschriften für den Substanzwert Zustand nach [52]**

Für den Zustandswert  $ZW_{RI}$  müssen die bauweisenbezogenen Werte gemäß den Gleichungen (6.22), (6.23) und (6.24) verwendet werden.

Die Wahl der einzelnen Zustandsmerkmale zur Bildung des Substanzwertes „Zustand“ resultiert aus Untersuchungen über den Einfluss bestimmter Merkmale auf die Struktur des Oberbaus unter unterschiedlichen Bedingungen. Bei dichten Asphaltdecken wird zunächst davon ausgegangen, dass Risse ( $ZW_{RI}$ ) und Oberflächenschäden ( $ZW_{OS}$ ) den Schädigungsgrad einer Fahrbahndecke anzeigen. Darüber hinaus werden aber auch Spurrinnen ( $ZW_{SR}$ ) und Längsunebenheiten ( $ZW_{LE}$ ) als substanzielles Schädigungsmerkmal herangezogen, sofern sie den Schwellenwert (Note 4,5) überschreiten. Bei hohlraumreichen Asphaltdecken (Drainasphalt) wird angenommen, dass aufgrund der geringen Bedeutung der Deckschicht für die strukturelle Beschaffenheit des gesamten Schichtpakets die Oberflächenschäden ( $ZW_{OS}$ ) bei der Substanzwertermittlung vernachlässigt werden können.

Die Bewertung des Substanzwerts Oberbau beruht auf einer statistischen Betrachtung der existierenden Liegedauern österreichischer Oberbauten im Jahr 2001. Gemäß dem damals angewendeten Verfahren wurden vier Datengruppen gebildet und für jede Datengruppe wurde eine eigene Ermittlungsvorschrift für den Substanzwert Oberbaualter entwickelt:

- $SI_{O,Decke,(Asphalt)}$ : Deckschichten von Asphaltdecken
- $SI_{O,bit.TS,(Asphalt)}$ : Bituminöse Tragschichten
- $SI_{O (Asphalt)}$ : Asphalt gesamt
- $SI_{O (Beton)}$ : Betondecken

Für bituminöse Decken müssen die beiden getrennten Substanzwerte  $SI_{O,Decke}$  und  $SI_{O,bit.TS}$  zusammengeführt werden. In der Tabelle 6 sind die einzelnen Berechnungsvorschriften wiedergegeben.

Schichttyp	Substanzwert Oberbaualter $SI_o$
Asphalt – Deckschicht	$SI_{O,Decke(Asphalt)} = 0,2053 \cdot Alter_{Decke} - 0,1761$
Asphalt – bit. Tragschicht	$SI_{O,bit.TS(Asphalt)} = 0,1575 \cdot Alter_{bit.TS} - 0,1638$
<b>Asphalt gesamt</b>	$SI_{O(Asphalt)} = \frac{SI_{O,Decke(Asphalt)} \cdot D_{Decke} + SI_{O,bit.TS(Asphalt)} \cdot D_{bit.TS}}{D_{Decke} + D_{bit.TS}}$
<b>Beton gesamt</b>	$SI_{O(Beton)} = 0,2072 \cdot Alter_{Beton} - 3,8038$ Mit: $1,0 \leq SI_{O(Beton)} \leq 5,0$

**Tabelle 6: Berechnungsvorschriften für den Substanzwert Oberbaualter  $SI_o$  [52]**

Mit:  $Alter_{Decke}$  = Alter der Deckschicht

$Alter_{bit.TS}$  = Alter der bituminösen Tragschicht

$Alter_{Beton}$  = Alter der Betondecke

$D_{Decke}$  = Dicke der Deckschicht

$D_{bit.TS}$  = Dicke der bituminösen Tragschicht

$SI_{O,Decke}$  = Substanzwert Oberbaualter für Deckschichten auf Asphaltdecken

$SI_{O,bit.TS(Asphalt)}$  = Substanzwert Oberbaualter für bituminöse Tragschichten

$SI_{O(Asphalt)}$  = Substanzwert Oberbaualter für Asphaltdecken

$SI_{O(Beton)}$  = Substanzwert Oberbaualter für Betondecken

Der Substanzwert wird als Maximum von Substanzwert Zustand und gewichtetem Substanzwert Oberbaualter gebildet. Die Gewichtung erfolgt, um zu vermeiden, dass allein das Alter eine strukturelle Maßnahme im PMS bedingt.

$$SI = \text{Max}(SI_z; 0,8 \cdot SI_o) \quad (6.25)$$

Mit:  $SI$  = Zusammengefasster Substanzwert (Substanzindex)

$SI_z$  = Substanzwert Zustand

$SI_o$  = Substanzwert Oberbaualter

Dies erfolgt einheitlich für alle Bauweisen.

### 6.2.3 Bildung des Gebrauchswerts

Bei der Bildung des Gebrauchswerts (Gebrauchsindex GI) werden die Zustandsmerkmale in Hinblick auf ihre Bedeutung für die beiden Teilziele Fahrsicherheit und Fahrkomfort beurteilt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass bereits die Beeinträchtigung durch ein einziges Merkmal ausreicht, um einen schlechten Gebrauchswert zu erhalten. Die Bildung des Gebrauchswertes folgt deshalb einem Maximalprinzip und verwendet eine durchgehende Durchschlagsregel. Die Oberflächenschäden gehen als einziges Merkmal in einem gewichteten Ausmaß ein. Nachfolgend sind die Berechnungsvorschriften für die Bildung des Gesamtwertes nach [52] wiedergegeben.

$$GI = \text{Max}(ZW_{SR}; ZW_{GR}; ZW_{LE}; 1 + 0,0021875 \cdot ZW_{OS}) \quad (6.26)$$

Mit:  $GI$  = Gebrauchswert

$ZW_{SR}$  = Zustandswert Spurrinnen

$ZW_{GR}$  = Zustandswert Griffigkeit

$ZW_{LE}$  = Zustandswert Längsebenheit

$ZW_{OS}$  = Zustandswert Oberflächenschäden

### 6.2.4 Gesamtwertbildung

In Österreich wird den beiden Teilwerten Gebrauchswert und Substanzwert unterschiedliche Bedeutung für das Auslösen von Erhaltungsmaßnahmen beigemessen. Schäden, die zu einer Verschlechterung der Fahrsicherheit und der Nutzbarkeit der Straße führen, wird eine höhere Bedeutung beigemessen als Schäden, die ausschließlich auf eine langfristige Substanzschädigung hindeuten.

Diese unterschiedliche Bedeutung wird dadurch ausgedrückt, dass bei der Gesamtwertbildung der Substanzwert mit einem Abminderungsfaktor einfließt. Die Bildungsvorschrift für den Gesamtwert lautet gemäß [52]:

$$GW = \text{Max}(GI; SI \cdot 0,89) \quad (6.27)$$

Mit:  $GI$  = Gebrauchswert (Gebrauchsindex)

$SI$  = Zusammengefasster Substanzwert (Substanzindex)

Diese Bildungsvorschrift gilt einheitlich für alle Oberbauweisen.

### 6.3 Vergleich der Bewertungsverfahren beider Länder

In den Kapiteln 6.1 und 6.2 wurden die beiden Verfahren zur Zustandsbewertung in Deutschland und in Österreich vorgestellt. Trotz der teilweise sehr unterschiedlichen Vorgehensweisen weisen die beiden Verfahren einige Gemeinsamkeiten auf, so dass ein Vergleich in Ansätzen möglich ist.

Die wesentlichste Gemeinsamkeit besteht darin, dass die aus der Bewertung resultierenden Ergebnisse in beiden Ländern eine gleiche „Notenskala“ mit den Werten 1,0 bis 5,0 aufweisen. Darüber hinaus werden in beiden Fällen Substanzwert, Gebrauchswert und Gesamtwert berechnet. Bei diesen äußerlichen Gemeinsamkeiten ist aber zu beachten, dass die Bildung dieser Werte nach unterschiedlichen Verfahren erfolgt, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Die Zustandsbewertung enthält jeweils spezifische Komponenten.

Im Einzelnen ergeben sich die folgenden Unterschiede:

- Es werden (teilweise) unterschiedliche Merkmale erfasst.
- Die Merkmale werden mit unterschiedlichen Normierungsfunktionen bewertet.
- Die bewerteten Merkmale werden nach unterschiedlichen Verfahren verknüpft.
- Die Bildung des Gesamtwertes aus Substanzwert und Gebrauchswert ist unterschiedlich.

Nachfolgend werden die einzelnen Unterschiede genauer beschrieben.

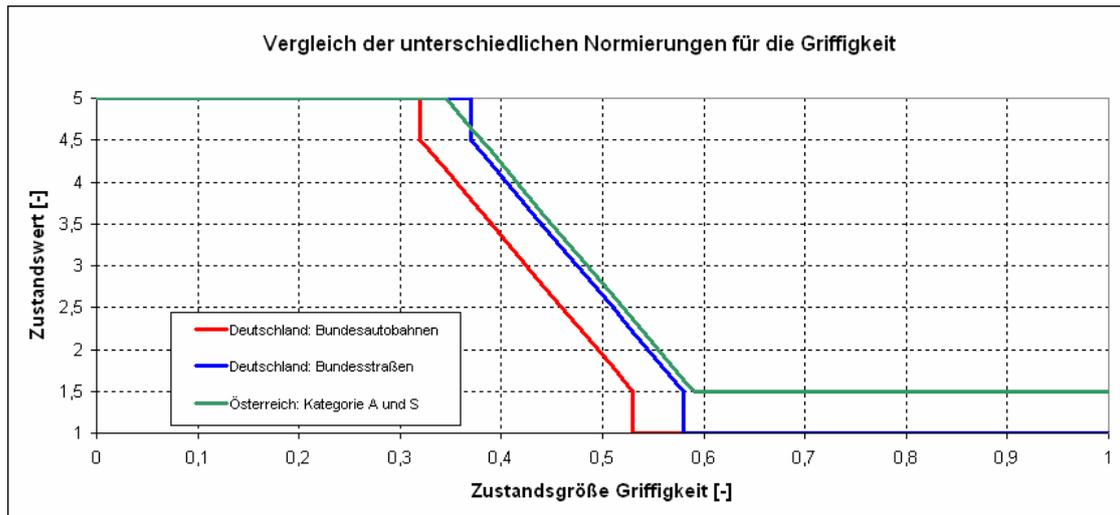
#### 6.3.1 Vergleich der verwendeten Merkmale

Grundsätzlich wird in Österreich und in Deutschland die Bewertung anhand der vier Zustands-Merkmalgruppen Längsebenheit, Querebenheit, Griffigkeit und Oberflächenbild vorgenommen. Es werden aber nur bei der Querebenheit und der Griffigkeit vergleichbare Merkmale ermittelt, während die Betrachtung der Längsebenheit und des Oberflächenbildes auf unterschiedliche Merkmale zurückgreift. Ein zusätzlicher, wesentlicher Unterschied besteht darin, dass in Österreich auch das Alter des Oberbaus in die Bewertung einfließt.

- **Die Längsebenheit** wird in Österreich anhand des IRI bewertet. Dies ist eine aus der Geometrie abgeleitete Wirkgröße, welche anhand von internationalen Standards ermittelt wird und somit eine weltweit vergleichbare Größe darstellt. In Deutschland wird der IRI standardmäßig nicht berechnet. Das derzeitige Bewertungsverfahren verwendet stattdessen die AUN, welche aus einer rein geometrischen Betrachtung der Längsebenheit ermittelt wird. Diese Größe soll zukünftig um den LWI ergänzt werden, welcher als Wirkgröße konzipiert worden ist. Die Merkmale IRI auf der einen sowie AUN und LWI auf der anderen Seite basieren somit auf unterschiedlichen Ansätzen und weisen unterschiedliche Skalen auf. Sie sind daher nicht direkt vergleichbar.
- **Die Querebenheit** wird in Deutschland und in Österreich anhand der Spurrinntiefe unter der 2 m Latte ausgedrückt. Diese Zustandsgröße wird somit in beiden Ländern nach einem weitestgehend identischen Verfahren gebildet und ist direkt vergleichbar. Zusätzlich wird in Deutschland bei der Bewertung die Größe „Fiktive Wassertiefe“ ausgewertet und einbezogen.
- **Die Griffigkeit** wird in beiden Ländern durch unterschiedliche Systeme erfasst. Während in Deutschland Erfassungssysteme mit konstantem Seitenschlupf verwendet werden, werden in Österreich Systeme mit konstantem Bremschlupf eingesetzt. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass die Systeme in Hinblick auf die relative Bewertung weitestgehend vergleichbar sind.
- **Das Oberflächenbild** wird in den beiden Ländern nach sehr unterschiedlichen Verfahren erfasst. Die Unterschiede sind sowohl hinsichtlich der Erfassungstechnik (messtechnische Erfassung / visuelle Erfassung) als auch hinsichtlich der erfassten Merkmale sehr groß. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass in Österreich nicht nur die Ausprägung des Schadens (z.B. die Risslänge), sondern auch die Schadensschwere (z.B. Rissbreite) aufgezeichnet wird. Demgegenüber wird in Deutschland beispielsweise nur das Vorhandensein eines NetZRisses in einem Auswertequadrat festgehalten. Ein direkter Vergleich der Zustandsgrößen ist daher nicht ohne weiteres zulässig.

### 6.3.2 Vergleich der Normierungsfunktionen

Aufgrund der Unterschiede in den Erfassungsverfahren der restlichen Merkmale ist es nur sinnvoll, die Normierung der Zustandsgrößen Griffigkeit und Spurrinntiefe miteinander zu vergleichen. In der Abbildung 36 sind die Normierungsfunktionen für die Griffigkeit in den beiden Ländern (ohne Bundesstraßen-Ortsdurchfahrten in Deutschland) wiedergegeben.

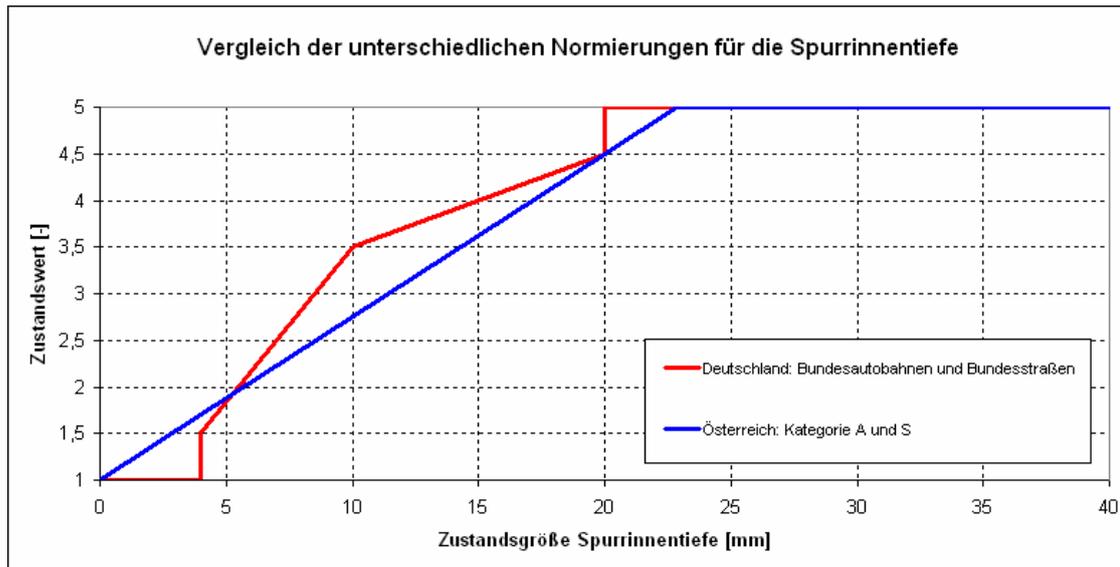


**Abbildung 36: Vergleich der Normierungsfunktionen für die Griffigkeit in Deutschland und in Österreich**

Beim Vergleich sollte beachtet werden, dass die Griffigkeit in Deutschland auf Bundesautobahnen mit einer Soll-Messgeschwindigkeit von 80 km/h und auf Bundesstraßen mit 60 km/h erfasst wird. Da die Soll-Messgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss bei der Bestimmung der Griffigkeitsgröße durch Anwendung der Geschwindigkeitskorrektur hat, führt dies dazu, dass im Grunde auf den beiden Straßenklassen unterschiedliche Zustandsgrößen berechnet werden. In Österreich wird demgegenüber ausschließlich mit einer Soll-Messgeschwindigkeit von 60 km/h gemessen, so dass die österreichischen Normierungskurven mit der Bundesstraßen-Normierungskurve in Deutschland zu vergleichen ist.

Die beiden Normierungsfunktionen sind weitestgehend ähnlich. Sie haben im Hauptbereich eine identische Steigung und führen zu ähnlichen Werten. Im Hauptbereich führt die gleiche Zustandsgröße in Österreich zu einer Note, die um nur 0,14 Notenpunkte schlechter ist als in Deutschland. Die wesentlichsten Unterschiede sind die Unstetigkeiten der deutschen Normierungsfunktion und der Umstand, dass in Österreich die Griffigkeit bestenfalls die Note 1,49, aber nie die Note 1,0 erreichen kann.

Für den Vergleich der Bewertung der Spurrinntiefe wird in der Abbildung 37 eine Gegenüberstellung der Normierungsfunktionen aufgeführt.



**Abbildung 37: Vergleich der Normierungsverfahren für die Spurrinntiefe in Deutschland und in Österreich**

Diese beiden Kurven liegen stärker auseinander. Ursache hierfür ist vor allem die Unstetigkeit der deutschen Normierungsfunktion und der darin enthaltene Steigungswechsel. Obwohl dies nicht für alle Bereiche der Normierungskurve allgemeingültig gilt, kann ausgesagt werden, dass die deutsche Normierungsfunktion die Spurrinnen im Hauptbereich strenger bewertet, d.h. bei der gleichen Zustandsgröße wird eine schlechtere Note berechnet. Dies gilt aber nur für Spurrinnen zwischen 5 mm und ca. 22 mm.

Ein wesentlicher, allgemeingültiger Unterschied zwischen dem deutschen und dem österreichischen Normierungsverfahren besteht darin, dass die deutschen Normierungskurven Sprungstellen und Unstetigkeiten aufweisen, welche die Nachvollziehbarkeit der Bewertung erschweren. Diese Eigenschaften sind historisch bedingt und es wird derzeit im Rahmen eines Forschungsprojektes [45] untersucht, wie dieser Aspekt verbessert werden kann. Es ist anzumerken, dass bei der derzeit geplanten Überarbeitung des Bewertungsverfahrens in [45] für die Bewertung der Spurrinntiefe eine Kurve vorgeschlagen wird, welche identisch mit der aktuellen österreichischen Kurve aus Abbildung 37 ist.

Weiterhin ist zu beachten, dass für alle ermittelten Zustandsgrößen in Österreich eine Bewertungsfunktion vorliegt und alle Merkmale auch in der späteren Verknüpfung einbezogen werden. In Deutschland werden dagegen eine Reihe von Merkmalen (z.B. Bindemittelanreicherungen oder Ausbrüche) erfasst und Zustandsgrößen ermittelt, die jedoch weder bewertet noch in der Verknüpfung berücksichtigt. Es wird daher von „bewertungsrelevanten“ und „nicht bewertungsrelevanten“ Zustandsmerkmalen gesprochen.

### 6.3.3 Vergleich der Verknüpfungsvorschriften

Bei den Verknüpfungsverfahren in Deutschland und Österreich werden in beiden Fällen ein Substanzwert für die Bewertung der Straße aus Sicht des Erhalters und ein Gebrauchswert für die Bewertung der Straße aus Sicht des Nutzers in einem Wertebereich zwischen 1,0 und 5,0 berechnet. Obwohl die Ergebnisse anhand der äußeren Form vergleichbar erscheinen, handelt es sich aber um sehr verschiedene Größen, die nicht gleichgesetzt oder miteinander verrechnet werden dürfen. Die Unterschiede ergeben sich nicht nur aufgrund der verschiedenen einbezogenen Zustandsmerkmale (siehe Kapitel 6.3.1) und Normierungskurven (siehe Kapitel 6.3.2) sondern auch durch die Unterschiede in den Verknüpfungsverfahren. Hierbei sind die folgenden Punkte von Bedeutung:

- In Österreich werden Substanzwert und Gebrauchswert anhand eines Maximalprinzips errechnet, wobei einzelne Merkmale zum Teil mit einer Gewichtung eingehen. In Deutschland werden diese beiden Teilwerte dagegen durch eine gewichtete Summe der Einzelwerte gebildet. In bestimmten Fällen (die derzeit sehr häufig vorkommen) greift eine Durchschlagsregel, die dazu führt, dass das Maximalprinzip angewendet wird. Diese Durchschlagsregel soll aber zukünftig gemäß [45] entfallen
- Die Bildung des Substanz- und Gebrauchswertes erfolgt in Deutschland für Asphalt- und Betondecken unterschiedlich. In Österreich wird dagegen zwischen vier Bauweisen (dichter Asphalt, hohlraumreicher Asphalt, Betondecken ohne bituminösem Überzug und Betondecken mit bituminösem Überzug) unterschieden.
- In Österreich wird zwischen dem Substanzwert aufgrund des Zustands und dem Substanzwert aufgrund des Oberbaualters unterschieden. Letzterer hat in Deutschland keine Entsprechung. Es wird zwar auch in Deutschland im Rahmen der PMS-Berechnung ein oberbaualtersabhängiger „Substanzwert Bestand“ gebildet, dieser ist aber nicht Bestandteil der Standard-ZEB-Berechnungen. Der „endgültige“ Substanzwert in Österreich ist eine Verbindung der beiden zugrunde liegenden Substanzwerte und beinhaltet somit stets eine altersabhängige Komponente.

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass trotz der Ähnlichkeiten im Ansatz und im Ergebnis der Gebrauchswert und vor allem der Substanzwert in Deutschland und in Österreich nicht direkt vergleichbar sind.

### 6.3.4 Vergleich der Gesamtwertbildung

Da der Gesamtwert aus den beiden Teilwerten Gebrauchswert und Substanzwert gebildet wird und da diese Teilwerte wie soeben beschrieben in Deutschland und in Österreich anhand unterschiedlicher Berechnungsverfahren ermittelt werden, ist auch der

Gesamtwert der beiden Länder nicht direkt vergleichbar. Zudem geht bei der Gesamtwertbildung der Substanzwert in Österreich nur mit einem Gewicht von 89 %, in Deutschland zu 100 % ein.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass aufgrund der Unterschiede ein direkter numerischer Vergleich der beiden Gesamtwerte in Deutschland und in Österreich keinen Rückschluss auf den realen Schädigungsgrad der Straße zulässt. Da aber in beiden Fällen das Resultat der Bewertung dem abgestimmten Wertehintergrund der jeweiligen Expertenkreise entspricht, kann durch einen Vergleich ausgesagt werden, inwiefern der jeweilige, landesspezifisch individuelle Qualitätsanspruch durch eine bestimmte Strecke erfüllt wird. Die Anspruchserfüllung wäre somit vergleichbar, nicht aber die tatsächliche Beschädigung.

## 7. Nutzung der Zustandsdaten

In den bisherigen Kapiteln wurden die verschiedenen, aufeinander aufbauenden Prozesse vorgestellt, mit deren Hilfe in der Praxis netzweit Zustandsdaten der Straße gewonnen werden. Es werden hierbei durch schnellfahrende Messfahrzeuge Daten der Straßenoberfläche aufgenommen und anhand von weitestgehend standardisierten Auswerteprozessen aufbereitet. Die nach dieser Prozesskette zur Verfügung stehenden „Zustandsgrößen“ und „Zustandswerte“, welche verschiedene zustandsrelevante Streckeneigenschaften quantifizieren, bilden eine wesentliche Grundlage für die Entscheidungsträger der Erhaltungsplanung.

Die Nutzung dieser Daten kann auf verschiedene Arten erfolgen. Beispielsweise können die ermittelten Zustandswerte in digitalen Tabellen abgelegt und dem Entscheidungsträger zur Verfügung gestellt werden. In der Regel werden die Daten aber in einem weiteren Arbeitsprozess weiterverarbeitet, wobei sich in der Vergangenheit zwei wesentliche Nutzungsmöglichkeiten für die Zustandsdaten etabliert haben.

- Erhaltungsprogrammbildung durch Pavement Management Systeme (PMS)
- Visualisierung (Darstellung) des Zustands

Beide Verfahren haben das Ziel, die unterschiedlichen Entscheidungsebenen des Erhaltungsmanagements (siehe Kapitel 2.3) durch Informationsbereitstellung zu unterstützen. In der Praxis werden beide Formen der Nutzung der Zustandsdaten in Kombination angewendet. Während die Visualisierung das Ziel hat, die verfügbaren Daten möglichst aussagefähig und übersichtlich verfügbar zu machen, hat das PMS die Aufgabe, zusätzliche Informationen (z.B. Prognosedaten) und Empfehlungen (insbesondere Maßnahmevorschläge) zu generieren.

Die Anwendung und Hintergründe von Pavement Management Systemen sind sowohl in Deutschland und Österreich als auch international ausführlich dokumentiert und diskutiert worden. Aus diesem Grund wird in Kapitel 7.1 nur auf die wesentlichen Grundlagen der PMS-Anwendung eingegangen.

Demgegenüber sind die Verfahren der Zustandsvisualisierung bisher noch weitestgehend unsystematisiert und in keinem bekannten Dokument zusammenfassend beschrieben worden. Eine Vorstellung der im deutschsprachigen Raum bereits seit Jahren genutzten Visualisierungsstandards auf einer internationalen Konferenz [53] hat gezeigt, dass die fortschrittlichen Formen der Zustandsdarstellung bisher auch in Expertenkreisen nur wenig bekannt sind, jedoch als zukunftsweisend gewertet werden [54]. Im Kapitel 7.2 soll daher eine systematische Zusammenstellung der etablierten Zustandsvisualisierungsverfahren in Deutschland und Österreich erarbeitet werden.

## 7.1 Zustandsdaten in Pavement Management Systemen

Pavement Management Systeme (PMS) sind moderne Softwaresysteme zur systematischen, rationalen Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Diese Systeme bieten die Möglichkeit, aufgrund von Straßenzustandsdaten, Straßenbestandsdaten und Verkehrsdaten, unter gegebenen finanziellen und technischen Randbedingungen, automatisch Grundlagen für Erhaltungsprogramme für einen Planungszeitraum von mehreren Jahren zu erzeugen. Das Hauptanwendungsgebiet von PMS ist die Erstellung eines Erhaltungsprogramms zur Erzielung eines größtmöglichen Nutzens bei vorgegebenen Budget-Randbedingungen. Diese Form der Anwendung macht diese Systeme zu einem Werkzeug, welches vorwiegend auf der Netzebene (siehe Kapitel 2.3.2) eingesetzt wird, da das Hauptaufgabengebiet des PMS die Erstellung von Erhaltungsprogrammen ist.

Es sollte hervorgehoben werden, dass Pavement-Management-Systeme der heutigen Zeit hoch entwickelte Softwaresysteme sind und als Werkzeuge der Erhaltungsplanung eine Sonderstellung einnehmen. Für die anderen Aufgaben des Erhaltungsmanagements, insbesondere auf anderen Entscheidungsebenen (Politikebene und Projektebene), stehen keine derart weit entwickelten, fachlichen Lösungskonzepte oder gar Softwaresysteme zur Verfügung.

Pavement Management Systeme wurden in Deutschland im Jahr 1997 auf Grundlage der Forschungen von Maerschalk [55] und in Österreich im Jahr 1999 auf Basis der Arbeiten am ISTU [5] eingeführt und seit dem regelmäßig zur Unterstützung der Erhaltungsprogrammbildung eingesetzt.

Die Anwendung von PMS basiert auf detailliert untersuchten, regional angepassten, fachlichen Zusammenhängen zwischen Straßenzustand, Zustandsentwicklung, Verkehrsbelastung, Oberbaukonstruktion und Maßnahmewirkungen. Diese Zusammenhänge werden nach dem aktuellen Stand der Technik durch deterministische Verhaltensmodelle dargestellt. Durch diese Modelle werden insbesondere Zustandsprognosen ermöglicht, die eine Abschätzung der zukünftigen Zustandsentwicklung unter Berücksichtigung von alterungsbedingten Verschlechterungen und von maßnahmebedingten Verbesserungen erlauben. Bei der Anwendung von PMS werden somit intern dynamische Zustandsentwicklungen prognostiziert und datentechnisch festgehalten.

Diese Zustandsentwicklungen werden für mehrere Erhaltungsstrategien<sup>7</sup> probeweise berechnet und einander gegenübergestellt. Der Nutzen einer Strategie bestimmt sich anhand der Gegenüberstellung von deren Zustandsentwicklung zur Zustandsentwicklung ohne Maßnahme (so genannte „Do-Nothing-Variante“ oder „Nullvariante“) auf dem betrachteten PMS-Abschnitt. Darüber hinaus werden Kosten der Strategien ermittelt

---

<sup>7</sup> Im Rahmen des PMS wird die Festlegung von Maßnahmeart(en) und Ausführungsjahr(en) auf einem PMS-Abschnitt als „Erhaltungsstrategie“ bezeichnet.

und mithilfe von heuristischen Optimierungsverfahren in Hinblick auf die Erhaltungsziel-funktionen optimiert.

Wichtige Kernbestandteile des PMS sind Modelle zur zeit- und belastungsabhängigen Zustandsprognose, zur Abschätzung der Auswirkungen von Erhaltungsmaßnahmen und zur Berechnung eines Nutzens für unterschiedliche Erhaltungsstrategien. Diese Modelle werden in der Regel international an die jeweiligen Bedürfnisse des Anwenders angepasst und unterscheiden sich somit auch zwischen den beiden Ländern Deutschland und Österreich. Auf die Besonderheiten und Unterschiede der Zustandsprognosemodelle beider Länder wird in Kapitel 8 vertieft eingegangen. Bezüglich der anderen Modelle finden sich in den entsprechenden Referenzwerken [55] und [5], ergänzt um [56] die detaillierten Hintergründe.

Das Ergebnis der Zustandsanalyse mittels PMS ist ein Vorschlag für ein Erhaltungsprogramm, d.h. die Festlegung welche Maßnahmen auf welchen Abschnitten in welchen Jahren durchgeführt werden sollen. Dieses Erhaltungsprogramm wird in der Regel in Form einer Maßnahmenliste ausgegeben, welche gegebenenfalls um eine visuelle Darstellung der Maßnahmevorschläge auf einem Streckenband oder einer Karte ergänzt wird.

Obwohl die Anwendung von Pavement Management Systemen in der Regel durch die Vertreter der Netzebene erfolgt, sind die Ergebnisse aus diesen Systemen nach entsprechender Aufbereitung auch für die Fragestellungen der höher liegenden Entscheidungsebenen eine wertvolle Informationsgrundlage. In der Tabelle 7 sind die Fragestellungen aus dem Kapitel 2.3 zusammengestellt und die Anwendbarkeit des PMS zur Beantwortung dieser Aufgaben aufgeführt.

Fragestellungen der Politikebene	Behandlung durch das PMS
Wie ist die absolute Angebotsqualität des Gesamtnetzes bzw. einzelner Teilnetze?	Nein
Wie verteilt sich die Angebotsqualität auf einzelne Teilnetze?	Nein
Welche Mittel werden mindestens benötigt, um eine bestimmte Qualität im Gesamtnetz bzw. in den einzelnen Teilnetzen zu erreichen?	Ja <sup>8</sup>
Wie hat sich die Angebotsqualität über die Zeit verändert?	Nein
Wie wird sich die Qualität des Netzes aufgrund eines bestimmten Erhaltungsprogramms entwickeln?	Ja
Welche maximale Qualität kann mit vorgegebenen Mitteln erreicht werden?	Ja

Fragestellungen der Netzebene	Behandlung durch das PMS
Wie ist das Netz in Bauabschnitte einzuteilen?	Ja <sup>9</sup>
Wie verhält sich der Zustand eines Bauabschnitts mit und ohne Maßnahme?	Ja
Welche Abschnitte haben aufgrund ihres Zustands einen dringenden Handlungsbedarf?	Ja
Durch welches Erhaltungsprogramm ist bei gegebenen Mitteln die Qualität des Netzes zu maximieren?	Ja

Fragestellungen der Projektebene	Behandlung durch das PMS
Welche Ursachen sind für das vorhandene Schadensbild verantwortlich?	Nein
An welcher Stelle sind die jeweiligen Straßenschäden exakt lokalisiert?	Nein
Welche exakte Lage und welche Gewerke sollen für die Baulose festgelegt werden?	Nein

**Tabelle 7: Anwendbarkeit des PMS für verschiedene Fragestellungen**

Die obige Zusammenstellung zeigt, dass das PMS als Kernelement des Erhaltungsmanagements einen unverzichtbaren Beitrag zur Lösung bestimmter Fragestellungen leistet, alleine aber nicht alle benötigten Antworten liefern kann. Es ist daher notwendig, neben dem PMS auch andere Werkzeuge zur Unterstützung der Erhaltungsplanung zu verwenden.

Es ist zu erwähnen, dass viele der PMS-Ergebnisse zwar digital gespeichert werden, diese Informationen aber derzeit nicht entsprechend den Bedürfnissen der jeweiligen Entscheidungsebenen aufbereitet werden. So liegen beispielsweise die prognostizier-

<sup>8</sup> Die Berechnung von Qualitätsszenarien wird in der Bundesrepublik Deutschland derzeit durch ein Forschungsprojekt [56] untersucht. In der Republik Österreich wird diese Aufgabenstellung durch die PMS-Software bereits behandelt.

<sup>9</sup> Die Bildung Homogener Abschnitte ist streng genommen keine Aufgabe des PMS sondern Gegenstand der PMS-gerechten Datenaufbereitung. Die Abschnittsaufteilung ist aber dennoch ein genutztes Ergebnis der PMS-Auswertungen.

ten Zustandsentwicklungen derzeit tabellarisch zu jedem PMS-Abschnitt vor, diese werden aber aufgrund der Datenmenge nicht direkt durch die Politikebene genutzt.

In Deutschland und Österreich werden die Ergebnisse des PMS durch angeschlossene, weitestgehend standardisierte Auswerteverfahren nachträglich aufbereitet, um für die Erhaltungsplanung genutzt werden zu können. Für diese nachgeordneten Arbeiten, welche auch die Datenvorbereitung für den PMS-Rechenlauf beinhalten, existiert in Deutschland ein eigenes Aufgabenfeld mit der Bezeichnung PMS I/O (PMS Input/Output). In Österreich werden die Ergebnisse der PMS-Analysen regelmäßig für die Nutzung im Rahmen der alljährlichen Bauprogrammsbesprechungen visuell aufbereitet und als Streckenbänder dargestellt.

## 7.2 Visualisierung des Zustands

In Österreich wurden bisher drei messtechnische Zustandserfassungen auf den Bundesstraßen durchgeführt. Die erste Erfassung fand in den Jahren 1991 bis 1996 statt, die zweite im Jahr 1999 und die dritte wurde im Jahr 2002 (B-Netz) sowie 2004 (A- und S-Netz) durchgeführt. Zwischen den Erfassungen wurden sowohl hinsichtlich der Erfassungstechnik als auch hinsichtlich der Bewertungsverfahren Verbesserungen und Modifikationen in einem bestimmten Umfang vorgenommen, so dass noch nicht von einem Routine-Auswerteverfahren ausgegangen werden kann. Dies gilt insbesondere für die Unterschiede zwischen der Erst- und Zweiterfassung.

In Deutschland wurden dagegen die ersten beiden Erfassungen bereits 1995 abgeschlossen. Nach einer Pause im Jahr 1996 finden seit 1997 regelmäßig so genannte Zustandserfassungs- und Bewertungskampagnen (ZEB-Kampagnen<sup>10</sup>) statt. In der Abbildung 38 sind die bisher durchgeführten Erfassungen entlang einer Zeitachse, differenziert nach Straßenklassen aufgeführt. Die Jahresmessung 2005 auf Bundesautobahnen ist abgeschlossen, die Jahresmessung 2006 auf Bundesautobahnen wird aktuell durchgeführt.

---

<sup>10</sup> Gemäß den Definitionen der ausschreibenden und durchführenden Stellen in Deutschland beinhaltet eine ZEB-Kampagne die Durchführung der Zustandserfassung und -bewertung eines kompletten Bundesfernstraßennetzes (Bundesautobahnen plus Bundesstraßen), d.h. in der Regel 4 Erfassungsjahre. Innerhalb eines Jahres findet dagegen i.d.R. die Erfassung der Hälfte des Bundesstraßennetzes oder des Bundesautobahnnetzes statt, was offiziell als ZEB-Jahresmessung bezeichnet wird. Dennoch werden diese offiziellen Bezeichnungen in einigen Quellen nicht eingehalten, sondern es wird der Begriff ZEB-Kampagne auch für eine Jahresmessung verwendet (z.B. „ZEB-Kampagne auf BAB 2001“).



**Abbildung 38: Regelmäßige Durchführung der ZEB-Erfassungen auf deutschen Bundesfernstraßen**

Aufgrund der Regelmäßigkeit der Zustandserfassung und der sich anschließenden Bewertung kann mittlerweile von einem Auswertestandard gesprochen werden.

Die ZEB-Auswerteverfahren beschränken sich in der Regel darauf, allein die IST-Daten der netzweiten Zustandserfassungen zu analysieren und visuell darzustellen. Im Vorfeld der ZEB-Erfassung werden einige wenige ergänzende Daten (Streckenverlauf, Fahrstreifenanzahl, Fahrbahnanzahl, usw.) zusammengestellt, die zum einen die Planung und Ausführung der Erfassung unterstützen sollen, zum anderen nach der Erfassung mit den Zustandsdaten verknüpft und zur Auswertung genutzt werden. Aufgrund der Notwendigkeit, die ZEB-Auswertungen möglichst zeitnah nach Abschluss der Erfassung durchzuführen und die Ergebnisse den Entscheidungsträgern der unterschiedlichen Ebenen zur Verfügung zu stellen, wird auf eine Verknüpfung mit sonstigen Datenbeständen verzichtet. Dies wird im Rahmen von Sonderauswertungen, z.B. durch sich anschließende PMS-Berechnungen nachgeholt.

Da die Ergebnisse der Erfassung möglichst unmittelbar durch Personen der einzelnen Entscheidungsebenen genutzt werden sollen, wird ein besonderer Schwerpunkt auf die visuelle Aufbereitung gelegt. Im Gegensatz zu den Bedürfnissen einer elektronischen Datennutzung, welche nach Möglichkeiten besonders standardisierte, einheitliche Auswerteverfahren vorzieht, ist die visuelle Aufbereitung darauf ausgerichtet, möglichst vielfältige Fragestellungen beantworten zu können, so dass häufig individuell gestaltete Ergebnisse anzutreffen sind. Nachfolgend sollen die häufigsten ZEB-Auswerteverfahren systematisiert zusammengestellt und erläutert werden. Grundsätzlich werden die nachfolgenden Auswerteverfahren unterschieden:

- Säulendiagramme
- Summenlinien
- Zustandskarten
- Streckenbänder

In der Abbildung 39 ist eine systematisierte Übersicht der derzeit etablierten Visualisierungsverfahren abgebildet.

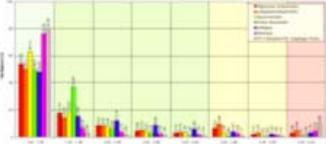
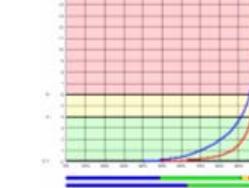
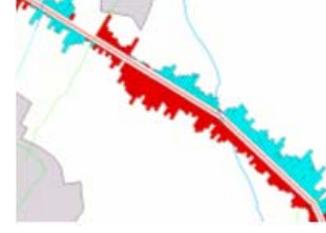
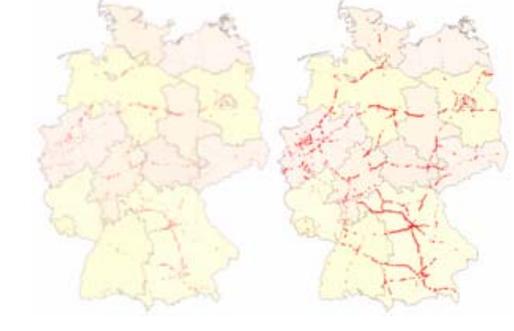
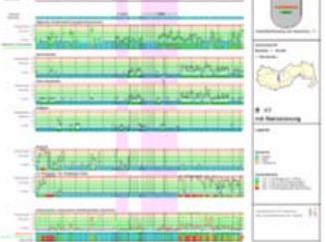
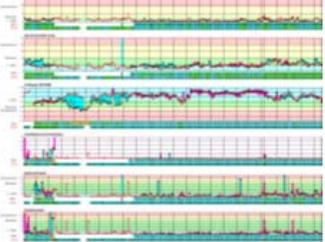
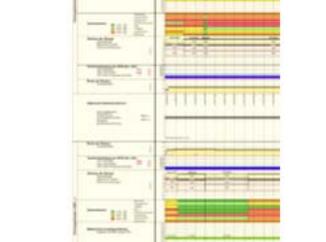
Säulendiagramme	 <p>***</p> <p>Häufigkeitsverteilungen</p>	 <p>**</p> <p>Mittelwertvergleich</p>	 <p>**</p> <p>Geohistogramme</p>
Summenlinien	 <p>***</p>	 <p>***</p>	 <p>**</p>
Zustandskarten	 <p>***</p> <p>Konstante Breite</p>	 <p>**</p> <p>Variable Breite</p>	 <p>*</p> <p>Dynamische Vergleiche</p>
Zustandskarten	 <p>**</p> <p>Geostatistische Auswertungen</p>		 <p>**</p> <p>Quantilenkarten</p>
Streckenbänder	 <p>***</p>	 <p>***</p>	 <p>*</p>
<p>*** Standardbestandteil der regelmäßigen ZEB-Kampagnen in Deutschland                  ** Häufig angewendete Visualisierungsverfahren                  * Gelegentlich angewendete Visualisierungsverfahren</p>			

Abbildung 39: Etablierte Visualisierungsverfahren [57]

## 7.2.1 Säulendiagramme

Säulendiagramme werden zur Darstellung von **Häufigkeitsverteilungen** und für **Mittelwertvergleiche** verwendet. Während Häufigkeitsverteilungen generell auf die Analyse eines Teilnetzes beschränkt sind, werden bei Mittelwertvergleichen unterschiedliche Teilnetze einander gegenübergestellt.

Darüber hinaus existieren Mischformen, welche den teilnetzübergreifenden Vergleich von Häufigkeitsverteilungen erlauben. Eine besondere, etablierte Form stellen die **Geohistogramme** dar, mit deren Hilfe die Häufigkeitsverteilungen einzelner geographisch getrennter Teilnetze vergleichbar gemacht werden.

### 7.2.1.1 Häufigkeitsverteilungen

Die regelmäßige ZEB-Auswertung umfasst in erster Linie eine vereinfachte, statistische Auswertung, bei der die Häufigkeiten aller bewertungsrelevanten Zustandswerte in Säulendiagramme aufgetragen werden. Obwohl mathematisch nicht ganz korrekt, wird für diese Diagramme gelegentlich der Begriff „Histogramm“<sup>11</sup> verwendet. In der Abbildung 40 ist ein Beispiel wiedergegeben.

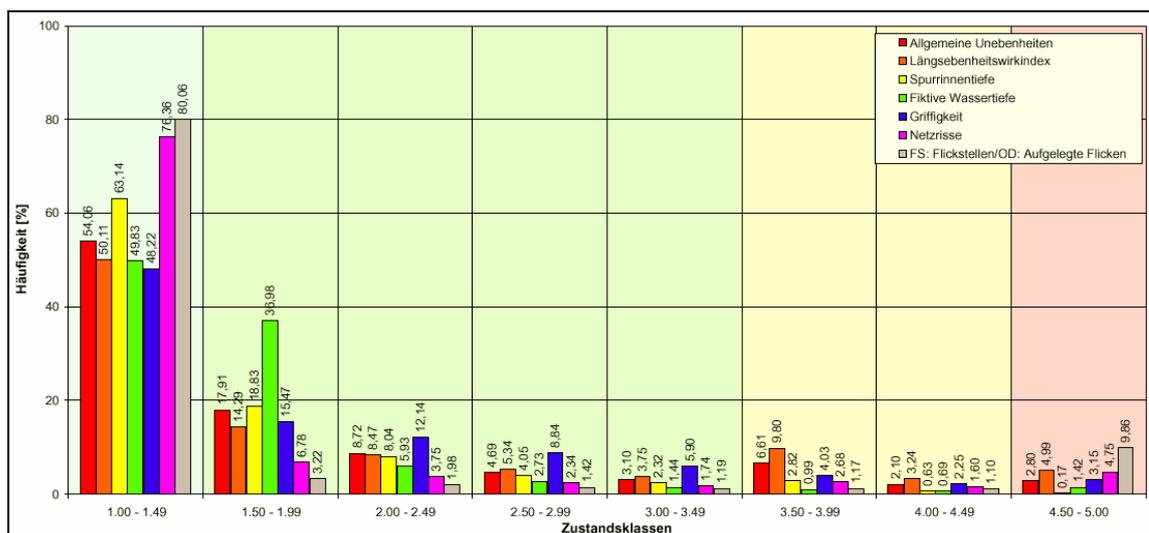


Abbildung 40: Beispiel eines ZEB-Säulendiagramms (8-Klassen-Diagramm) [57]

In den ZEB-Standardauswertungen werden auf einem Säulendiagramm entweder wie im obigen Beispiel alle bewertungsrelevanten Merkmale oder aber nur die Teilwerte und der Gesamtwert abgebildet. Die Säulenhöhe entspricht der längengewichteten Häufigkeit der Auswerteabschnitte mit entsprechender Bewertung in bestimmten Zustandsklassen. So kann aus dem obigen Beispiel abgelesen werden, dass in dem abgebildeten Teilnetz 48,22 % aller Auswerteabschnitte, auf denen eine gültige Griffigkeit

<sup>11</sup> Ein Histogramm ist ein Säulendiagramm mit einer flächenproportionalen Darstellung der Häufigkeitsverteilung einer kontinuierlichen Variablen, die auf der X-Achse aufgetragen wird. Die Säulen müssen zudem aneinander angrenzen. Diese Voraussetzungen sind bei den ZEB-Säulendiagrammen nicht gegeben.

gemessen wurde, eine Griffigkeits-Note zwischen 1,00 und 1,49 aufweisen. Aufgrund der Unstetigkeit in der Normierungsfunktion (siehe Kapitel 6), die unterhalb von der Note 1,5 nur die Note 1,0 zulässt, kann weiter geschlossen werden, dass diese 48,22 % genau die Griffigkeits-Note 1,0 haben.

Häufigkeitsverteilungen werden immer auf bestimmte Teilnetze bezogen. In Deutschland werden Teilnetze standardmäßig aufgrund der folgenden Kriterien eingeteilt:

- **Räumliche Abgrenzung:** Säulendiagramme mit Häufigkeitsverteilungen werden in der Regel nicht für das gesamte Bundesgebiet aufgestellt, sondern aufgrund administrativer Grenzen differenziert. Es werden hierbei sowohl **einzelne Straßenbauämter** als auch **ganze Bundesländer** voneinander getrennt ausgewertet.
- **Zeitliche Abgrenzung:** Die untersuchten Teilnetze umfassen in der Regel ausschließlich die Ergebnisse einer einzelnen Jahresmessung und sind somit **auf ein bestimmtes Erfassungsjahr begrenzt**. Manche Auswertungen umfassen zwei aufeinander folgende Jahresmessungen und beinhalten somit das komplette Bundesautobahnnetz bzw. das komplette Bundesstraßennetz.
- **Straßenklasse:** Häufigkeitsverteilungen sind Standardauswertungen zum Abschluss der ZEB-Jahresmessung und sind zwangsläufig auf jeweils eine Straßenklasse (**Bundesautobahnen oder Bundesstraßen**) beschränkt.
- **Fahrstreifen:** Aufgrund des Rechtsfahrgebots ist der rechte Fahrstreifen (FS 1) stärker durch den Schwerlastverkehr belastet und weist somit eine unterschiedliche Schädigung bzw. bei größeren Querschnitten auch eine unterschiedliche Erhaltungshistorie auf. Aus diesem Grund werden die folgenden Gruppen gebildet: **erster (rechter) Fahrstreifen / zweiter Fahrstreifen / alle Fahrstreifen**. Diese Unterscheidung wird nur für Bundesautobahnen durchgeführt, da nur hier mehr als der erste Fahrstreifen erfasst wird.
- **Deckenbauweise:** Die beiden Deckenbauweisen Asphalt und Beton unterscheiden sich zum einen aufgrund der auswertbaren Substanzmerkmale, zum anderen aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der sonstigen Merkmale. Einzelne Teilnetze werden entweder für **alle Asphaltstrecken, alle Betonstrecken oder auch für beide Bauweisen** gebildet.
- **Ortsdurchfahrt:** Aufgrund der sehr unterschiedlichen Randbedingungen und den daraus resultierenden Unterschieden im Bewertungsverfahren ist eine **Trennung von Ortsdurchfahrten und Freien Strecken** sinnvoll. Darüber hinaus werden auch Teilnetze **unabhängig von den Ortsdurchfahrten** gebildet. Diese Unterscheidung wird nur Bundesstraßen bzw. auf Landesstraßen durchgeführt. Auf Bundesautobahnen existieren ausschließlich Freie Strecken.

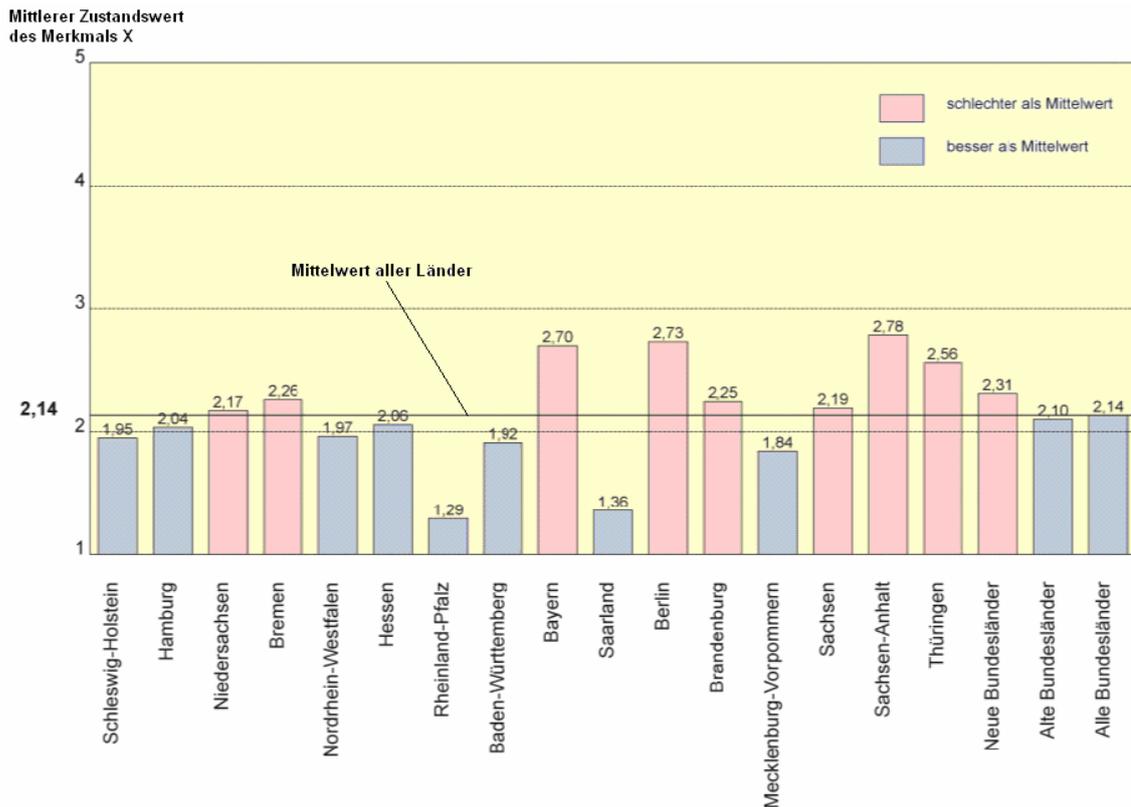
Grundsätzlich wird unterschieden zwischen 4-Klassen-Säulendiagramme und 8-Klassen-Säulendiagramme, wobei dies die Klassenzahl auf der X-Achse wiedergibt. Bei 8-Klassen-Diagrammen wird der Notenbereich 1 bis 5 in gleich große Gruppen mit einer Breite von 0,5 Notenpunkten eingeteilt. Bei 4-Klassen-Diagrammen werden dagegen, aufgrund der Normierungs-Knickpunkte „1,5-Wert“, „Warnwert“ und „Schwellenwert“, ungleich große Gruppen gebildet. Es ergeben sich somit die folgenden, farblich unterlegten vier Klassen:

- Blau: 1,00 – 1,49
- Grün: 1,50 – 3,49
- Gelb: 3,50 – 4,49
- Rot: 4,50 – 5,00

Diese Farbeinteilung wird auch bei den 8-Klassen-Säulendiagrammen verwendet (siehe Abbildung 40), wobei die Farben den Hintergrund des Diagramms einfärben. Weitere Darstellungsverfahren nutzen häufig die gleiche Farbeinteilung.

#### 7.2.1.2 Mittelwertvergleich

Neben der Darstellung von Häufigkeitsverteilungen existieren für bundesstatistische Analysen auch bundesländerübergreifende Mittelwertvergleiche. Hier werden aufgrund der oben aufgeführten teilnetzbeschränkenden Randbedingungen Mittelwerte für zuvor festgelegte Merkmale (z.B. Spurrinntiefe) ermittelt und in einem gemeinsamen Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 41).



**Abbildung 41: Bundesländerübergreifender Mittelwertvergleich eines ausgewählten Merkmals auf Zustandswertbasis mit fiktiven Musterdaten [57]**

Die einzelnen Mittelwerte gelten somit nicht für die gesamten Bundesländer, sondern für die jeweils nach gleichen Kriterien eingeschränkten Teilnetze der Bundesländer. So können beispielsweise die Griffigkeiten aller ersten Fahrstreifen in Asphaltbauweise einer bestimmten ZEB-Jahresmessung auf Bundesautobahnen miteinander verglichen werden. Zusätzlich zu der politischen Einteilung nach Bundesländern können auch Ländergruppen einbezogen werden, was insbesondere in früheren Kampagnen zur Unterscheidung der neuen und alten Bundesländer durchgeführt worden ist (siehe Abbildung 41).

Als Zusatzinformation kann ein Vergleichswert, wie z.B. der Bundesdurchschnitt eingeblendet werden und diejenigen Teilnetze, die unter bzw. über dem Vergleichswert liegen können farblich unterschieden werden.

Bei der Erstellung von Mittelwertvergleichen muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen den Mittelwerten von Zustandsgrößen und von Zustandswerten. Zustandsgrößen repräsentieren die tatsächliche Messgröße und quantifizieren den physikalischen Schaden. Mittelwerte von Zustandsgrößen sind demnach die mittlere Schadensschwere im jeweiligen Teilnetz, was ein vergleichbares Kriterium ist.

Bei Zustandswerten wird demgegenüber die Zulässigkeit einer Mittelwertbildung, vor allem aufgrund der Unstetigkeiten in den Normierungsfunktionen (siehe Kapitel 6) und

des eingeschränkten Wertebereichs (Note 1 bis 5), derzeit hinterfragt. Auf diesen Punkt wird im Kapitel 8.1.2 vertieft eingegangen.

### 7.2.1.3 Geohistogramme

Grundsätzlich ist es möglich, die Häufigkeitsverteilungen einzelner Teilnetze einander gegenüberzustellen, um einen besseren Vergleich der Zustandsverteilungen erhalten zu können und nicht nur einzelne Kenngrößen zu vergleichen. Eine besondere Form sind hierbei die so genannten „Geohistogramme“, auf denen die Säulendiagramme innerhalb von geographischen Karten eingetragen sind und die Teilnetze aufgrund politischer Grenzen, z.B. Landesgrenzen oder Straßenbauamtsgrenzen voneinander trennen.

Aufgrund der Bekanntheit solcher Darstellungen lässt sich diese Darstellungsform besonders gut zur Öffentlichkeitsarbeit verwenden. In den veröffentlichten Straßenbauberichten des Bundesministeriums aus den Jahren 2000 [58] und 2001 [1] wurden Geohistogramme für den Gebrauchswert abgebildet, wobei aufgrund der Adressierung der Auswertung an Nichtexperten eine vereinfachte Klasseneinteilung und eine alternative Klassenbezeichnung verwendet worden ist.

Die verwendeten Klassen entsprechen der folgenden Einteilung:

- Gebrauchswert bis 3,49: „volle Gebrauchsfähigkeit“
- Gebrauchswert zwischen 3,5 und 4,49: „leicht eingeschränkte Gebrauchsfähigkeit“
- Gebrauchswert ab 4,5: „eingeschränkte Gebrauchsfähigkeit“

In der Abbildung 42 ist exemplarisch das im Straßenbaubericht 2000 [58] veröffentlichte Geohistogramm wiedergegeben.

**Gebrauchswert auf  
 Bundesautobahnen**

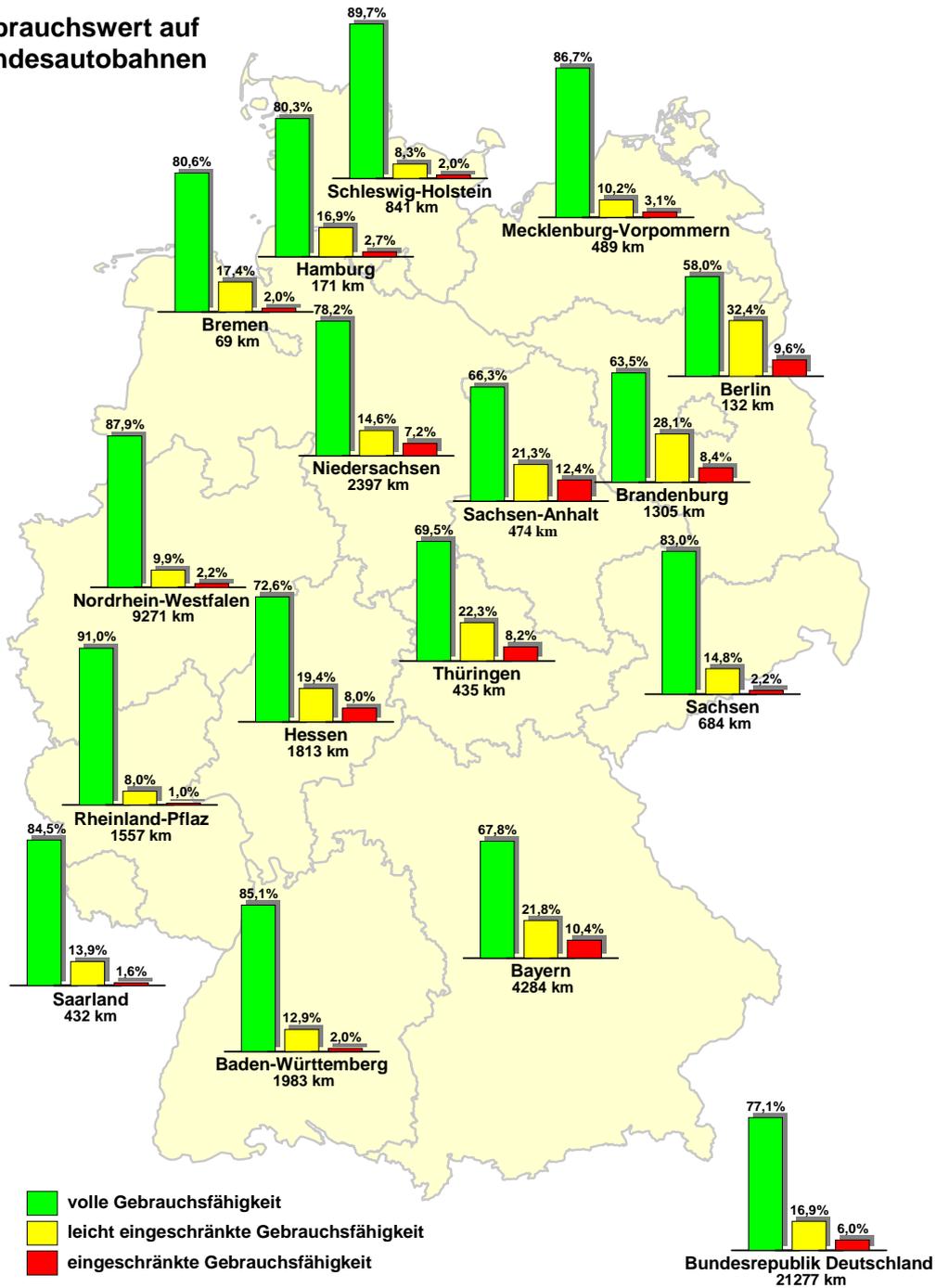


Abbildung 42: Beispiel eines Geohistogramms [58]

Es wurde der erste Fahrstreifen anhand der ZEB-Daten der Jahresmessungen 1997/1998 auf Bundesautobahnen ausgewertet.

## 7.2.2 Summenlinien

Während die standardmäßig ausgewerteten Häufigkeitsverteilungs-Säulendiagramme nur die Häufigkeiten bestimmter Klassen angeben, können durch Summenlinien die Werteverteilungen im gesamten Wertebereich aufgezeigt werden. Summenlinien werden für bestimmte Teilnetze erstellt, die aufgrund der gleichen Kriterien gebildet werden, wie sie bereits bei den Häufigkeitsverteilungs-Säulendiagrammen (siehe Kapitel 7.2.1.1) beschrieben worden sind.

Das Prinzip der Summenlinien besteht darin, zu jeder Häufigkeit [%] anzugeben, welche Zustandsgröße mit genau dieser Häufigkeit überschritten wird. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Verteilungsfunktionen aus der mathematischen Literatur werden in Deutschland auf der X-Achse die Häufigkeiten und auf der Y-Achse die überschrittenen Werte aufgetragen.

In der Abbildung 43 ist exemplarisch eine Summenlinie der Zustandsgröße Griffigkeit dargestellt.

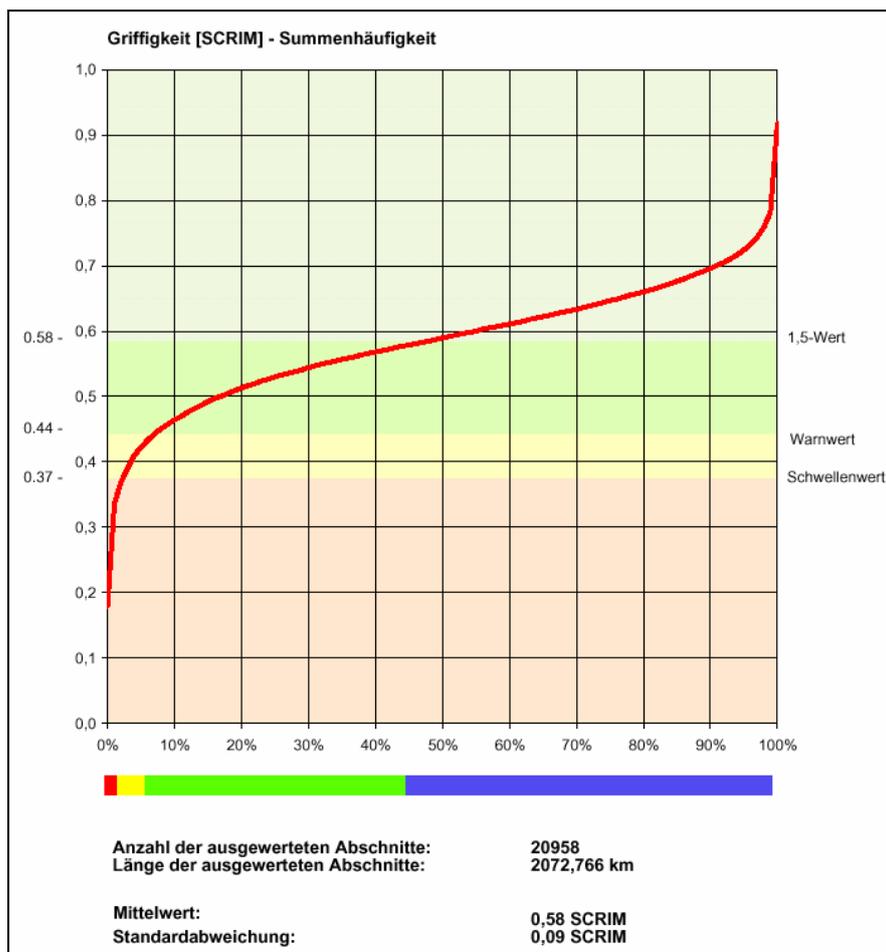
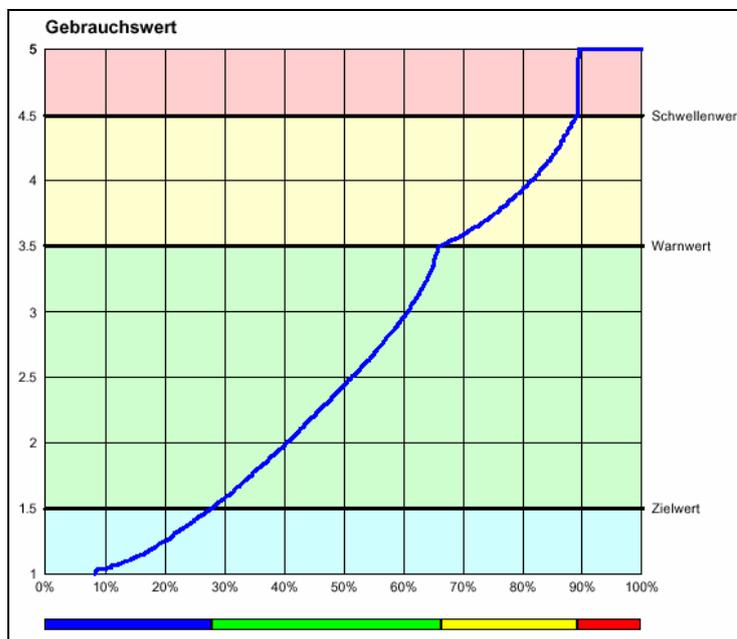


Abbildung 43: Beispiel einer Griffigkeits-Summenlinie [57]

Zusätzlich zur graphischen Darstellung werden auf Summenlinien in der Regel noch Kenngrößen zum ausgewerteten Datenumfang sowie der Mittelwert und die Standard-

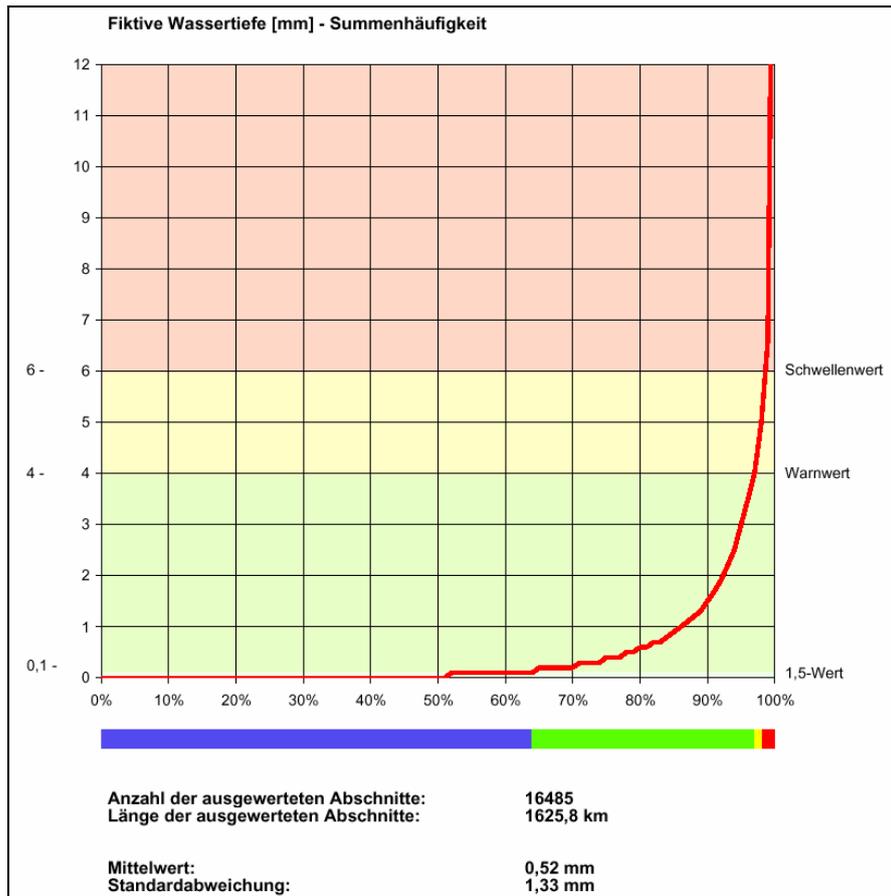
abweichung eingetragen. Als ergänzende Informationen werden 1,5-Wert, Warnwert und Schwellenwert auf der Werteskala gesondert gekennzeichnet und die entsprechenden Bereiche farblich eingefärbt. Im unteren Bereich werden anhand von vier Balken die Überschreitungshäufigkeiten bezüglich dieser drei Werte eingetragen. Die Balkenbreiten entsprechen in Relation den Säulenhöhen im 4-Klassen-Häufigkeits-Säulendiagramm.

Summenlinien werden grundsätzlich nur für Zustandsgrößen gebildet, da aufgrund der angesprochenen Besonderheiten der Normierungsfunktionen Summenlinien zu Zustandswerten, zu Teilwerten und Gesamtwerten nur bedingt aussagekräftig sind. In der Abbildung 44 ist experimentell eine Summenlinie für den Gebrauchswert eines ausgewählten, anonymisierten Teilnetzes wiedergegeben, aus der die Wirkung der Unstetigkeiten und Durchschlagsregeln deutlich abzulesen sind.



**Abbildung 44: Exemplarische Summenlinie für den Teilwert Gebrauchswert (experimentell) [57]**

Die Griffigkeit ist das einzige Merkmal der ZEB, dessen Summenlinie eine S-Form annimmt und dadurch der (achsenvertauschten) Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung ähnelt. Die Kurve ist somit auch i.d.R. um den Median (50 %-Wert) annähernd punktsymmetrisch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die gemessene Griffigkeit um einen bestimmten Mittelwert mit ungefährender Normalverteilung schwankt. Andere Merkmale haben dagegen eine schiefe Häufigkeitsverteilung. In der Abbildung 45 ist eine typische Summenlinie für das Merkmal „Fiktive Wassertiefe“ wiedergegeben.



**Abbildung 45: Beispiel einer Summenlinie für die Fiktive Wassertiefe [57]**

Anhand dieser Summenlinie kann beispielsweise erkannt werden, dass mehr als 50 % aller Strecken eine Fiktive Wassertiefe von 0 mm aufweisen, was mit dem Zustandsgrößen-Berechnungsalgorithmus zusammenhängt. Zur Berechnung der Fiktiven Wassertiefe wird das unveränderte Querprofil genommen, bei dem aufgrund der Querneigung Wasser aus den Unebenheiten abfließen kann. Nur wenn die Unebenheiten groß genug sind, kann Wasser im Profil gehalten werden, was i.d.R. in der Hälfte der Fälle nicht vorkommt. Weiterhin ist an der Summenlinie zu sehen, dass niedrige Fiktive Wassertiefen sehr häufig sind und der Anstieg treppenartig verläuft, was wiederum mit den Rundungskonventionen zusammenhängt. Aufgrund der nach oben offenen Skala können auch extrem hohe Wassertiefen vorkommen, die durch den eingeschränkten Wertebereich der Darstellung auf der Summenlinie nicht abgelesen werden können.

Einfache Summenlinien erlauben die genaue Betrachtung einer Häufigkeitsverteilung eines einzigen Merkmals. Da die Form einer Summenlinie ein aussagefähiges Charakteristikum einer Zustandsverteilung auf Netzebene ist, ist die direkte Gegenüberstellung von Summenlinien geeignet, Zustandsdaten auf Netzebene zu vergleichen.

### 7.2.3 Zustandskarten

Eine sehr gebräuchliche Form der Zustandsvisualisierung ist die geographische Darstellung aller Auswerteabschnitte auf einer Karte. Die Auswerteabschnitte werden dabei aufgrund ihres Zustands eingefärbt, wobei die bereits bei den Säulendiagrammen im Kapitel 7.2.1.1 beschriebene Einteilung in vier Klassen angewendet wird (siehe Abbildung 46).

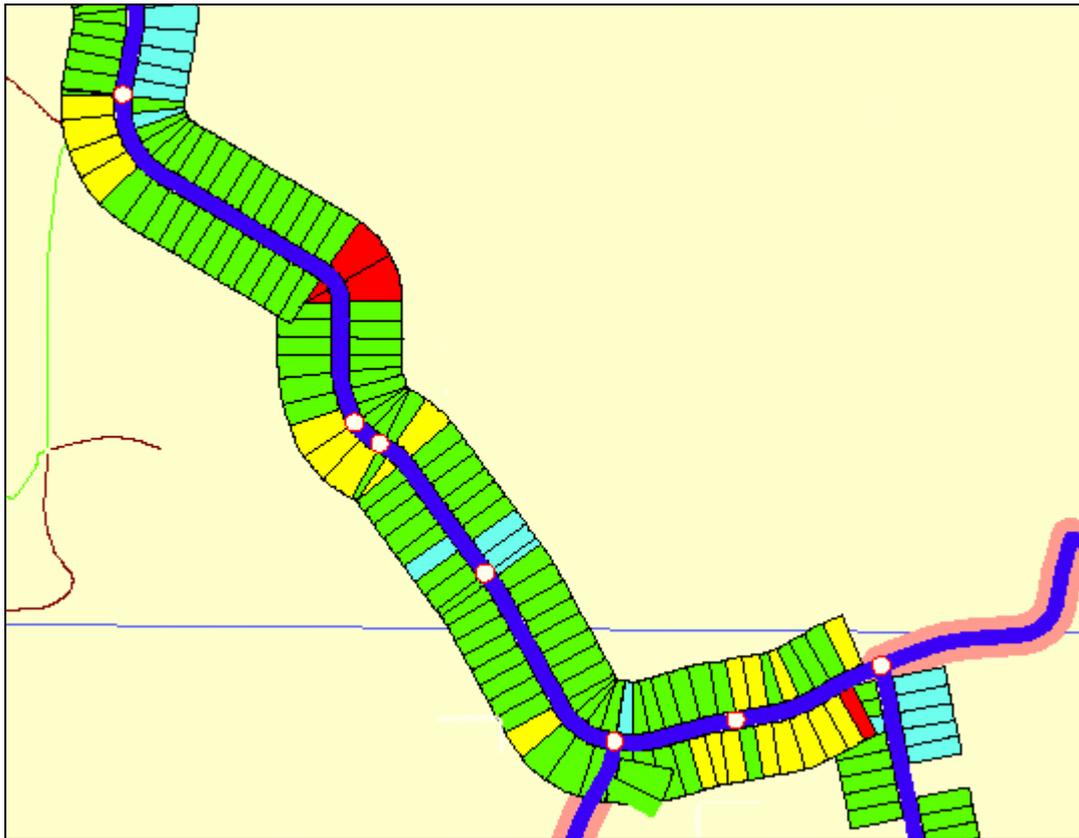
	1,00 - 1,49 (besser als 1,5-Wert)
	1,50 - 3,49 (1,5-Wert überschritten)
	3,50 - 4,49 (Warnwert überschritten)
	4,50 - 5,00 (Schwellenwert überschritten)

**Abbildung 46: Einfärbung der Auswerteabschnitte auf Zustandskarten**

Jede Karte ist dabei auf die Darstellung eines einzelnen Zustandsmerkmals für ein Teilnetz beschränkt. Die Einschränkung des Teilnetzes erfolgt in der Regel allein aufgrund des Erfassungszeitraums und geographischer Grenzen. Weitere Einschränkungen werden in der Regel nicht getroffen. Die Aussagefähigkeit von Zustandskarten wird nicht dadurch eingeschränkt, dass gleichzeitig Ortsdurchfahrten und Freie Strecken, Asphalt und Beton sowie mehrere Fahrstreifen dargestellt werden, da diese Bereiche auf der Karte optisch differenziert werden können.

#### 7.2.3.1 Zustandskarten mit Auswerteabschnitten konstanter Breite

In Deutschland werden verschiedene Formen von Zustandskarten verwendet, die sich durch die Darstellung der Auswerteabschnitte voneinander unterscheiden. Zumeist werden die Auswerteabschnitte als Flächen mit konstanter Breite entlang der Straßenachse gezeichnet. Die Länge der Auswerteabschnitte ist maßstabsgetreu, d.h. in Deutschland in der Regel 100 m auf der Freien Strecke und 20 m in Ortsdurchfahrten. Diese Darstellungsform ist auch für die Abbildung der Ergebnisse visueller Zustandserfassungen oder des Zustands von homogenen Abschnitten sehr gut geeignet. In der Abbildung 47 ist ein Beispielfragment dargestellt.



**Abbildung 47: Beispielfragment einer Zustandskarte [57]**

In der Darstellung wurde versucht, das Straßennetz entsprechend seinem tatsächlichen, geographischen Verlauf abzubilden. Eine solche Darstellung wird als „gekrümmter Streckenverlauf“ bezeichnet, da auch die großräumigen Krümmungen der Straße sichtbar sind. Dies führt dazu, dass die dargestellten Flächen der einzelnen Auswertungsabschnitte unterschiedlich groß sein können, obwohl diese in der Realität eine identische Fläche aufweisen. Auswertungsabschnitte in Außenbereichen großräumiger Kurven werden überproportional, Auswertungsabschnitte im Innenbereich großräumiger Kurven werden unterproportional dargestellt. Aufgrund dessen entspricht die eingefärbte Fläche auf einer solchen Zustandskarte nicht der tatsächlichen Häufigkeitsbelegung einer Zustandsklasse, d.h. die obige Darstellung kann zu einer verzerrten Wahrnehmung der Zustandsverteilung führen. Da sich die Flächenunterschiede in den Klassen statistisch ausgleichen sollten, wird aber bei der standardmäßigen Erstellung von Zustandskarten dennoch am häufigsten diese Darstellungsform gewählt.

Wird eine flächentreue Darstellung gewünscht, besteht die Möglichkeit, auf die Krümmung der Strecken zu verzichten, die Verbindungen zwischen zwei Netzknoten als gerade Linien zu abstrahieren und die Auswertungsabschnitte entlang dieser geradlinigen Verbindungen einzuzeichnen.





**Abbildung 49: Beispielfragment einer Zustandskarte mit Zustandsgrößendarstellung eines ausgewählten Merkmals [57]**

Diese Darstellungsform enthält zwar mehr Informationen als die Darstellung mit einheitlicher Breite, allerdings ist aus Gründen der Lesbarkeit nur die Abbildung des Zustands eines Fahrstreifens sinnvoll. Zudem hat sich herausgestellt, dass die skalierte Breite nur auf geradlinigen Netzverbindungen gut dargestellt werden kann, während auf gekrümmten Abschnitten die Lesbarkeit nicht mehr gewährleistet ist.

Darüber hinaus führt diese Darstellungsform dazu, dass hohe Zustandswerte, d.h. schlechte Zustände, als überproportional große Flächen dargestellt sind und somit der optische Gesamteindruck systematisch verzerrt wird. Dies hat zur Folge, dass solche Karten sehr gut dazu geeignet sind, Erhaltungsschwerpunkte zu identifizieren, weniger aber dafür, eine repräsentative Übersicht über den Gesamtzustand des abgebildeten Teilnetzes zu geben.

### 7.2.3.3 Geostatistische Darstellungen

Die bisher vorgestellten Darstellungsformen für Zustandskarten ermöglichen eine streckenbezogene Visualisierung der Zustände einzelner Auswerteabschnitte, d.h. eine Betrachtung des Zustandes auf Projektebene. Um einen generellen Überblick über den Zustand kompletter Teilnetze zu erhalten, sind objektscharfe Zustandsdarstellungen aufgrund der oben genannten verzerrten Flächenabbildungen und der dadurch beeinflussten, verzerrten Wahrnehmung nur eingeschränkt einsetzbar.

Für eine kartographische Visualisierung der Zustände kompletter Teilnetze sind dagegen geostatistische Darstellungen besonders geeignet. Solche Auswertungen nutzen die Möglichkeiten von Geographischen Informationssystemen (GIS) zur Erstellung so

genannter „thematischer Karten“. Hierbei werden bestimmte Flächen aufgrund der mit diesen Flächen verknüpften Daten thematisch eingefärbt. Beispielsweise können die Flächen anhand der politischen oder administrativen Grenzen definiert und aufgrund der Zustandsdaten unterschiedlich eingefärbt werden.

Für einige Auswertezwecke ist es von Bedeutung, von den politischen und administrativen Grenzen zu abstrahieren, d.h. die geographische Zustandsverteilung unabhängig von solchen Grenzen zu betrachten. Dies kann beispielsweise dann von Interesse sein, wenn der Einfluss von Klimazonen, Baumaterial<sup>12</sup>, Geländehöhe und ähnlichen geographischen Kriterien untersucht werden soll.

Für diese Zwecke bietet es sich an, Teilflächen anhand eines regelmäßigen Rasters zu definieren und entsprechend den in die Rasterelemente fallenden Auswerteabschnitten auszuwerten. In der Abbildung 50 ist exemplarisch eine Rasterkarte für den Zustand von Bundesautobahnen anhand von fiktiven Musterdaten wiedergegeben.

---

<sup>12</sup> In der Regel wird beim Straßenbau aus Wirtschaftlichkeitsgründen angestrebt, das Baumaterial aus nahe gelegenen Brüchen oder Gruben zu gewinnen. Die Qualität des eingebauten Materials ist somit zum Teil vom regionalen Angebot abhängig.

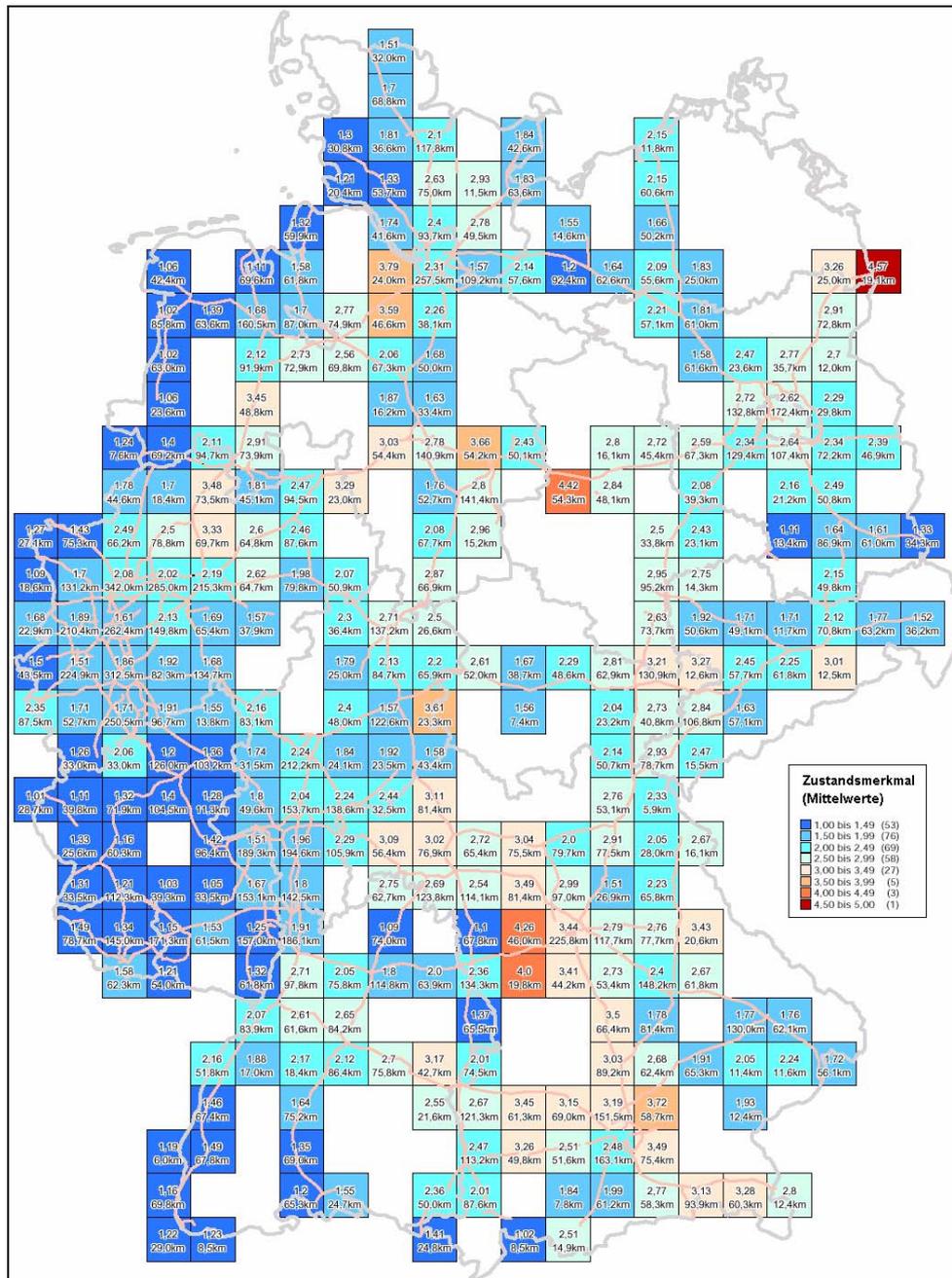


Abbildung 50: Rasterkarte für ein ausgewähltes Zustandsmerkmal (fiktive Musterdaten) [57]

Rasterkarten haben in der Darstellung zwei wesentliche Nachteile. Zum einen werden bei grobmaschigen Netzen, wie z.B. dem Bundesautobahnnetz in Deutschland, nicht alle Rasterelemente gefüllt, da nicht innerhalb jedes Elements Straßen vorhanden sind. Dies könnte dadurch kompensiert werden, dass die Rasterelemente vergrößert werden, dies hätte jedoch eine Vergrößerung des Informationsinhalts zur Folge.

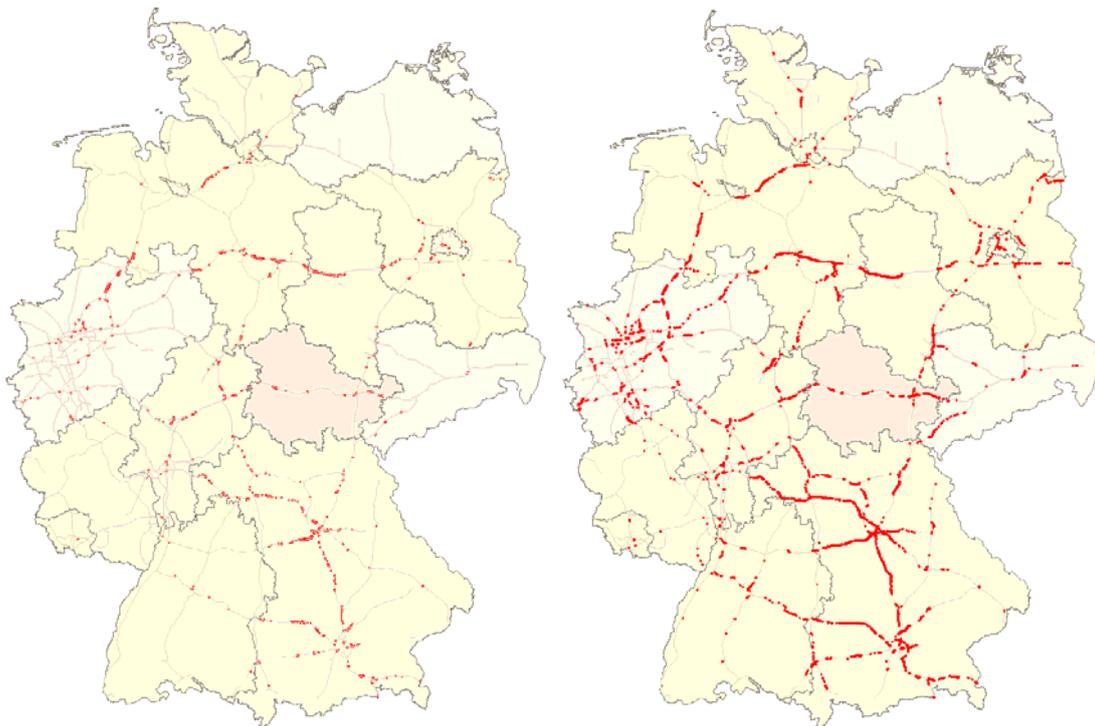
Der zweite Nachteil ist, dass die Rasterelemente durch die einheitliche Größe in keiner Relation zu der dargestellten Datenmenge stehen und somit die Wahrnehmung der Schadensrelevanz verzerrt wird. Dem kann zwar, wie in der oberen Abbildung, durch

Angabe der jeweils pro Rasterlement ausgewerteten Streckenlänge begegnet werden, der visuelle Eindruck bleibt dennoch verzerrt.

#### 7.2.3.4 Quantilenkarten

Durch die Quantilenanalyse können Aussagen über Teilmengen einer Gesamtmenge im Vergleich untereinander und im Vergleich zur Gesamtmenge gewonnen werden. Das  $p$ -Quantil einer Verteilung gibt an, welcher Wert die unteren  $p$  Prozent der Datenwerte von den oberen  $(100 - p)$  Prozent trennt. Wenn beispielsweise das 5 %-Quantil einer Verteilung angegeben wird, so besagt dies, dass 5 % aller Daten kleiner oder gleich dem betreffenden Datenwert sind und 95 % Prozent größer oder gleich diesem Wert. In der Literatur werden als Synonym für Quantil auch der Begriff „Fraktile“ und „Perzentil“ verwendet. Ein besonderes Quantil ist das 50 %-Quantil, welches genauso oft über- wie unterschritten wird und auch als Median bezeichnet wird.

Während der Begriff „Quantil“ den über- bzw. unterschrittenen *Wert* bezeichnet, können durch Quantilenkarten die *Menge* der Auswerteabschnitte, die den entsprechenden Wert über- oder unterschreiten dargestellt werden. Dadurch werden die schlechtesten  $p$  % aller Strecken bzw. die besten  $p$  % aller Strecken visualisiert. In der Abbildung 51 ist ein Beispiel zweier Quantilenkarten wiedergegeben.



**Abbildung 51: Quantilenkarten der bundesweit schlechtesten 3 % (links) und 5 % (rechts) Strecken für ein ausgewähltes Merkmal (fiktive Musterdaten) [57]**

Das Beispiel zeigt die Schwierigkeiten bei der Wahl eines aussagekräftigen Quantils. Je nachdem, welches Quantil gewählt wird, werden unterschiedliche Untermengen hervorgehoben. Die Entscheidung für das 3 %-Quantil, für das 5 %-Quantil oder für ein

beliebiges anderes erscheint somit willkürlich. Je näher das gewählte Quantil dem Median ist, desto weniger sind die sehr guten bzw. sehr schlechten Bereiche voneinander zu trennen. Quantile in der Nähe des 0 %-Quantils bzw. des 100 %-Quantils haben dagegen den Nachteil, nur zu einer sehr geringen Datenmenge Aussagen liefern zu können.

Quantilenkarten erlauben die visuelle Lokalisierung von Erhaltungsschwerpunkten. Darüber hinaus können anhand solcher Analysen weitergehende Kenngrößen abgeleitet werden.

#### 7.2.3.5 Nutzung von Zustandskarten

Aufgrund der geographischen Aufbereitung der Zustandsdaten sind Zustandskarten sehr gut auch von Personen zu verstehen, die nicht direkt in die Zustandserfassung und -bewertung eingebunden sind. Dadurch sind sie vor allem für die Kommunikation zwischen den Fachleuten und den Entscheidungsträgern der politischen Ebene sowie für die Öffentlichkeitsarbeit sehr gut geeignet. Hierfür werden insbesondere Zustandskarten für Teilwerte und Gesamtwerte eingesetzt, da diese Merkmale sehr allgemeinverständlich sind.

Obwohl Zustandskarten Zustände auf Objektebene abbilden, werden Sie in der Regel dazu verwendet, Aussagen über Teilnetze abzuleiten, d.h. sie dienen der Gesamtbeurteilung eines bestimmten Gebietes. Darüber hinaus können Sie dazu genutzt werden, besondere Stellen zu identifizieren oder nähere Informationen zu diesen Stellen abzulesen.

In die Darstellung können zusätzliche Informationen, wie z.B. Gewässer, Städte, administrative Grenzen, Waldflächen usw. eingebunden werden, um eine Orientierung auf der Karte zu erleichtern. Durch eine geeignete, digitale Codierung und Georeferenzierung der Zustandsdaten wird zudem ermöglicht, Geographische Informationssystemen (GIS) einzusetzen, um eine Verknüpfung mit ergänzenden, ebenfalls geographisch referenzierten Informationen, z.B. Klimadaten, frostgefährdete Zonen, Naturschutz- oder Wasserschutzgebiete, durchzuführen. Aus diesen Verknüpfungen lassen sich durch weitergehende Analysen zusätzliche Informationen gewinnen.

#### 7.2.4 Streckenbänder

Zur Erstellung von Streckenbändern werden, ähnlich wie zur Darstellung der Auswertungen mittels PMS, nicht nur ausschließlich Zustandsdaten benötigt, sondern auch zusätzliche Bestandsdaten der Straße. Da Streckenbänder sich als eines der Hauptinstrumente zur Darstellung und Nutzung von Zustandsdaten etabliert haben, sollen sie an dieser Stelle entsprechend ausführlich behandelt werden.

Auf Streckenbändern werden Straßen oder Teilstrecken von Straßen als gerade Strecken abstrahiert und in Längsrichtung aufgetragen. So wie die aus dem Straßenent-

wurf bekannten Längsschnitte das Höhenlängsprofil der Straße aufzeigen, so werden auf Streckenbändern vor allem Zustandsdaten und sonstige erhaltungsrelevante Bestandsdaten aufgetragen.

Streckenbänder können sehr verschiedene Informationen zur Straße abbilden und es existieren je nach Verwendungszweck unterschiedliche Gestaltungsformen für Streckenbänder. Allen gemeinsam ist die Aufteilung des Streckenbandes in einen linken, mittleren und rechten Bereich. In der Abbildung 52 ist die grundsätzliche Aufteilung exemplarisch an einem Bauwerks-Streckenband wiedergegeben. Bauwerks-Streckenbänder werden eingesetzt, um vorwiegend Bauwerksbestands- und Bauwerkszustandsdaten zur Erhaltungsplanung gemeinsam mit dem Straßenzustand abzubilden.

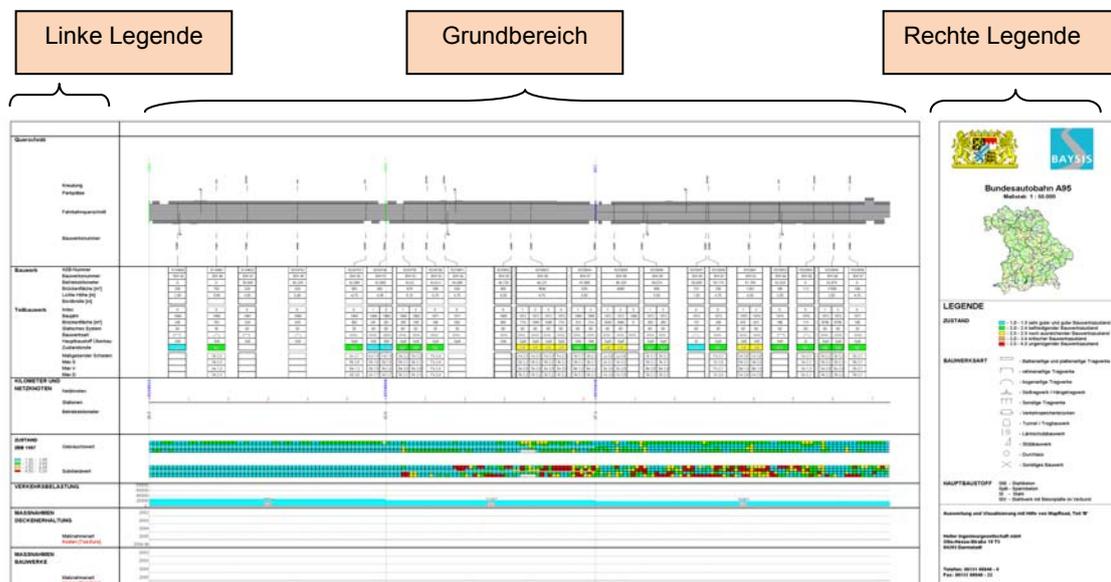
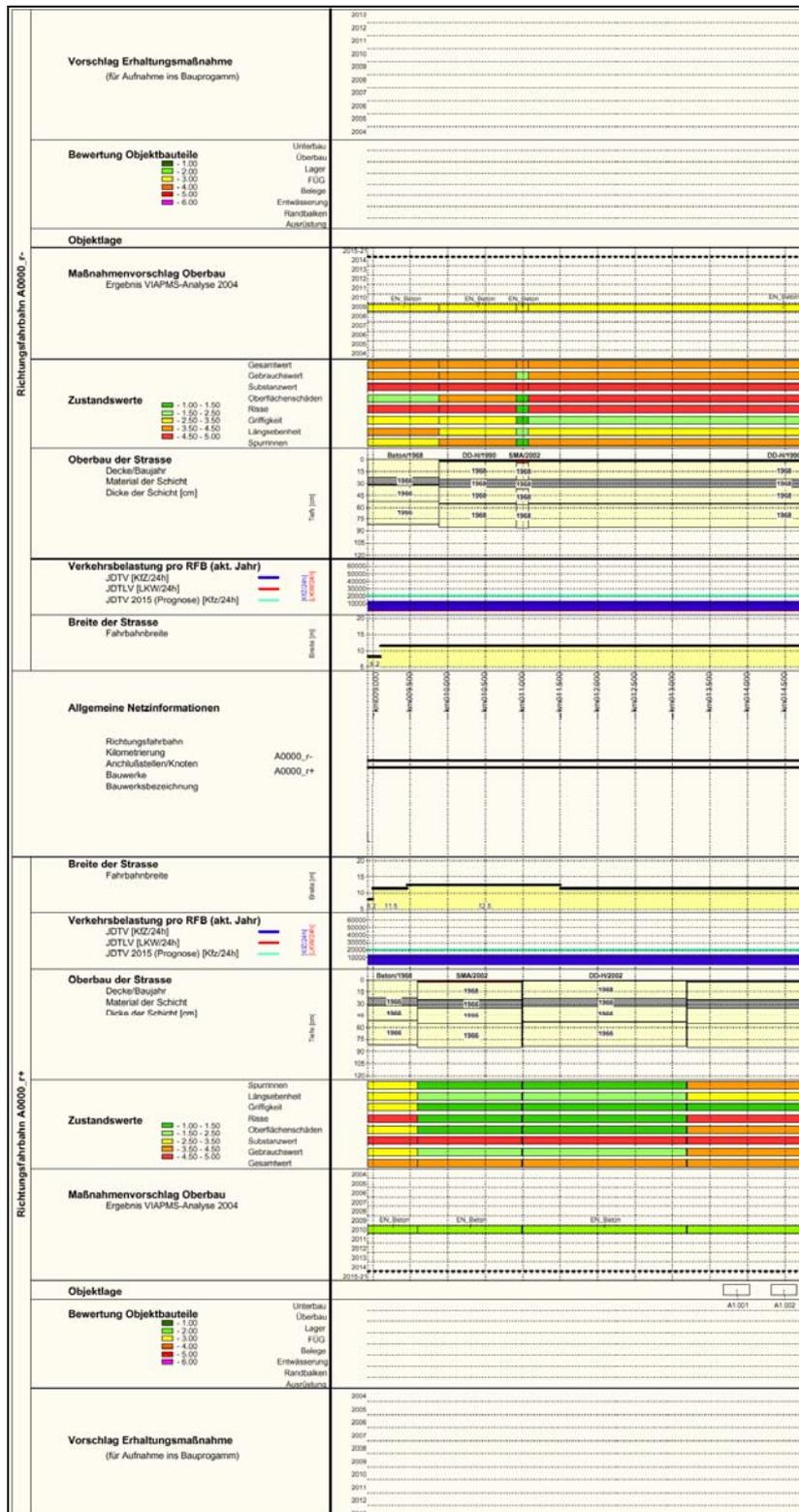


Abbildung 52: Grundelemente des Streckenbands [59]

Der Grundbereich dient zur Darstellung der Dateninhalte, während die Legenden dazu dienen, Hinweise zur Interpretationshilfe bereitzustellen. Im Grundbereich werden untereinander verschiedene Datengruppen abgebildet. In der linken Legende werden die Datengruppen beschrieben, wobei die Beschreibung stets auf Höhe der jeweiligen Datengruppe aufgeführt wird. In der rechten Legende werden i.d.R. allgemeingültige Informationen eingetragen, z.B. Name der dargestellten Straße oder ein Kartenausschnitt mit einer Lokalisierung der Straße. In einigen Fällen wird der Platz der rechten Legende auch für größere Klassifizierungen verwendet. Streckenbänder werden in der Regel so entworfen, dass die Höhe genau den Abmessungen einer DIN-A4-Seite entspricht, während die Breite von der Länge der abgebildeten Straße und dem gewählten Darstellungsmaßstab abhängt.

In Österreich werden Streckenbänder seit mehreren Jahren regelmäßig zur Unterstützung der alljährlichen Bauprogrammsbesprechungen verwendet. Das verwendete Streckenbanddesign wurde dahingehend optimiert, alle für die Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen relevanten Sachverhalte übersichtlich zusammenzustellen und gleichzeitig Freiraum für manuelle Einträge vorzusehen. In der Abbildung 53 ist exemplarisch ein Fragment eines solchen Streckenbands wiedergegeben.



**Abbildung 53: Beispielausschnitt eines Streckenbands (linker Bereich) [57]**

In der Mitte des Streckenbandes ist die Fahrbahnachse einschließlich aller Anschlussstellen und der laufenden Kilometrierung abgebildet. Nach oben bzw. nach unten werden Daten zu den beiden Richtungsfahrbahnen aufgetragen. Von innen nach außen werden die Bestandsdaten in der folgenden Reihenfolge abgelegt:

- Breite der Fahrbahn
- Verkehrsbelastung
- Oberbau der Straße
- Zustandswerte der Homogenen Abschnitte
- Durch das PMS ermittelte Maßnahmevorschläge
- Bewertung der Objektbauteile (Bauwerk-Bauteile)
- Platz zum manuellen Eintragen der tatsächlichen Maßnahmen des Bauprogramms anhand der Bewertung durch die Entscheidungsträger

Aufgrund dieser Informationsfülle werden diese Streckenbänder in Österreich auf einer Höhe größer als DIN-A4 ausgedruckt.

Die Abbildung des Straßenzustands in den beiden bisherigen Beispielen erfolgte anhand von Auswerteabschnitten (bzw. homogenen Abschnitten) mit konstanter Breite, die entsprechend ihrer Zustandsklasse eingefärbt wurden. Ähnlich wie bei den Zustandskarten ist dies nur für eine Klassifizierung der Zustände geeignet, kann aber nicht dazu verwendet werden, den exakten Zustand abzulesen. Um die genauen Zustandsgrößen darzustellen, werden so genannte „Zustandsprofile“ verwendet, die eine Sonderform der Streckenbänder sind und im Rahmen der Standardauswertung erstellt werden. In der Abbildung 54 ist exemplarisch ein Zustandsprofil wiedergegeben.

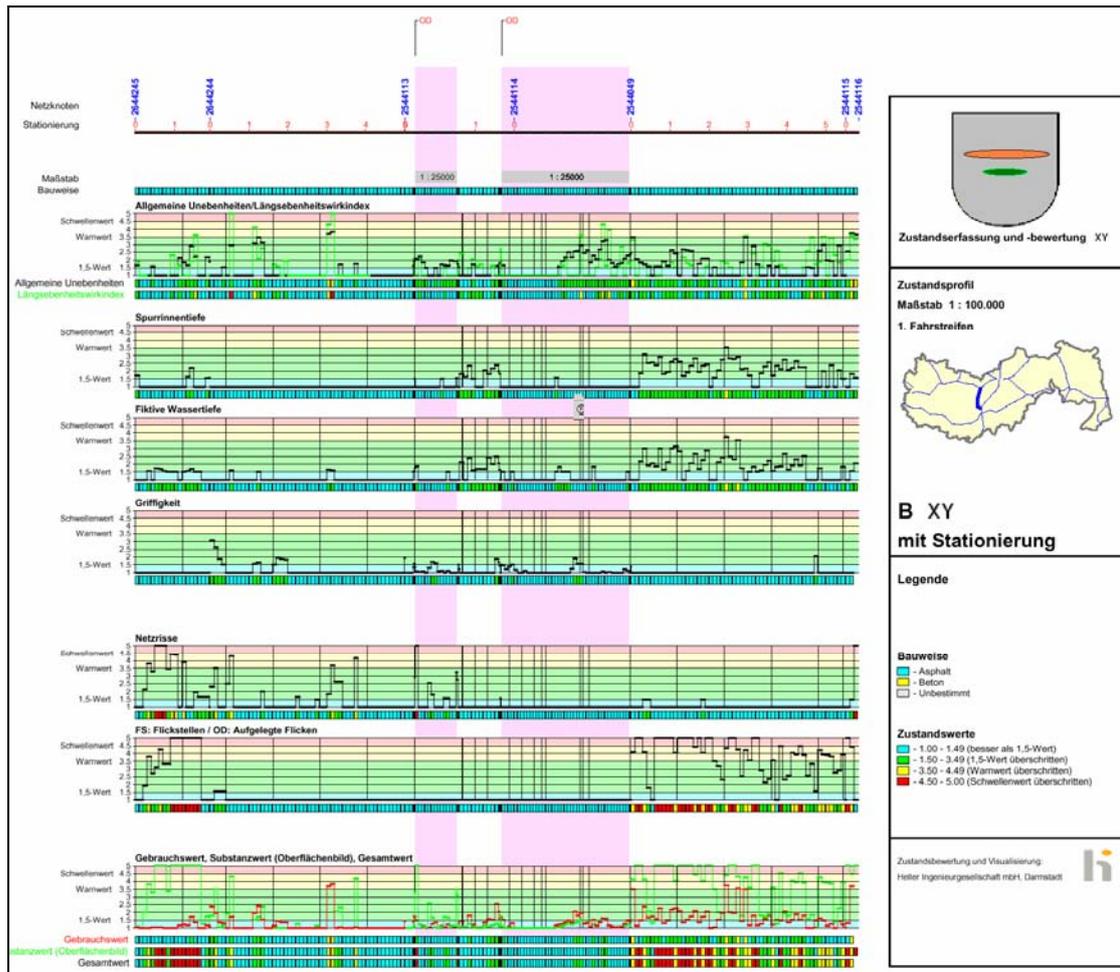


Abbildung 54: Beispiel eines Zustandsprofils [57]

Auf Zustandsprofilen werden in der Regel zu mehreren Zustandsmerkmalen die jeweiligen Zustandsgrößen oder –werte profilartig aufgetragen. Der linke Legendenbereich enthält je nach Aufgabenstellung entweder die Zustandsgrößen- oder die Zustandswerteskala des jeweiligen Zustandsmerkmals. Darüber hinaus werden unterhalb der Profilverläufe zusätzlich die Zustandsklassen durch Auswerteabschnitte konstanter Breite angezeigt. Im Gegensatz zu den weiter oben dargestellten Streckenbändern enthalten Zustandsprofile vor allem Zustandsdaten.

Die hier abgebildeten, unterschiedlichen Streckenband-Gestaltungsformen sollen einen Überblick über die Möglichkeiten dieser Technologie geben. Über die hier aufgezeigten Beispiele hinaus wird aufgabenspezifisch eine Vielzahl weiterer Darstellungsformen eingesetzt.

### 7.2.5 Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Verfahren zur Zustandsvisualisierung sind zum Teil Standard bei der Auswertung der regelmäßig durchgeführten Zustandserfassungs- und -bewertungskampagnen, werden aber auch teilweise nur vereinzelt, aufgrund eines besonderen Interesses an aussagefähigen Darstellung durch verschiedene Institutio-

nen angewendet. Eine Übersicht über die Verbreitung einzelner Visualisierungen wurde in der Abbildung 39 auf Seite 102 gegeben.

Im Vordergrund dieser Darstellungen steht vor allem der Mensch als Endanwender, d.h. die hier beschriebenen Verfahren sind nicht dahingehend optimiert worden, um in anschließenden DV-Prozessen weiterverarbeitet zu werden, sondern dem Menschen als Entscheidungsträger eine aussagekräftige Informationsgrundlage zu verschaffen. Aus diesen Gründen wird bei diesen Verfahren ein besonderer Schwerpunkt auf Visualisierungstechniken und Darstellungsformen gelegt. Trotz der weitgehenden Einfachheit der Darstellung können die darzustellenden Informationen dabei anhand sehr komplexer Analyseverfahren bestimmt worden sein, wie z.B. die Streckenbanddarstellung aus Abbildung 53, bei der die Ergebnisse aus PMS-Berechnungsläufen abgebildet werden.

Die hier dargestellten Auswerteformen wurden und werden im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses weiterentwickelt und sind zum Teil das Produkt gezielter Anfragen für bestimmte Aufgabenstellungen. Dies bedeutet, dass die vielfältigen Auswerteformen nicht einer vorgegebenen Systematik folgen, sondern dass vielmehr durch die vorliegende Zusammenstellung zunächst eine entsprechende Systematik erarbeitet werden musste.

Anhand dieser Systematik sollen die im Kapitel 2.3 zusammengestellten Fragestellungen aus der Politik-, Netz- und Projektebene dahingehend untersucht werden, inwiefern diese durch die existierenden, zustandsbasierten Darstellungsverfahren unterstützt werden. Grundlage dieser Zusammenstellung ist der bekannte, praktische Einsatz der Auswerteverfahren, nicht der mögliche, potentielle Einsatz.

In der Tabelle 8 sind die aus Kapitel 2.3 bekannten Fragestellungen und deren Behandlung durch die hier vorgestellten Auswerteverfahren zusammengestellt.

Fragestellungen der Politikebene	Behandelt durch: Säulendiagramme (SD), Summenlinien (SL) Zustandskarten (ZK) oder Streckenbänder (SB)			
	SD	SL	ZK	SB
Wie ist die absolute Angebotsqualität des Gesamtnetzes bzw. einzelner Teilnetze?	Ja	Ja	Ja	Nein
Wie verteilt sich die Angebotsqualität auf einzelne Teilnetze?	Ja	Ja	Ja	Nein
Welche Mittel werden mindestens benötigt, um eine bestimmte Qualität im Gesamtnetz bzw. in den einzelnen Teilnetzen zu erreichen?	Nein	Nein	Nein	Nein
Wie hat sich die Angebotsqualität über die Zeit verändert?	Ja	Ja	Ja	Nein
Wie wird sich die Qualität des Netzes aufgrund eines bestimmten Erhaltungsprogramms entwickeln?	Nein	Nein	Nein	Nein
Welche maximale Qualität kann mit vorgegebenen Mitteln erreicht werden?	Nein	Nein	Nein	Nein

Fragestellungen der Netzebene	Behandelt durch: Säulendiagramme (SD), Summenlinien (SL) Zustandskarten (ZK) oder Streckenbänder (SB)			
	SD	SL	ZK	SB
Wie ist das Netz in Bauabschnitte einzuteilen?	Nein	Nein	Ja	Ja
Wie verhält sich der Zustand eines Bauabschnitts mit und ohne Maßnahme?	Nein	Nein	Nein	Nein
Welche Abschnitte haben aufgrund ihres Zustands einen dringenden Handlungsbedarf?	Nein	Nein	Ja	Ja
Durch welches Erhaltungsprogramm ist bei gegebenen Mitteln die Qualität des Netzes zu maximieren?	Nein	Nein	Nein	Nein

Fragestellungen der Projektebene	Behandelt durch: Säulendiagramme (SD), Summenlinien (SL) Zustandskarten (ZK) oder Streckenbänder (SB)			
	SD	SL	ZK	SB
Welche Ursachen sind für das vorhandene Schadensbild verantwortlich?	Nein	Nein	Nein	Ja
An welcher Stelle sind die jeweiligen Straßenschäden exakt lokalisiert?	Nein	Nein	Nein	Ja
Welche exakte Lage und welche Gewerke sollen für die Baulose festgelegt werden?	Nein	Nein	Nein	Nein

**Tabelle 8: Anwendbarkeit herkömmlicher zustandsbasierter Analyseverfahren für verschiedene Fragestellungen**

Die **Politikebene** nutzt vor allem statistische Auswerteverfahren (Säulendiagramme und Summenlinien) sowie Zustandskarten, um sich einen Überblick über den Zustand bzw. die Angebotsqualität des Netzes zu verschaffen. Durch Vergleich solcher Analysen werden zudem häufig unterschiedliche Teilnetze einander gegenübergestellt, wobei der Vergleich von Zustandsveränderungen über die Zeit, d.h. von allein zeitlich unterschiedlichen Teilnetzen, einen besonderen Schwerpunkt darstellt.

Streckenbänder und Zustandskarten dienen den Entscheidungsträgern auf **Netzebene** gleichermaßen zur Identifikation von Erhaltungsschwerpunkten und weitergehend auch zur Bestimmung von Erhaltungsabschnitten und Baulosen.

Auf der **Projektebene** werden Streckenbänder eingesetzt, um die Schadensausprägung in Erhaltungsschwerpunkten anhand mehrerer Zustandsmerkmale gleichzeitig analysieren zu können. Unter eventueller Einbeziehung ergänzender Informationen (z.B. Verkehrsbelastung, Oberbau, usw.) kann der Entscheidungsträger Vermutungen zur Schadensursache aufstellen und geeignete Erhaltungsmaßnahmen bestimmen. Die exakte Lokalisierung der Schadensstellen ist ebenfalls möglich, wenn ausreichend genaue Darstellungsformen gewählt werden.

### **7.3 Weitergehende Nutzung der Zustandsdaten**

In den Kapiteln 7.1 und 7.2 wurde eine systematische Zusammenstellung der derzeit praktizierten Formen zur Nutzung der Zustandsdaten vorgestellt und es wurde untersucht, inwiefern die jeweils vorgestellten Zustandsanalyseverfahren zur Beantwortung der Fragestellungen aus Politik-, Netz- und Projektebene geeignet sind. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 9 zusammengefasst dargestellt.

Fragestellungen der Politikebene	Behandlung durch...
Wie ist die absolute Angebotsqualität des Gesamtnetzes bzw. einzelner Teilnetze?	SD, SL, ZK
Wie verteilt sich die Angebotsqualität auf einzelne Teilnetze?	SD, SL, ZK
Welche Mittel werden mindestens benötigt, um eine bestimmte Qualität im Gesamtnetz bzw. in den einzelnen Teilnetzen zu erreichen?	PMS
Wie hat sich die Angebotsqualität über die Zeit verändert?	SD, SL, ZK
Wie wird sich die Qualität des Netzes aufgrund eines bestimmten Erhaltungsprogramms entwickeln?	PMS
Welche maximale Qualität kann mit vorgegebenen Mitteln erreicht werden?	PMS

Fragestellungen der Netzebene	Behandlung durch...
Wie ist das Netz in Bauabschnitte einzuteilen?	ZK, SB, PMS
Wie verhält sich der Zustand eines Bauabschnitts mit und ohne Maßnahme?	PMS
Welche Abschnitte haben aufgrund ihres Zustands einen dringenden Handlungsbedarf?	ZK, SB, PMS
Durch welches Erhaltungsprogramm ist bei gegebenen Mitteln die Qualität des Netzes zu maximieren?	PMS

Fragestellungen der Projektebene	Behandlung durch...
Welche Ursachen sind für das vorhandene Schadensbild verantwortlich?	SB
An welcher Stelle sind die jeweiligen Straßenschäden exakt lokalisiert?	SB
Welche exakte Lage und welche Gewerke sollen für die Baulose festgelegt werden?	-

**SL:** Summenlinien | **SD:** Säulendiagramme | **ZK:** Zustandskarten | **SB:** Streckenbänder

**Tabelle 9: Abdeckung der Fragestellungen durch die derzeit angewendeten Zustandsanalyseverfahren und der PMS-Auswertung**

Aus der Übersicht geht hervor, dass mit einer Ausnahme für alle im Kapitel 2.3 herausgearbeiteten, zustandsrelevanten Fragestellungen der Politik-, Netz- und Projektebene visuelle Darstellungsverfahren vorhanden sind bzw. dass die Behandlung dieser Fragestellungen durch PMS-Auswertungen unterstützt werden kann. Allein die Festlegung von exakten Baulosgrenzen und Gewerken auf der Projektebene werden nicht durch diese Werkzeuge unterstützt. Für diese Aufgabe werden aber auch oft direkt die digitalen oder tabellarisch zusammengestellten Messergebnisse herangezogen, da die zu sichtende Datenmenge in Hinblick auf die Aufgabestellung vertretbar erscheint. Anhand der hier aufgestellten Systematik sollen einige weitere Anwendungen für die Zustandsdaten angedacht und in den nachfolgenden Kapiteln erarbeitet werden.

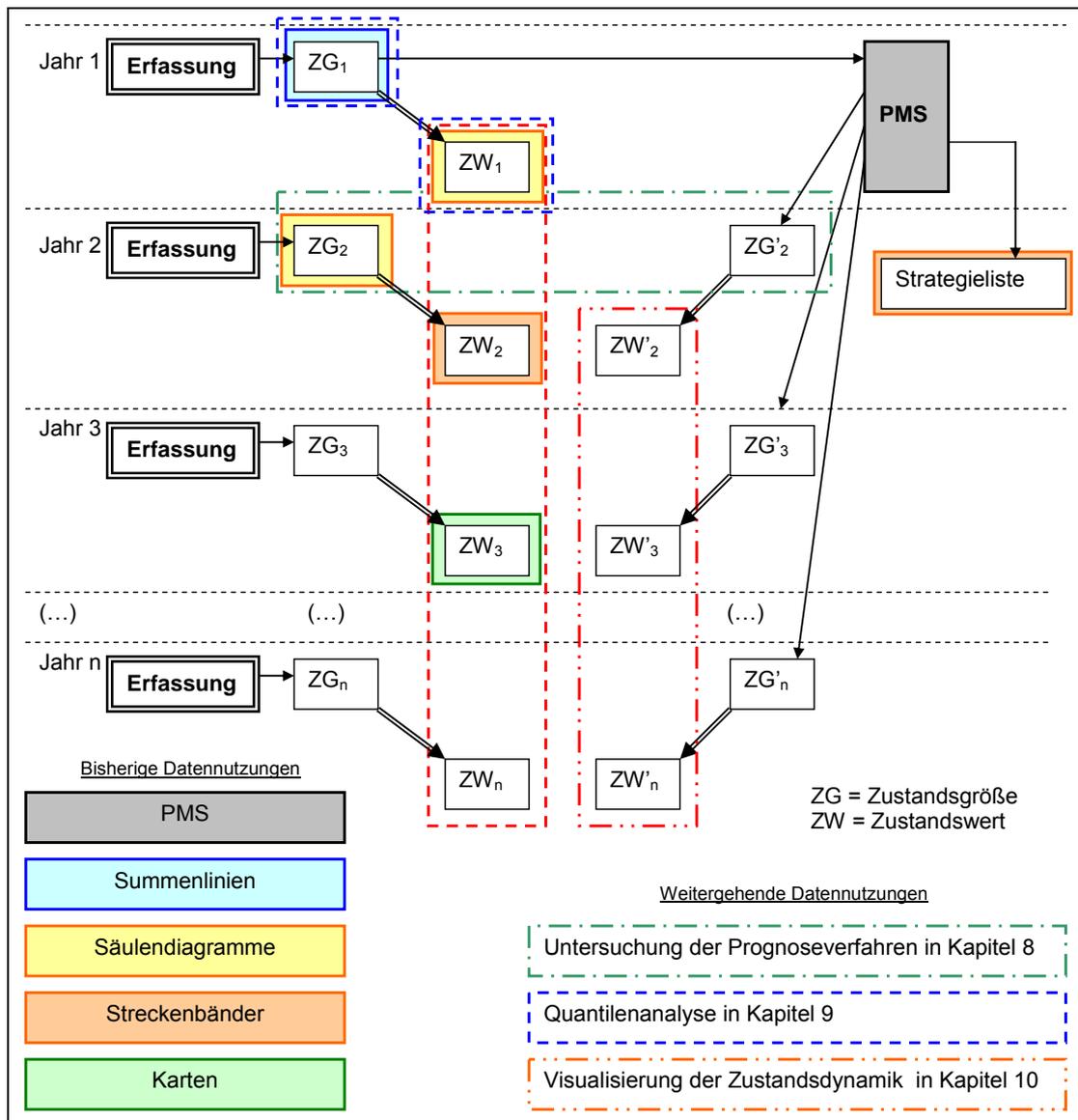
Für viele der hier aufgeworfenen Fragestellungen werden derzeit geeignete Werkzeuge zur Bearbeitung angeboten. In einigen Fällen werden vor allem Pavement Mana-

gement Systeme genutzt, um Antworten auf die Frage nach der zukünftigen Entwicklung des Zustandes zu geben. Dies gilt insbesondere für die direkten Nutzer der PMS-Ergebnisse in der Politik- und Netzebene. Aufgrund der Verbindlichkeit der höher angesiedelten Entscheidungen für die darunter liegenden Ebenen ist aber auch die Projektebene indirekt von der Qualität der PMS-Ergebnisse abhängig. Die Frage nach der Qualität der verwendeten Zustandsprognosemodelle ist somit eine Frage, welche für alle Entscheidungsebenen von Bedeutung ist und keiner von ihnen direkt zugeordnet werden kann. Dieser Frage kann aber anhand einer Gegenüberstellung von Prognose- und Zustandsdaten nachgegangen werden, die im **Kapitel 8** behandelt werden soll.

Ein weiterer Punkt, der bei den bisherigen Standardauswertungen berücksichtigt werden sollte, ist die Zulässigkeit der Anwendung bestimmter statistischer Verfahren. Dieser Aspekt wird bei der Diskussion der statistischen Hintergründe im Kapitel 8 diskutiert, wobei vorweggenommen werden kann, dass die derzeitige Praxis, bestimmte Standardkenngrößen für Lage und Streuung der Zustandswertverteilung zu ermitteln, aufgrund des diesen Größen zugrunde liegenden Skalenniveaus, statistisch nicht zulässig ist. Im **Kapitel 9** wird daher eine statistisch korrekte Ergänzung der derzeitigen Zustandskenngrößen erarbeitet.

Ein weiterer wesentlicher Punkt, der aus der Tabelle 9 abgelesen werden konnte, ist, dass es nur wenige Fragestellungen gibt, bei denen sowohl Analysen mittels PMS als auch Standardvisualisierungen gleichzeitig angewendet werden. Es zeigt sich, dass die wertvollen Prognosedaten des PMS nicht in einem umfassenden Maße durch geeignete Darstellungen verfügbar gemacht werden. Die Visualisierung der zeitlichen Veränderung des Zustands, d.h. der Zustandsdynamik wird im **Kapitel 10** besprochen.

In der Abbildung 55 sind die Vorgänge zur Erzeugung von Messdaten und Prognosedaten gemeinsam dargestellt. Darüber hinaus wurden sowohl die bisherigen, im Kapitel 7.1 und 7.2 dokumentierten Möglichkeiten der Datennutzung sowie die Themen der kommenden Kapitel, in denen neue Ansätze zur Nutzung von Zustandsdaten entworfen werden sollen, in ihrem Zusammenhang zu den vorhandenen Datengruppen eingezeichnet.



**Abbildung 55: Nutzung der Zustandsdaten**

Aus der Abbildung kann entnommen werden, dass die Anwendung des PMS auf die Zustandsgrößen einer bestimmten Jahresmessung aufsetzt und daraus Prognosewerte für Zustandsgrößen der Folgejahre ermittelt. Die verschiedenen Darstellungsverfahren aus dem Kapitel 7.2 sind farblich um die jeweils verwendete Datengruppe eingezeichnet, z.B. Summenlinien um Zustandsgrößen und Säulendiagramme um Zustandsgrößen oder um Zustandswerte einer Jahresmessung. Die meisten der derzeit eingesetzten Darstellungsverfahren verwenden grundsätzlich die Zustandsgrößen oder Zustandswerte einer einzigen Erfassung. In der Abbildung 55 wurde aber aus Übersichtsgründen darauf verzichtet, die Anwendung in allen Jahren einzuzuichnen. Grundsätzlich gilt, dass eine Anwendung, welche die Daten eines Erfassungsjahres nutzen kann, in allen Erfassungsjahren eingesetzt werden kann.

Für die nachfolgenden Auswertungen gilt, dass sie vorwiegend Teil auf mehrere Datengruppen gleichzeitig aufsetzen. Die Untersuchung der Prognoseverfahren gemäß

Kapitel 8 verbindet reale Zustandsgrößen und prognostizierte Zustandsgrößen eines betrachteten Jahres. Die Visualisierung der Zustandsdynamik entsprechend Kapitel 10 verwendet die (prognostizierten oder realen) Zustandswerte mehrerer, aufeinander folgender Jahre. Allein die Quantilenanalyse, welche im Kapitel 9 beschrieben werden soll, kann sowohl auf dynamische Daten, als auch auf die Datengruppe einer einzigen Jahresmessung angewendet werden. Aus der Betrachtung der Abbildung 55 wird somit deutlich, dass in den nachfolgenden Kapiteln vor allem die Verbindung verschiedener Datengruppen im Vordergrund stehen wird.

## 8. Zustandsprognosemodelle

Zustandsprognosemodelle beschreiben die Veränderung des Zustands über einen längeren Zeitraum in Abhängigkeit des Ausgangszustands sowie der äußeren Bedingungen, wie z.B. dem Deckenaufbau, der Verkehrsbelastung oder dem Klima. Durch den Einsatz von Zustandsprognosemodellen ist es möglich, die Folgen unterschiedlicher Entscheidungen für die Entwicklung des Zustands abzuschätzen und somit eine wertvolle Informationsgrundlage für die Entscheidungsträger bereitzustellen. Das Vorhandensein geeigneter und verlässlicher Prognosemodelle ist eine grundlegende Voraussetzung für den Einsatz von Pavement Management Systemen.

Aus diesem Grund wurden sowohl in Deutschland [55] als auch in Österreich [5] im Rahmen der Entwicklung von Systemelementen für das PMS Prognosemodelle erarbeitet, die noch bis heute unverändert beibehalten worden sind. Die Erarbeitung der Modelle erfolgte auf Grundlage der damals vorliegenden Datenbestände, welche aber mittlerweile durch zusätzliche Erfassungen ergänzt worden sind. In diesem Kapitel sollen diese Modelle vorgestellt und deren Prognoseergebnisse mit aktuellen Daten verglichen werden.

Die hier vorgestellte Analyse der Prognosemodelle hat nicht das Ziel, neue Prognoseverfahren zu entwickeln, sondern soll ausschließlich dazu dienen, die Grenzen der Anwendbarkeit der bestehenden Modelle aufzuzeigen. Hierzu sollen neue analytische und graphisch-visuelle Untersuchungsansätze erarbeitet und eingesetzt werden.

Da die spätere Vergleichsanalyse auf Elemente der Stochastik, insbesondere der Übergangswahrscheinlichkeiten im Sinne der Markowschen Prozesse zurückgreift, ist es zunächst notwendig, die statistischen und stochastischen Grundlagen vorzustellen.

### 8.1 Statistische Grundlagen

Die grundlegende Anwendung der Statistik für ein Datenkollektiv ist in der Regel für den naturwissenschaftlich interessierten Leser zwar als bekannt vorzusetzen, für die weiter unten anzuwendenden Analyseverfahren sowie für die im Kapitel 9 zu erarbeiteten Berechnungsmethoden soll an dieser Stelle auf einige Besonderheiten hingewiesen werden, die bei der statistischen Analyse von Zustandsdaten berücksichtigt werden sollten. Diese sind vor allem die Definition der Zustandsdaten als Stichprobe im statistischen Sinne und die Zuordnung der Daten zu einem so genannten Skalenniveau, welches einen Einfluss auf die anwendbaren Auswertemethoden hat.

#### 8.1.1 Stichproben

Die Statistik bietet eine Reihe von etablierten Verfahren zur Datenanalyse. Für die statistische Analyse ist es zunächst von Bedeutung festzulegen, inwiefern die zu untersu-

chende Datenbasis, d.h. im vorliegenden Fall die Zustandsdaten, als „Stichprobe“ im statistischen Sinn aufgefasst werden können.

Eine Teilmenge einer Grundgesamtheit wird als „Stichprobe“ bezeichnet. Die einzelnen Bestandteile der Teil- bzw. Gesamtmenge werden als „Elemente“ bezeichnet. Auf den vorliegenden Untersuchungsgegenstand der Zustandsdaten übertragen, muss zunächst die Grundgesamtheit beschrieben werden. Bei der Durchführung der netzweiten Zustandserfassungen wird in der Regel angestrebt, die Zustandsdaten eines Netzes möglichst vollständig zu erfassen. Da der Zustand einer jeden Strecke aufgrund von Witterung, Verkehrslast und inneren Spannungen über die Zeit variiert, umfasst die Grundgesamtheit den Zustand aller Strecken zu jedem Zeitpunkt. Eine Erfassung kann daher stets nur eine Teilmenge der Grundgesamtheit beinhalten, ist somit eine Stichprobe.

Dieser Sachverhalt wird durch weitere praktische Einschränkungen verfestigt. Der Zustand einer Straße ist eine kontinuierliche Eigenschaft, welche über die gesamte Fahrbahnfläche unterschiedlich ausgeprägt ist. Während der Erfassung werden aber aufgrund von messtechnischen Randbedingungen häufig nur einzelne Messlinien aufgenommen und die Messdaten werden in ein bestimmtes, diskontinuierliches Raster aufgeteilt. Das Befahren alternativer Messlinien (z.B. bei der Griffigkeitserfassung die Aufnahme der Fahrstreifenmitte anstatt der rechten Rollspur) oder das Verschieben des Messrasters hätten abweichende Messergebnisse zur Folge, so dass der tatsächlich gemessene Zustand als nur einer von vielen möglichen Messergebnissen betrachtet werden kann.

Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass die angewendete Messtechnik nicht das Ziel hat, ein gesamtheitliches Zustandsbild der Straße aufzunehmen. Die Gestaltung der Messverfahren sowie die Wahl der Messlinien orientiert sich das Bestreben, die schlechten Zustände zu identifizieren. Hierbei wird beispielsweise die Kenntnis ausgenutzt, dass die Griffigkeit in den Rollspuren in der Regel den niedrigsten Wert hat. Weiterhin werden Messraster und Messverfahren derart gewählt, dass anhand von ingenieurtechnischen Überlegungen angenommen werden kann, dass die erfassten Daten repräsentativ sind.

An dieser Stelle soll als Beispiel auf eine Besonderheit der Bundesstraßenerfassung in Deutschland hingewiesen werden. Bei den Bundesstraßen wird eine Vereinfachung der Erfassung durchgeführt, indem auf einbahnigen Strecken mit einem Fahrstreifen für jede Fahrtrichtung nur einer der beiden Fahrstreifen erfasst wird. Im Rahmen der Erhaltungsplanung wird angenommen, dass auf der Gegenrichtung ein identischer Zustand vorliegt. Es wird somit zwar für jeden Auswerteabschnitt der Gegenrichtung ein Zustand „abgeschätzt“, der nicht tatsächlich gemessen worden ist, der „Schätzwert“ ergibt sich jedoch nicht aus statistischen, sondern aus ingenieurmäßigen Überlegungen. Es wird angenommen, dass einbahnige Bundesstraßen mit nur zwei Fahrstreifen im Gesamtquerschnitt einen ähnlichen Aufbau haben, eine ähnliche Erhaltungshistorie

aufweisen, in etwa ähnliche Verkehrsbelastungen aufnehmen und auch ähnlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind. Da dies nach allgemeiner Einschätzung die maßgeblichen Faktoren für die Beeinflussung des Zustands sind, erschien es legitim, auch einen identischen Straßenzustand anzunehmen. Diese Annahme erlaubt eine wesentliche Kostenreduktion bei der Erfassung.

Bei der Durchführung der netzweiten Zustandserfassungen wird in der Regel, unter der bei den Bundesstraßen genannten Einschränkung, angestrebt, die Zustandsdaten möglichst auf allen Strecken des zu untersuchenden Netzes zu erfassen. Die Erfassungslücken sind sehr gering und ergeben sich ausschließlich durch Messausfälle (z.B. durch Gerätefehler oder durch Baustellen) oder durch zeitliche Verzögerungen zwischen Erfassungsplanung und Netzerweiterungen in Form von Ausbau oder Neubau. In Deutschland werden bei der Erfassung von Bundesautobahnen Datenlücken, die sich auf über 1 % des Erfassungsnetzes summieren, mit Vertragsstrafen geahndet. In der Regel liegen somit zu über 99 % des Erfassungsnetzes gültige Zustandsdaten vor.

Diese weitestgehende Vollständigkeit resultiert aus dem Bestreben, zu jeder Strecke repräsentative Zustandsdaten zu erhalten, da für viele der Aufgabenstellungen aus dem Erhaltungswesen lokale, projektbezogene Informationen benötigt werden. Es genügt in diesen Fällen nicht, nur anhand von statistischen Verfahren, Schätzwerte für Straßenzustände zu ermitteln. In der bisherigen Auswertepaxis werden die Zustandsdaten einer Jahresmessung daher häufig wie eine „Grundgesamtheit“ behandelt.

Eines der wichtigsten Forschungsgebiete der Statistik, die „induktive Statistik“, mit deren Hilfe anhand von kleineren Stichproben Rückschlüsse auf eine unbekannte, statistische Grundgesamtheit gewonnen werden sollen, ist somit bei der Planung und Durchführung von ZEB-Kampagnen von nachgeordneter Bedeutung und tritt zurück hinter die „deskriptive Statistik“, welche die Beschreibung einer Stichprobe bzw. einer Grundgesamtheit verfolgt. Die induktive Statistik hat jedoch eine besondere Bedeutung für die Erarbeitung von Prognosemodellen zur systematischen Erhaltungsplanung mittels Pavement Management Systemen. Obwohl hierfür unter anderem auch die Zustandsdaten gesondert ausgewiesener, häufig nachgemessener Untersuchungsstrecken herangezogen werden, können die Zustandsdaten der regulären, netzweiten Erfassungen einen wertvollen Beitrag zur Prognosemodellbildung beitragen.

Trotz des Strebens nach größtmöglicher Netzabdeckung sind aber die Zustandsdaten einer Jahresmessung oder einer Kampagne aus den oben genannten Gründen, insbesondere aufgrund der permanenten zeitlichen Veränderlichkeit des realen Zustands, als „Stichprobe“ im statistischen Sinn aufzufassen. Durch entsprechende statistische Verfahren könnten somit zu jeder netzweiten Erfassung entsprechende Kenngrößen ermittelt werden, deren zeitliche Veränderung analysiert werden kann. Hierzu sollen zunächst die Voraussetzungen einer solchen Stichprobenanalyse benannt werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Einordnung der Stichprobenwerte zu einem

Skalenniveau, da hiervon die Zulässigkeit der Ermittlung von Kenngrößen zur Beschreibung von Stichproben abhängt.

### 8.1.2 Skalenniveaus

Eine Variable kann einen Wert auf einer vorgegebenen Skala annehmen. Je nachdem, welche Eigenschaften die Werte aufweisen, ist die Skala einer der folgenden vier Skalenniveaus zugeordnet.

- Nominalskala
- Ordinalskala
- Intervallskala
- Verhältnisskala

Das Skalenniveau bestimmt, welche Informationen aus den Ausprägungen des Merkmals abgeleitet werden können, welche mathematischen Operationen mit der Variablen vorgenommen werden können und welche Transformationen mit den Variablen durchgeführt werden können, ohne Informationen zu verlieren bzw. zu verändern.

Befindet sich eine Variable auf einer **Nominalskala**, so kann sie bestimmte, vordefinierte Werte bzw. Kategorien annehmen, die nicht miteinander in einer Rangfolge gebracht werden können. Beispielsweise wird bei der Festlegung der Deckschichtart eine Nominalskala verwendet, welche z.B. die Werte „Beton“, „Splittmastixasphalt“, „Gussasphalt“, „Makadamdecke“, etc. enthalten kann.

Eine **Ordinalskala** hat gegenüber der Nominalskala die zusätzliche Qualität, dass die Kategorien in eine Rangfolge gebracht werden können. Bei der Bestimmung von Zustandsklassen wird beispielsweise eine Ordinalskala verwendet. Die Zustandsklassen 1 bis 4 resultieren werden für einzelne Abschnitte vergeben, falls die zugrunde liegenden Zustandswerte bestimmte Grenzen (1,5-Wert, Warnwert oder Schwellenwert) überschreiten. Je niedriger die Zustandsklasse ist, desto besser ist der Zustand eines Auswerteabschnitts. Über diesen qualitativen Vergleich hinaus kann aber keine quantitative Aussage mehr gemacht werden. Es kann beispielsweise nicht ausgesagt werden, dass die Zustandsklasse 2 „doppelt so schlecht“ ist, wie die Zustandsklasse 1.

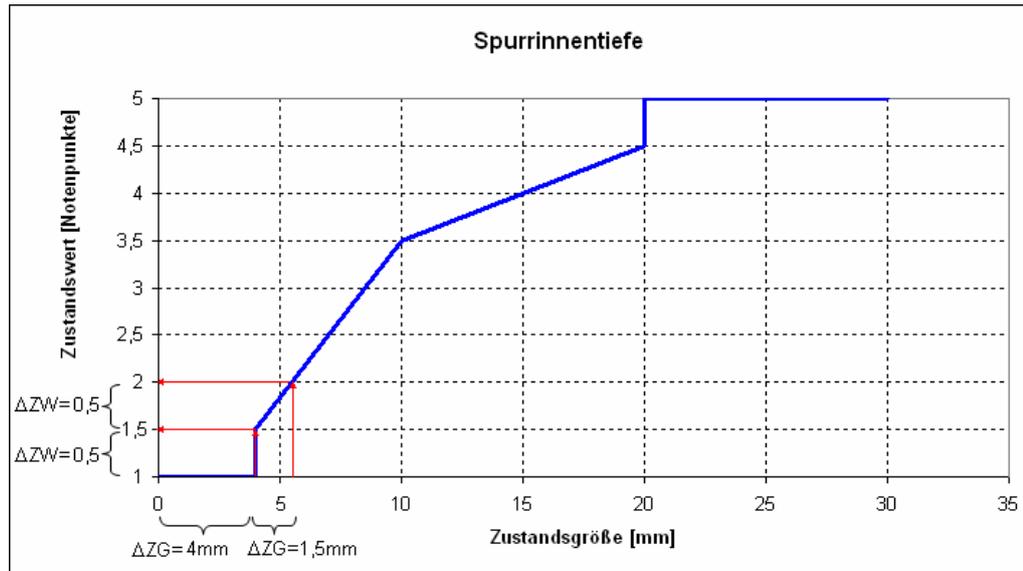
Auf einer Intervallskala oder einer Verhältnisskala lassen sich nicht nur Kategorien, sondern beliebige diskrete Messwerte angeben. Als Einschränkung gilt aber, dass bei einer **Intervallskala** der Nullpunkt der Skala, d.h. der Wert „0“, keine besondere Bedeutung haben muss. Hierdurch lassen sich zwar Abstände vergleichen, das Verhältnis zweier Absolutwerte muss aber keine nähere Bedeutung haben. Ein häufig genanntes Beispiel für eine Intervallskala ist die Celsius-Temperaturskala, bei der der Nullpunkt

willkürlich durch den Gefrierpunkt von  $H_2O$  unter bestimmten Bedingungen definiert worden ist.

Demgegenüber ist die Kelvin-Temperaturskala eine **Verhältnisskala** (auch: Ratioskala). Bei einer Verhältnisskala hat der Nullpunkt eine natürliche Bedeutung, so dass das Verhältnis zweier Absolutwerte als auswertbare Größe eine eigenständige Aussage erlaubt. Allgemeinbekannte Beispiele für die Anwendung von Verhältnisskalen sind die Angaben des Lebensalters oder der Körpermasse einer Person. Die Messung der Spurrinnentiefe erfolgt anhand einer Verhältnisskala, die beispielsweise die Aussage erlaubt, dass 6 mm Spurrinnen physikalisch doppelt so tief sind wie 3 mm.

Für die statistische Analyse von Zustandsdaten ist die Einordnung der Zustandswerte von besonderer Bedeutung. Unter Berücksichtigung der Verfahren zur Ermittlung von Zustandsgrößen und Zustandswerten können hierzu zwei unterschiedliche Positionen vertreten werden.

- Zum einen können **Zustandswerte als Werte einer Ordinalskala** aufgefasst werden. Dies wird dadurch begründet, dass die Werte keinen offenen Wertebereich haben, und durch die unstetigen Normierungsfunktionen z.T. undefinierte Wertebereiche enthalten. Somit können Zustandswerte nur bestimmte, vordefinierte Klassenwerte annehmen, die aber in eine eindeutige Reihenfolge gebracht werden können. Bekräftigt wird diese Position durch die Tatsache, dass bei der Betrachtung einer Stichprobe die ursprüngliche Verteilung der Zustandsgrößen durch die Transformation in die Zustandswerte verändert wird. Die Forderung einer Intervallskala, dass Absolutdifferenzen zwischen Zustandswerten gleichbedeutend sind, wäre gemäß dieser Auffassung nicht mehr gegeben. Als Beispiel sei eine Zustandswertdifferenz von 0,5 Notenpunkten betrachtet. Im Notenbereich 1,0 bis 1,5 entspräche dies in Deutschland einer Zustandsgrößendifferenz von 4 mm Spurrinnentiefe. Im Notenbereich 1,5 bis 2,0 entspräche dies einer Differenz von 1,5 mm (siehe Abbildung 56).



**Abbildung 56: Unterschiedliche Zustandsgrößendifferenz bei gleicher Zustandswertedifferenz**

Die Ursache hierfür liegt vor allem in den Unstetigkeiten der Normierungsfunktion, welche alle Spurrinntiefen bis 4mm dem Zustandswert 1,0 zuordnet, aber auch in den unterschiedlichen Funktionssteigungen in den einzelnen Zustandsklassenbereichen. Die Unstetigkeitsbereiche haben einen Effekt, welcher dem mathematischen Runden ähnlich ist. Im Gegensatz zum Runden wird aber die ursprüngliche Verteilung aber systematisch verändert, so dass die Ergebnisse von Operation wie z.B. der Mittelwertbildung erheblich beeinflusst werden.

- Es können aber demgegenüber auch Argumente dafür benannt werden, **Zustandswerte als Werte einer Intervallskala** aufzufassen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass durch den Normierungsprozess nicht nur einfach eine Transformation der Zustandsgrößen stattfindet, sondern durch das Hinzufügen einer „Wertigkeit“ eine Bewertung durchgeführt wird. Dies bedeutet, dass der Zustandswert einen anderen Sachverhalt quantifiziert, als die Zustandsgröße. Die Zustandsgröße beschreibt die rein physikalische Ausprägung der Beschädigung (z.B. in mm Spurrinntiefe), während der Zustandswert eine ingenieurmäßige (subjektive) Bewertung der Schädigung beziffert. Gemäß dieser Betrachtungsweise kann ein Unterschied von 0,5 Notenpunkten als stets gleichbedeutend aufgefasst werden, unabhängig davon welche physikalische Beschädigung damit verbunden wäre. Diese Auffassung würde in Analogie zur Vergabe der Schulnoten (=Zustandswerte) erfolgen, bei der der Unterschied um einen Notenpunkt stets gleichbehandelt wird, unabhängig davon, welche Fehleranzahl in Aufsätzen (=Zustandsgrößen) der Benotung zugrunde liegen.

Hierbei ist zu beachten, dass Schulnoten nach strenger statistischer Auslegung als ordinalskaliert eingestuft werden können. Einige Quellen fassen das Ska-

lenniveau von Schulnoten als Grauzonenbereich auf, der nicht eindeutig festgelegt werden kann. Gemäß diesen Interpretationen ist beispielsweise die Errechnung einer Durchschnittsnote für alle Ergebnisse einer Klausur eine unzulässige Operation.

Die Unterscheidung zwischen Ordinalskala und Intervallskala ist von besonderer Bedeutung, da das einer Variablen zugrunde liegende Skalenniveau entscheidend für die möglichen Operationen ist, welche mit Stichproben der Variablen durchgeführt werden können. Es ist insbesondere unzulässig, für ordinalskalierte Stichprobenwerte Mittelwerte zu bilden, was aber häufig bei Auswertungen von Zustandswerten erfolgt ist.

Im Rahmen eines Bundesdokumentationsvorhabens [60] wird dieser Aspekt derzeit (2006) intensiv diskutiert. Der bisher bekannte Diskussionsstand lässt darauf schließen, dass in Deutschland zukünftig Zustandswerte als Werte einer Ordinalskala aufgefasst werden sollen, was einen gewissen Einfluss auf zukünftige Auswerteverfahren haben wird. Unabhängig davon sollte aber bei jeder Auswertung die Aussagefähigkeit in Bezug auf die jeweils untersuchte Aufgabenstellung betrachtet werden. In der Vergangenheit sind vor allem in Deutschland häufig Zustandswerte als Kriterium für Schadensausprägungen aufgefasst worden, was aufgrund des ihnen zugrunde liegenden Normierungsvorgangs nicht korrekt ist. Auf diese Annahme aufgebaute Modelle, z.B. zur Zustandsprognose, sind daher mit bestimmten Schwächen belastet (siehe auch Kapitel 8.3.3).

Für die Zustandswerte in Österreich kann ähnlich wie auch in Deutschland argumentiert werden. Die Normierungsfunktionen, anhand derer die Zustandswerte aus den Zustandsgrößen ermittelt werden, weisen zwar keine Unstetigkeiten auf, sind aber auch nicht streng monoton. Die Zustandswerte haben wie auch in Deutschland einen eingeschränkten Wertebereich und eine von den zugrunde liegenden Zustandsgrößen abweichende Verteilung. Je nach Argumentation können die Zustandswerte wie auch in Deutschland entweder als Ordinalskalenwerte oder als Intervallskalenwerte aufgefasst werden. Eine statistisch zweifelsfreie Auswertung ist nur dann möglich, wenn nur die für Ordinalskalen zugelassenen mathematischen Operationen durchgeführt werden.

Demgegenüber sind die *Zustandsgrößen*, welche im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, auf Intervall- oder Verhältnisskalen verteilt und somit ist es legitim, hierfür verschiedene statistische Kenngrößen, wie z.B. den Mittelwert oder die Standardabweichung, zu ermitteln und zu vergleichen.

### **8.1.3 Bekannte statistische Kenngrößen**

Als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen sollen zunächst die wichtigsten, häufig anzutreffenden, statistischen Kenngrößen zur Beschreibung von Stichproben auf Intervall- oder Verhältnisskalen zusammengestellt werden. Zur Beschreibung einer

Stichprobe werden in der Literatur vor allem zwei Merkmale benannt. Die „Lage“ oder „zentrale Tendenz“ einer Verteilung sowie deren „Streuung“ bzw. „Dispersion“. Die Lage beschreibt das Zentrum einer Verteilung, um das die restlichen Werte mit einer bestimmten Streuung verteilt sind.

### 8.1.3.1 Lage einer Verteilung

Zur quantitativen Beschreibung der Lage einer Verteilung stehen mehrere unterschiedliche Kenngrößen, z.B. arithmetisches Mittel, gewichtetes Mittel, geometrisches Mittel oder Median zur Verfügung.

Die bekannteste und am häufigsten angewendete Kenngröße zur Beschreibung der Lage einer Verteilung ist das **arithmetische Mittel**:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (8.1)$$

Mit:  $\bar{x}$ :     Arithmetisches Mittel

n:     Anzahl der Stichprobenwerte

Für die Analyse von Zustandsdaten sollte das arithmetische Mittel nur dann verwendet werden, wenn die zu mittelnden Werte gleichermaßen zu gewichten sind. Falls Elemente mit unterschiedlichem Umfang in der Grundgesamtheit kombiniert werden sollen, bietet es sich an, ein **gewichtetes arithmetisches Mittel** zu berechnen:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (8.2)$$

Mit:  $\bar{x}$ :     Gewichtetes arithmetisches Mittel

n:     Anzahl der Stichprobenwerte

w<sub>i</sub>:     Gewichtung des Wertes x<sub>i</sub>

Für die Gewichtung kann diskutiert werden, ob die Länge oder die Fläche des zugrunde liegenden Auswerteabschnitts zu verwenden ist. Für die meisten Zustandsgrößen (mit Ausnahme des Oberflächenbildes) gilt, dass sie entlang einer Messlinie gewonnen werden und die Messdatenmenge ausschließlich von der Messlänge und nicht von der Fläche abhängt. Die Zustandsgrößen werden aber als repräsentativ für den gesamten, jeweils befahrenen Fahrstreifen angesehen, so dass anhand dieses Gesichtspunktes eine Flächengewichtung sinnvoller erscheint. Zusammenfassend lässt sich auch hier keine abschließende Empfehlung formulieren, sondern es sollte der jeweilige Aufgabenbezug beachtet werden.

Das **geometrische Mittel**  $\bar{x}_{geom}$  ist ein geeignetes Lagemaß für Größen, bei denen nicht die Summe, sondern das Produkt eine besondere Bedeutung hat. Dies kann beispielsweise bei Wachstumsraten der Fall sein.

$$\bar{x}_{geom} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (8.3)$$

Mit:  $\bar{x}_{geom}$  : Geometrischer Mittelwert der Stichprobe

n: Anzahl der Stichprobenwerte

Der **Median**  $\tilde{x}$  einer Stichprobe ist der Wert, der genau so häufig über- wie unterschritten wird. Er teilt die Stichprobe in zwei gleich große Hälften. Bei einer geraden Anzahl von Elementen wird der Median anhand des arithmetischen Mittelwertes der beiden mittleren Werte berechnet. Für sortierte Werte kann der Median folgendermaßen bestimmt werden:

$$\tilde{x} = x_{(n+1)/2} \quad \text{für n ungerade} \quad (8.4)$$

$$\tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{n/2+1}}{2} \quad \text{für n gerade} \quad (8.5)$$

Mit:  $\tilde{x}$  : Median der Stichprobe

n: Anzahl der Werte in der geordneten Stichprobe

Bei einer symmetrischen Werteverteilung ist der Median gleich dem arithmetischen Mittelwert und für statistische Verteilungen ein ebenso guter Schätzparameter für die Lage der Verteilung. Der Median zeichnet sich gegenüber dem arithmetischen Mittelwert durch eine hohe Robustheit aus, d.h. durch eine größere Unempfindlichkeit gegenüber einzelnen Ausreißern. Demgegenüber hat der Mittelwert den Vorteil, nicht nur die Reihenfolge der Werte, sondern auch die Größenordnungen der Werte in den Randbereichen zu berücksichtigen. Bei unsymmetrischen Verteilungen kann der Mittelwert Tendenzen besser quantifizieren

### 8.1.3.2 Streuung einer Verteilung

Zur Beschreibung der Streuung können u.a. Varianz, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Spannbreite und Interquartilabstand bestimmt werden.

Die **Varianz** ist ein Maß für die mittlere quadratische Abweichung eines Wertes der Stichprobe vom Erwartungswert. Für die Charakterisierung einer Streuung kann die Gleichung (8.6) der Stichprobenvarianz verwendet werden.

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8.6)$$

Mit:  $\text{Var}(X)$ : Varianz der Stichprobe

$\bar{x}$ : Arithmetischer Mittelwert der Stichprobe

n: Anzahl der Stichprobenwerte

Soll dagegen die Varianz geschätzt werden, die der Grundgesamtheit zugrunde liegt, so ist die Gleichung (8.7) zu verwenden.

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8.7)$$

Mit:  $\text{Var}(X)$ : Schätzer für die Varianz der Grundgesamtheit

$\bar{x}$ : Arithmetischer Mittelwert der Stichprobe

n: Anzahl der Stichprobenwerte

Die Varianz hat aufgrund der Quadratbildung den Nachteil, dass sie eine andere Einheit als die Stichprobenwerte besitzt. In der Praxis wird daher häufig die **Standardabweichung** bestimmt, die als Quadratwurzel der Varianz gebildet wird:

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(X)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.8)$$

Mit:  $\sigma$ : Standardabweichung der Stichprobe

$\text{Var}(X)$ : Varianz der Stichprobe

$\bar{x}$ : Arithmetischer Mittelwert der Stichprobe

n: Anzahl der Stichprobenwerte

Die Größe der Standardabweichung ist je nach dem zugrunde liegenden Wertebereich und der Form der Verteilung sehr unterschiedlich. Für die Griffigkeit, deren Wertebereich zwischen 0,0 und 1,0 liegt, können beispielsweise Standardabweichungen um 0,1 festgestellt werden (siehe Abbildung 59 weiter unten), während für die Spurrinntiefe, welche einen nach oben offenen Wertebereich aufweist, Standardabweichungen um die 6 mm nicht ungewöhnlich sind. Standardabweichungen unterschiedlicher Merkmale können daher nur eingeschränkt miteinander verglichen werden. Um ein Streumaß zu erhalten, welches unabhängig von den Wertebereichen der zugrunde liegenden Grö-

ßen vergleichbar ist, kann die Standardabweichung durch Division durch den arithmetischen Mittelwert normiert werden. Das Ergebnis ist der **Variationskoeffizient**  $VK$ .

$$VK = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (8.9)$$

Mit:  $VK$  : Variationskoeffizient der Stichprobe

$\bar{x}$  : Arithmetischer Mittelwert der Stichprobe

$\sigma$  : Standardabweichung der Stichprobe

Für Stichproben ohne Ausreißer ist die Bestimmung der **Spannbreite**  $R$  ein geeignetes Streuungsmaß. Die Spannbreite wird als Differenz zwischen größtem und kleinstem Messwert gebildet.

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (8.10)$$

Mit:  $R$  : Spannbreite

$x_{\max}$  : größter Wert der Stichprobe

$x_{\min}$  : kleinster Wert der Stichprobe

Die Spannbreite ist ein sehr einfaches Maß und wird von einzelnen Ausreißern stark beeinflusst. Der **Interquartilabstand**  $QR$  ist dagegen ein wesentlich robusteres Maß für die Streuung einer Verteilung. Er wird als Differenz zwischen dem  $Q_{25}$ -Quantil und dem  $Q_{75}$ -Quantil gebildet.

$$QR = Q_{75} - Q_{25} \quad (8.11)$$

Mit:  $QR$  : Interquartilabstand

$Q_{75}$  : 75 %-Quantil = Wert der von 75 % aller Stichprobenwerte unterschritten wird

$Q_{25}$  : 25 %-Quantil = Wert der von 25 % aller Stichprobenwerte unterschritten wird

#### 8.1.4 Messfehler

Bei der Anwendung statistischer Verfahren wird bei den Standardauswertungen davon ausgegangen, dass alle Messwerte identische statistische Eigenschaften haben. In der Praxis werden aber Zustandsgrößen und Zustandswerte für Abschnitte unterschiedlicher Erfassungslängen gebildet. In Deutschland werden Auswerteabschnitte mit einer

Regellänge von 20 m (Ortsdurchfahrten) bzw. 100 m (Freie Strecke) und in Österreich Erhaltungsabschnitte mit unterschiedlicher Länge gebildet.

Je nach Abschnittslänge variiert auch die Anzahl der einer Zustandsgröße zugrunde liegenden Einzelmesswerte. Auf einem 100 m langen Abschnitt werden beispielsweise einhundert Griffigkeits-Einzelgrößen für die Zustandsgröße „Griffigkeit“ herangezogen. Auf einem Abschnitt von einem Kilometer Länge werden dagegen tausend Einzelwerte benötigt. Die Einzelmesswerte haben aufgrund der jeweils identischen Erfassungstechnik einen ähnlichen Messfehler. Der Gesamtfehler der Zustandsgröße bzw. des Zustandswertes ergibt sich aus der Fehlerfortpflanzung und unterscheidet sich je nach Anzahl der einbezogenen Werte, und somit mit der Abschnittslänge.

Um den Gesamtfehler zu ermitteln muss je nach Verknüpfungsregel der Einzelwerte eine eigene Fehlerrechnung durchgeführt werden. Dies ist aufgrund der äußerst unterschiedlichen und teilweise sehr komplexen Verfahren zur Zustandsgrößenermittlung (siehe Kapitel 5) ein sehr aufwändiger Vorgang. Zu einer derartigen Fehleranalyse für die deutschen und österreichischen Zustandsgrößen konnte keine Literatur gefunden werden. Für die hier vorgestellten Verfahren wird daher die Annahme beibehalten, dass die Fehlerverteilung der einzelnen Zustandsgrößen identisch ist.

## 8.2 Stochastische Grundlagen

Anders als die rein deskriptive Statistik, welche sich ausschließlich mit der Beschreibung einer gegebenen Datenmenge befasst, wird in der induktiven (schließenden) Statistik versucht, auf eine unbekannte Datenmenge zu schließen. Ein für die Erarbeitung von Prognosemodellen besonders wichtiges Gebiet der schließenden Statistik ist die Stochastik, deren Hauptbegriffe die relativen Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten sind.

### 8.2.1 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

In der Regel werden funktionale, deterministische Zusammenhänge durch eine Gleichung wiedergegeben.

$$X = f(.) \tag{8.12}$$

Der Punkt in der Funktionsklammer ist ein Ersatz für beliebige Abhängigkeitsvariablen und Funktionen. Das Ergebnis einer solchen Gleichung ist bei gegebenem Input eindeutig. Demgegenüber kann in der Stochastik eine Variable nicht nur durch eine eindeutige Gleichung, sondern durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben werden. Der Umstand, dass eine Variable  $X$  einer Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt, wird vereinfacht durch die folgende Notation beschrieben:

$$X \sim f(.) \tag{8.13}$$

Das  $X$  wird als Großbuchstabe geschrieben, um als stochastische Variable gegenüber den kleingeschriebenen, tatsächlichen oder angenommenen Größen unterschieden werden zu können. Der Operator  $\sim$  bedeutet „ist verteilt nach“ und entspricht dem Gleichheitszeichen aus Gleichung (8.12) mit dem Unterschied, dass keine eindeutige Gleichheit vorliegt, sondern eine Verteilung nach einer bestimmten Funktion. In der Regel wird für die Verteilung eine so genannte Dichtefunktion benannt oder es wird eine bekannte Verteilungsform, wie z.B. die Standardnormalverteilung angegeben. Wenn die Variable  $X$  standardnormalverteilt wäre, würde dies durch die folgende Verteilung ausgedrückt werden:

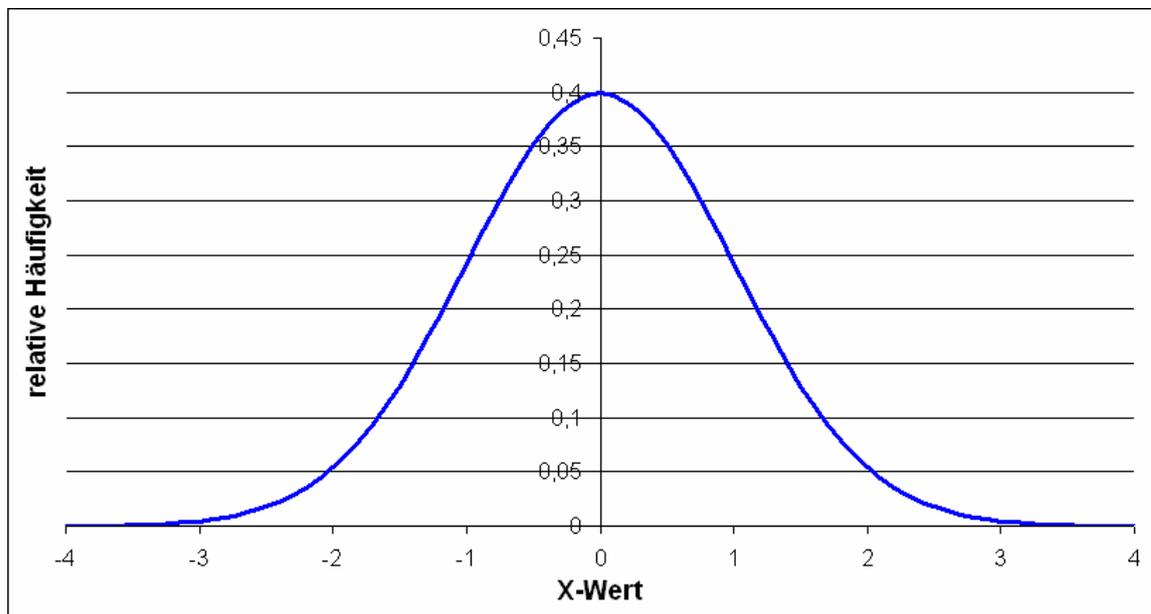
$$X \sim \mathcal{N} \quad (8.14)$$

Da die Dichtefunktion  $f_{(x)}$  der Standardnormalverteilung bekannt ist, kann auch direkt geschrieben werden:

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot x^2} \quad (8.15)$$

mit den mathematischen Konstanten  $e$  und  $\pi$

Das Auftragen der Wahrscheinlichkeitsdichte in einem Graphen ergibt die allgemein bekannte Glockenkurve gemäß Abbildung 57.

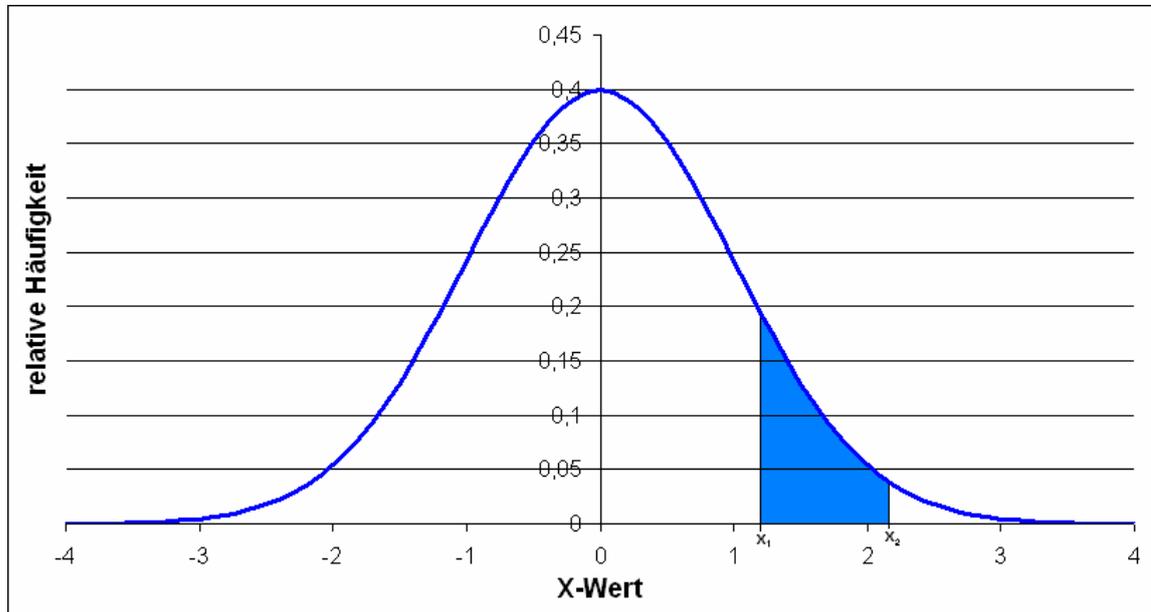


**Abbildung 57: Wahrscheinlichkeitsdichte der Standardnormalverteilung**

Die Wahrscheinlichkeit  $P$ , dass  $X$  innerhalb eines bestimmten Wertebereichs zwischen  $x_1$  und  $x_2$  liegt, wird als entsprechende Fläche unter der Wahrscheinlichkeitsdichte, d.h. aus dem Integral der Dichtefunktion ermittelt.

$$P\langle x_1 \leq X \leq x_2 \rangle = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (8.16)$$

In der Abbildung 58 ist die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit graphisch dargestellt.



**Abbildung 58: Wahrscheinlichkeitsermittlung anhand der Fläche unter der Dichtefunktion**

Dichtefunktionen haben die Eigenschaft, dass die Gesamtfläche unter der Kurve den Wert 1 erhält, da die Summe aller Ereigniswahrscheinlichkeiten gleich 100 % ist.

$$P\langle -\infty \leq X \leq \infty \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (8.17)$$

Die Standardnormalverteilung folgt somit einer eindeutigen, unveränderlichen Dichteverteilung. Da in der Natur häufig Verteilungen vorgefunden werden, die zwar einer Normalverteilung ähnlich sind, die aber eine andere Lage der Symmetrieachse und eine flachere oder steilere Ausprägung der Flanken haben, kann erst dadurch ein realistisches Datenmodell erstellt werden, indem die Standardnormalverteilung in Lage und Streuung angepasst wird. Hierfür wird die Normalverteilung verwendet, deren Dichtefunktion im Gegensatz zur Standardnormalverteilung von den Parametern  $\mu$  und  $\sigma$  abhängt. Folgt eine Variable der Normalverteilung wird dies folgendermaßen ausgedrückt:

$$X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \quad (8.18)$$

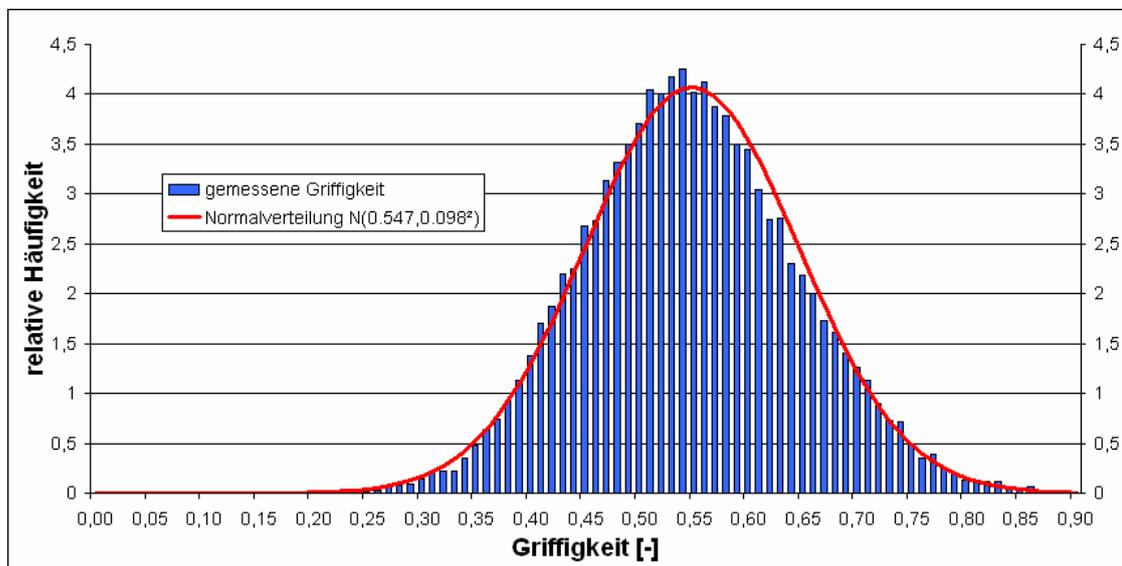
Die entsprechende Dichtefunktion lautet:

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (8.19)$$

Es wird deutlich, dass die Standardnormalverteilung (Gl. (8.14)) ein Sonderfall der Normalverteilung mit den Parametern  $\mu=0$  und  $\sigma^2=1$  ist, d.h.

$$X \sim_s \mathcal{N} \quad \text{entspricht} \quad X \sim \mathcal{N}(0,1) \quad (8.20)$$

Ein geeignetes Beispiel für eine angepasste Normalverteilung ist die Zustandsgröße „Griffigkeit“. In der Abbildung 59 wurden die realen Griffigkeits-Zustandsgrößen aus der Jahresmessung 2003 auf Bundesstraßen in Hessen in Klassen gleicher Breite (0,01 im dimensionslosen Wertebereich) aufgeteilt und aufgetragen. Aus den Daten wurden der Mittelwert (0,547) und die Standardabweichung (0,098) ermittelt und anhand dessen eine angepasste Normalverteilung erstellt.



**Abbildung 59: Verteilungsbeispiel der Griffigkeit (alle Abschnitte hessischer Bundesstraßen auf der freien Strecke)**

Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der Wertebereich der Griffigkeit messtechnisch in den Grenzen 0 bis 1 beschränkt ist, während der Wertebereich der Normalverteilung theoretisch unbegrenzt ist. In der Praxis ergeben sich aber außerhalb des Wertebereichs vernachlässigbar niedrige relative Häufigkeiten, so dass von einer Ähnlichkeit der Funktionen ausgegangen werden kann.

Neben der Normalverteilung existieren noch weitere Verteilungsfamilien, die sehr gut dafür geeignet sind, die Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten bestimmter Naturphänomene zu beschreiben. Hierbei werden stetige und diskrete Verteilungen unterschieden:

- **Stetige Verteilungen** gelten für Variable, die einen Wertebereich vollständig auffüllen. Diese Variablen folgen einer Intervallskala und sind im Rahmen der

Zustandserfassung vorwiegend anzutreffen. Beispiele für stetig verteilte Variablen sind Spurrinntiefen, Griffigkeiten oder Allgemeine Unebenheit. Beispiele für stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung sind die oben beschriebene Normalverteilung oder die für die Zustandsdynamik wichtige Lognormalverteilung [ $X \sim \mathcal{LN}(\mu^*, \sigma^*)$ ].

- **Diskrete Verteilungen** gelten für Variable, die bestimmte diskontinuierliche Werte annehmen können. Statistisch bekannte Beispiele hierfür sind Münzwurf (2 Werte) oder Würfelwurf (6 Werte). In der Zustandserfassung werden vor allem bei der Aufnahme von Substanzmerkmalen diskrete Werte erhoben (z.B. Anzahl der beschädigten Ecken einer Betonplatte, Flickstelle auf einem Abschnitt vorhanden Ja/Nein). Für diskrete Verteilungen werden beispielsweise Binomial-Verteilungen [ $X \sim \mathcal{B}(n, \pi)$ ] oder Poisson-Verteilungen [ $X \sim \mathcal{P}(\lambda)$ ] verwendet.

### 8.2.2 Bedingte Wahrscheinlichkeiten

In den obigen Ausführungen wurden Verteilungsfamilien beschrieben, die bei einer zufälligen Stichprobe auftreten können. In der Realität hängt die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer bestimmten Größe sehr wesentlich von (eventuell messbaren) Randbedingungen ab. Beispielsweise ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Zustand eines Abschnitts im Jahr 2006 davon abhängig, welcher Zustand im Jahr 2005 vorliegt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird zudem beeinflusst von anderen äußeren Randbedingungen, wie z.B. Bauweise der Deckschicht oder Verkehrsbelastung. Dieses Verhalten wird in der Stochastik durch so genannte „bedingte Wahrscheinlichkeiten“ ausgedrückt. Die Notation für die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis A unter der Bedingung B eintritt lautet:

$$P\langle A|B\rangle$$

Als Beispiel seien die folgenden disjunkten<sup>13</sup> Ereignisse definiert:

A<sub>1</sub>: „Die Griffigkeit ist größer 0,3 und kleiner oder gleich 0,4

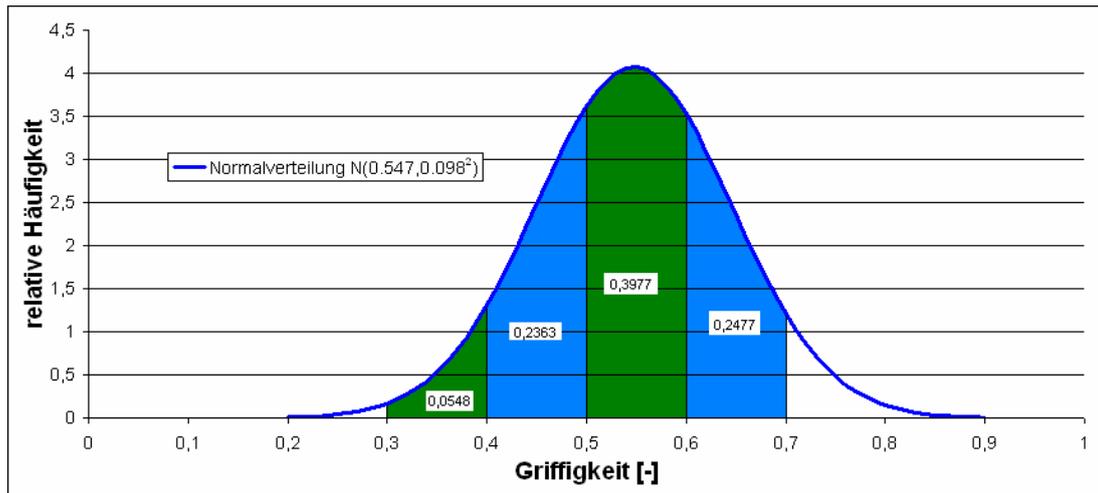
A<sub>2</sub>: „Die Griffigkeit ist größer 0,4 und kleiner oder gleich 0,5

A<sub>3</sub>: „Die Griffigkeit ist größer 0,5 und kleiner oder gleich 0,6

A<sub>4</sub>: „Die Griffigkeit ist größer 0,6 und kleiner oder gleich 0,7

---

<sup>13</sup> Das Adjektiv „disjunkt“ beschreibt, dass die Schnittmenge zweier Mengen leer ist. Für disjunkte Ereignisse gilt, dass sie nicht gleichzeitig eintreffen können.

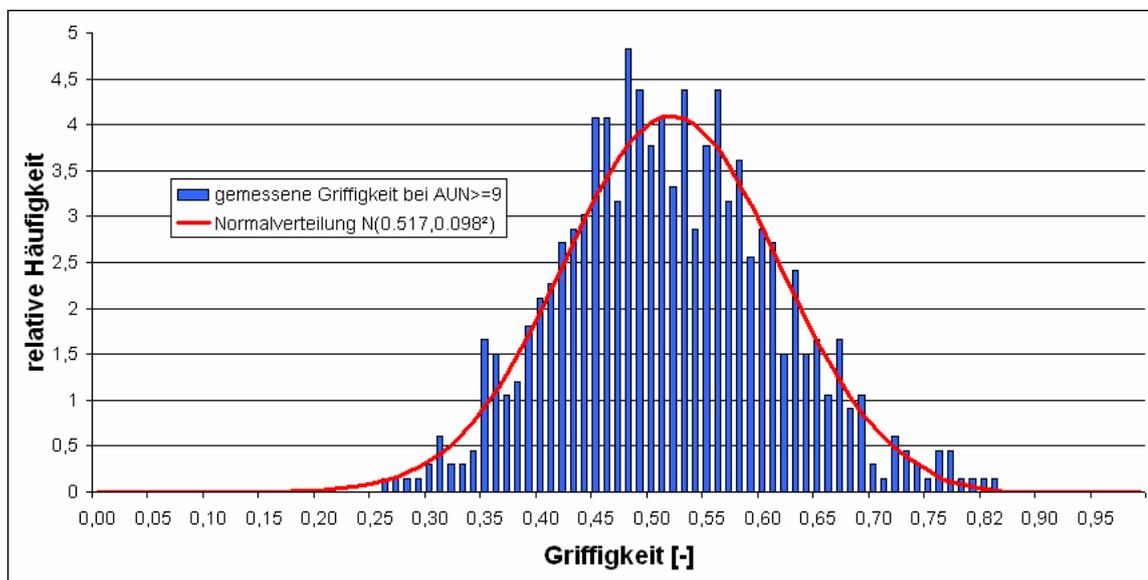


**Abbildung 60: Bestimmung der Flächen unter der Dichtefunktion für die Ereignisse  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  und  $A_4$**

Aus der Abbildung 60 können unter Annahme „Griffigkeit  $\sim \mathcal{N}(0.547, 0.098^2)$ “ für diese Ereignisse die folgenden Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden:

$$P(A_1) = 5,48 \% \quad P(A_2) = 23,63 \% \quad P(A_3) = 39,77 \% \quad P(A_4) = 24,77 \%$$

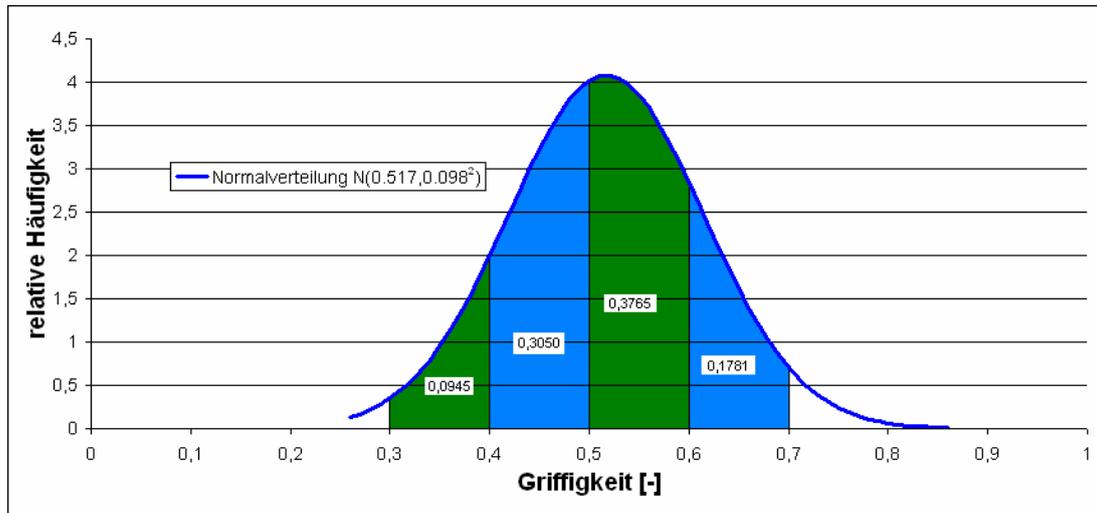
Die oben ermittelte Wahrscheinlichkeitsverteilung beruht auf einer Analyse des kompletten Netzes. Falls nur jene Abschnitte ausgewertet werden, bei denen eine hohe Unebenheit vorliegt (z.B.  $AUN \geq 9$ ) ist eine andere Verteilung festzustellen (siehe Abbildung 61).



**Abbildung 61: Verteilungsbeispiel der Griffigkeit (alle Abschnitte auf denen  $AUN \geq 9$  vorliegt auf der freien Strecke auf Bundesstraßen in Hessen)**

Da die Stichprobe verkleinert wurde, sind stärkere Streuungen in der gemessenen Griffigkeitsverteilung festzustellen, die aber dennoch in etwa einer Normalverteilung folgen.

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Ereignisse ändern sich gemäß Abbildung 62.



**Abbildung 62: Bestimmung der bedingten Wahrscheinlichkeiten**

$$P(A_1|B) = 9,45 \% \quad P(A_2|B) = 30,50 \% \quad P(A_3|B) = 37,65 \% \quad P(A_4|B) = 17,81 \%$$

Es zeigt sich also, dass die Wahrscheinlichkeit für niedrige Griffigkeiten höher wird, falls die Bedingung einer schlechten Unebenheit gegeben ist, d.h. schlechte Unebenheiten gehen oft einher mit schlechterer Griffigkeit. Die Ursache für diesen festgestellten Zusammenhang kann nicht exakt bestimmt werden, aber es können verschiedene, plausible Gründe dafür benannt werden. Zum einen wäre es möglich, dass die Unebenheiten durch die Beeinflussung des Kraftschlusses zwischen Messreifen und Fahrbahn zu einer Verfälschung der Griffigkeits-Messergebnisse führen. Zum anderen treten höhere Unebenheiten in der Regel bei älteren, abgenutzten Strecken auf, die gleichzeitig auch bei anderen Merkmalen, z.B. der Griffigkeit, ein schlechtes Gebrauchsverhalten aufweisen.

Das obige Beispiel beruht auf einer vereinfachten Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeiten. Für die tatsächliche Ermittlung bedingter Wahrscheinlichkeiten werden komplexere mathematische Verfahren, unter anderem die Bayes-Statistik, angewendet. Diese Verfahren sollen an dieser Stelle nicht vollständig nachvollzogen werden. Weiterführende Ausführungen können beispielsweise in [61] und [32] gefunden werden. An dieser Stelle sollte zunächst nur die Bedeutung und die Notation bedingter Wahrscheinlichkeiten vorgestellt werden.

### 8.2.3 Ermittlung diskreter Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus stetigen Verteilungen

In den obigen Beispielen wurde die Auswertung stetiger Wahrscheinlichkeiten vorgestellt, da diese ein geeignetes Modell für die meisten messtechnisch erfassbaren Zustandsgrößen, wie z.B. die Griffigkeit oder die Spurrinntiefe, sind. Für die weitere

stochastische Analyse, insbesondere für die Bildung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die keiner mathematischen Verteilungsfamilie (Normalverteilung, Lognormalverteilung, usw.) angehören, sowie für die Erstellung von stochastischen Matrizen mit Übergangswahrscheinlichkeiten sind diskrete Verteilung geeigneter.

Ein wesentlicher Grund dafür wurde bereits aus den aufgeführten Beispielen deutlich, da bei stetigen Verteilungen keine Wahrscheinlichkeit dafür benannt werden kann, dass eine prognostizierte (ungerundete) Größe einen bestimmten Wert annimmt, sondern nur, dass die Größe in einem Wertebereich fällt. Dies liegt daran, dass die Fläche unter der Wahrscheinlichkeitsverteilung zu Null wird, wenn die obere und untere Grenze des Integrals gleich gesetzt werden.

Bei einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung ist die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis, dass die Variable  $X$  einen bestimmten Wert  $a$  annimmt, gleich Null.

$$P\langle X = a \rangle = P\langle a \leq X \leq a \rangle = \int_a^a f(x) dx = 0 \quad (8.21)$$

Für die weiteren Berechnungen ist es durch Klassenbildung möglich, aus jeder stetigen Verteilung eine diskrete Verteilung zu ermitteln. Hierbei wird der Wertebereich in mehrere Klassen eingeteilt, die jeweils einen bestimmten Wert (in der Regel das arithmetische Mittel der Klassengrenzen) erhält. Aus der Wahrscheinlichkeit, dass die Größe  $X$  in einen Wertebereich zwischen  $x_1$  und  $x_2$  fällt, wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine neue Prognosegröße  $Z$  eine bestimmte Klasse  $z_i$  annimmt, mit den Klassengrenzen  $x_{i,1}$  und  $x_{i,2}$ .

$$P\langle Z = z_i \rangle = P\langle x_{i,1} \leq X \leq x_{i,2} \rangle \quad (8.22)$$

#### 8.2.4 Markowsche Ketten<sup>14</sup>

Für die Durchführung von Prognosen ist es von besonderem Interesse, eine bedingte Wahrscheinlichkeit so zu definieren, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung der prognostizierten Größe  $Z_{t+1}$  ausschließlich vom gegenwärtigen Zustand  $z_t$  und einer begrenzten Anzahl vergangener Zustände  $z_{t-1}$ ;  $z_{t-2}$  ...  $z_{t-n}$  abhängt. Falls bei einem stochastischen Prozess eine solche „Gedächtnislosigkeit“ angenommen werden kann, d.h. wenn angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch Kenntnis der noch weiter zurückliegenden Vergangenheit nicht weiter beeinflusst wird, wird dieser Prozess als „Markowsche Kette“ bezeichnet.

---

<sup>14</sup> Der Begriff „Markowsche Ketten“ ist auf dem Mathematiker *Andrei Andrejewitsch Markow* zurückzuführen, dessen Schreibweise im Kyrillischen „*Андрей Андреевич Марков*“ lautet. Da für den Buchstaben „*ѣ*“ keine direkte Entsprechung in der lateinischen Schrift existiert, wird der Begriff „Markowsche Kette“ in der Literatur auch häufig in anderer Schreibweise (Markoff-Kette, Markovsche Kette, usw.) verwendet. Im vorliegenden Dokument wird die häufigste Schreibweise verwendet.

Formell kann dies folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned}
 & P\langle Z_{t+1} = z_{t+1} \mid Z_t = z_t, Z_{t-1} = z_{t-1}, \dots, Z_{t-n} = z_{t-n} \rangle \\
 & = P\langle Z_{t+1} = z_{t+1} \mid Z_t = z_t, Z_{t-1} = z_{t-1}, \dots, Z_{t-n} = z_{t-n}, Z_{t-n-1} = z_{t-n-1}, Z_{t-n-2} = z_{t-n-2}, \dots \rangle
 \end{aligned} \tag{8.23}$$

Dies bedeutet, die Glieder  $Z_{t-n-1} = z_{t-n-1}$ ,  $Z_{t-n-2} = z_{t-n-2}$ , usw. der rechten Seite sind verzichtbar.

Die Anzahl der relevanten, zurückliegenden Vergangenheitszustände bestimmt die *Ordnung* der Markowschen Kette. Falls beispielsweise für die Prognose von  $Z_{t+1}$  nur die Zustände  $z_t$ ,  $z_{t-1}$  und  $z_{t-2}$  benötigt werden, handelt es sich um eine Markowsche Kette *dritter Ordnung*. Von besonderem Interesse sind Prozesse, bei denen die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zukunft allein durch den (unmittelbar messbaren) Zustand der Gegenwart bestimmt werden kann, d.h. Markowsche Ketten *erster Ordnung*.

$$P\langle Z_{t+1} = z_{t+1} \mid Z_t = z_t \rangle = P\langle Z_{t+1} = z_{t+1} \mid Z_t = z_t, Z_{t-1} = z_{t-1}, \dots, Z_{t-n} = z_{t-n} \rangle \tag{8.24}$$

Eine weitere Annahme kann darin bestehen, dass die obige Gleichung (8.24) unabhängig von dem gewählten Betrachtungszeitpunkt  $t$  ist. Das heißt beispielsweise, dass der Zustand der Griffigkeit im Jahr 2006 in der gleichen Weise von den Ausgangsdaten des Jahres 2005 abhängt, wie der Zustand der Griffigkeit im Jahr 2005 von den Ausgangsdaten des Jahres 2004.

$$P\langle GRI_{2006} = gri_{2006} \mid GRI_{2005} = gri_{2005} \rangle = P\langle GRI_{2005} = gri_{2005} \mid GRI_{2004} = gri_{2004} \rangle$$

Diese Annahme erscheint plausibel, da die Zusammenhänge zwischen den Zuständen physikalischen Gesetzen folgen und sich somit zeitlich nicht verändern sollten. Wenn die Markowsche Eigenschaft (Gedächtnislosigkeit des Prozesses) für alle  $t$  gilt, ist eine *homogene* Markowsche Kette vorhanden. Es kann somit das zusammengefasste Ziel formuliert werden, die Zustandsprognose als **homogene Markowsche Kette erster Ordnung** zu modellieren.

### 8.2.5 Übergangswahrscheinlichkeiten

Falls für ein Zustandsmerkmal ein Prognosemodell als diskrete, homogene Markowsche Kette erster Ordnung aufgestellt wird, kann durch die Klassenbildung eine Wahrscheinlichkeit  $p_{i,j}$  dafür angegeben werden, dass eine Größe von der Zustandsklasse  $z_i$  in die Klasse  $z_j$  übergeht.

$$p_{i,j} = P\langle Z_{t+1} = z_j \mid Z_t = z_i \rangle \tag{8.25}$$

Die Wahrscheinlichkeit  $p_{i,j}$  wird als „Übergangswahrscheinlichkeit“ bezeichnet. Hierbei können die Ausgangsklasse  $z_i$  und die prognostizierte Klasse  $z_j$  auch identisch sein. In

diesem Fall wäre dies die Wahrscheinlichkeit, dass die Größe in der aktuellen Klasse bleibt.

Es können somit für einen bestimmten Ausgangszustand  $Z_t = z_i$  die Wahrscheinlichkeiten für den Übergang in alle möglichen Zustandsklassen zusammengestellt werden. Dies kann bei  $n$  möglichen Zuständen ( $n$  Klassen) in Form eines transponierten Vektors  $\mathbf{p}_i$  erfolgen.

$$\mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} p_{i,1} \\ p_{i,2} \\ \dots \\ p_{i,n} \end{pmatrix} = (p_{i,1} \quad p_{i,2} \quad \dots \quad p_{i,n}) \quad (8.26)$$

Die Summe aller Wahrscheinlichkeiten muss genau 1 betragen.

$$\sum_{j=1}^n p_{i,j} = p_{i,1} + p_{i,2} + \dots + p_{i,n} = 1 \quad (8.27)$$

Wenn nun zu jeder möglichen Ausgangsklasse  $z_i$  der jeweilige Übergangsvektor  $\mathbf{p}_i$  bestimmt wird, können alle Übergangsvektoren in einer Übergangsmatrix  $\mathbf{P}$  zusammengestellt werden.

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{pmatrix} \quad (8.28)$$

Mit:  $\mathbf{P}$  = Übergangsmatrix

$p_{i,j}$  = Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von der Klasse  $z_i$  nach  $z_j$

In solchen Matrizen sind die Zeilensummen genau 1. Die Spaltensummen haben dagegen keinen festen Wert. Solche Matrizen, bei denen alle Zeilensummen 1 sind werden auch als stochastische Matrizen bezeichnet<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> In einigen Quellen wird für stochastische Matrizen gefordert, dass nicht die Zeilensumme, sondern die Spaltensumme genau 1 ergibt. Es werden dabei die gleichen theoretischen Grundlagen verwendet, die Matrix ist aber transponiert. Mit Ausnahme der Notwendigkeit, die Transponierung bei den weiteren Berechnungen zu berücksichtigen, ergibt sich aber kein Unterschied zu der hier vorgestellten Definition einer stochastischen Matrix, die der Mehrzahl der vorgefundenen Quellen entspricht.

### 8.2.6 Beispielanwendung für stochastische Matrizen

Stochastische Matrizen können verwendet werden, um Prognosen für bestimmte Werteverteilungen durchzuführen. Hierzu müssen zunächst die Daten des Ausgangszustands in Form eines Vektors zusammengestellt werden.

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{pmatrix} \quad (8.29)$$

Mit:  $\vec{A}$  = Vektor mit Ausgangszustand

$A_i$  = Anzahl der Abschnitte in der Klasse i

$n$  = Anzahl der Klassen

Der Vektor  $\vec{A}$  kann nach den Gesetzen der Matrizenmultiplikation mit der stochastischen Matrix  $P$  postmultipliziert<sup>16</sup> werden um einen Ergebnisvektor  $\vec{B}$  mit der prognostizierten Verteilung zu erhalten. Um eine korrekte Verteilung zu erhalten ist es notwendig, den Vektor zuvor zu transponieren.

$$\begin{aligned} \vec{B}^T &= \vec{A}^T \cdot P = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{pmatrix} = (A_1 \quad A_2 \quad \dots \quad A_n) \cdot \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{pmatrix} \quad (8.30) \\ &= (A_1 p_{1,1} + A_2 p_{2,1} + \dots + A_n p_{n,1} \quad A_1 p_{1,2} + A_2 p_{2,2} + \dots + A_n p_{n,2} \quad \dots \quad A_1 p_{1,n} + A_2 p_{2,n} + \dots + A_n p_{n,n}) \end{aligned}$$

Mit:  $\vec{A}$  = Vektor mit Ausgangszustand

$\vec{B}$  = Vektor mit prognostiziertem Ergebniszustand

$P$  = Übergangsmatrix (stochastische Matrix)

Als konkretes Beispiel soll nachfolgend eine einfache stochastische Matrix aufgestellt werden, bei der ein Abschnitt mit einer Wahrscheinlichkeit von 20 % in einer Klasse verbleibt, mit einer Wahrscheinlichkeit von 70 % in die nächsthöhere Klasse wechselt und mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % um zwei Klassen ansteigt. Falls keine höhere Klassen mehr vorhanden sind (z.B. weil die Ausgangsklasse bereits die höchste ist) wird in die höchstmögliche Klasse gewechselt. Bei vier möglichen Klassen würde unter diesen Annahmen die folgende stochastische Matrix entstehen.

<sup>16</sup> Da die Matrizenmultiplikation nicht kommutativ ist, muss unterschieden werden zwischen „A wird mit B postmultipliziert“ =  $A \cdot B$  oder „A wird mit B prämultipliziert“ =  $B \cdot A$ .

$$P = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,7 & 0,1 & 0,0 \\ 0,0 & 0,2 & 0,7 & 0,1 \\ 0,0 & 0,0 & 0,2 & 0,8 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 1,0 \end{pmatrix} \quad (8.31)$$

Diese Matrix soll nun auf eine bestimmte Ausgangsverteilung angewendet werden. Die Ausgangsverteilung besteht aus 1.000 Messkilometern, die sich auf die vier Klassen zu jeweils 30 %, 40 %, 20 % und 10 % verteilen. Aus dieser Ausgangsverteilung ergibt sich der folgende Vektor  $\vec{A}$ .

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 300 \\ 400 \\ 200 \\ 100 \end{pmatrix} \quad (8.32)$$

Aus der Postmultiplikation mit der stochastischen Matrix  $P$  kann eine Prognose für den Ergebnisvektor  $\vec{B}$  durchgeführt werden.

$$\vec{B}^T = \vec{A}^T \cdot P = \begin{pmatrix} 300 \\ 400 \\ 200 \\ 100 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} 0,2 & 0,7 & 0,1 & 0,0 \\ 0,0 & 0,2 & 0,7 & 0,1 \\ 0,0 & 0,0 & 0,2 & 0,8 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 1,0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 300 \cdot 0,2 + 400 \cdot 0,0 + 200 \cdot 0,0 + 100 \cdot 0,0 \\ 300 \cdot 0,7 + 400 \cdot 0,2 + 200 \cdot 0,0 + 100 \cdot 0,0 \\ 300 \cdot 0,1 + 400 \cdot 0,7 + 200 \cdot 0,2 + 100 \cdot 0,0 \\ 300 \cdot 0,0 + 400 \cdot 0,1 + 200 \cdot 0,8 + 100 \cdot 1,0 \end{pmatrix}^T \quad (8.33)$$

$$\vec{B}^T = \begin{pmatrix} 60 + 0 + 0 + 0 \\ 210 + 80 + 0 + 0 \\ 30 + 280 + 40 + 0 \\ 0 + 40 + 160 + 100 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 60 \\ 290 \\ 350 \\ 300 \end{pmatrix}^T$$

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 60 \\ 290 \\ 350 \\ 300 \end{pmatrix} \quad (8.34)$$

Mit:  $\vec{A}$  = Vektor mit Ausgangszustand

$\vec{B}$  = Vektor mit prognostiziertem Ergebniszustand

$P$  = Übergangsmatrix (stochastische Matrix)

### 8.2.7 Wahrscheinlichkeiten und relative Häufigkeiten

In der Stochastik wird zwischen den Begriffen der *Wahrscheinlichkeit* und der *Häufigkeit*, insbesondere der *relativen Häufigkeit*, unterschieden. Relative Häufigkeiten kön-

nen anhand von Zählungen und Messungen empirisch erhoben werden. Wahrscheinlichkeiten entstammen dagegen einem theoretischen Modell, repräsentieren somit „ideale“ relative Häufigkeiten. In einfachen Fällen, z.B. beim Münzwurf oder beim Würfeln können Wahrscheinlichkeiten durch reine Modellüberlegungen bestimmt werden.

Bei komplexen Naturvorgängen hat es sich dagegen bewährt, relative Häufigkeiten durch Messung zu ermitteln und diese, ggf. bereinigt oder ergänzt, als Wahrscheinlichkeiten zu übernehmen. Um aus einer Messung, d.h. aus einer absoluten Häufigkeit eine relative Häufigkeit zu ermitteln, genügt es die Einzelwerte durch die Summe der Messergebnisse zu dividieren. Wie bei Wahrscheinlichkeitsmatrizen gilt auch für Matrizen mit relativen Häufigkeiten, dass die Zeilensummen jeweils den Wert 1 erhalten müssen. Der Übergang von Häufigkeiten zu Wahrscheinlichkeiten ist ein wesentlicher Schritt für die Entwicklung von Prognosemodellen im Rahmen der induktiven Statistik.

### 8.3 Prognosemodelle

Bei der Erarbeitung von Zustandsprognosemodellen wird versucht, die reale Entwicklung des Straßenzustands durch ein vereinfachtes Modell abzubilden. In [32] wird je nach Vorgehensweise zur Entwicklung des Modells zwischen mechanistischen Modellen und empirischen Modellen unterschieden.

- **Mechanistische Modelle** oder auch analytische Modelle basieren auf der theoretischen Übertragung bekannter oder unter Laborbedingungen erforschter physikalischer Gesetze zum Materialverhalten der Straßensubstanz unter Belastung durch Primärwirkung (Dehnung und Spannung) und äußeren Einwirkungen (z.B. Wechselbelastung, Temperaturbelastung, Verwitterung, etc.).
- **Empirische Modelle** versuchen dagegen, anhand der Beobachtung realer Straßenbefestigungen und ggf. äußerer Bedingungen (z.B. Verkehrsbelastung und Witterung) Vermutungen über kausale Zusammenhänge zur zeitlichen Veränderung des Straßenzustands anzustellen.

In der Praxis werden häufig beide Kategorien miteinander verbunden, indem beispielsweise die Kenntnisse über physikalische Einflussfaktoren bei der Auswahl der beobachteten Einflussgrößen herangezogen werden oder theoretisch ermittelte Verhaltensfunktionen durch Realdaten kalibriert bzw. „empirisch abgesichert“ (z.B. in [62]) werden. Als Grundlage der Anpassung theoretischer Modellansätze anhand empirischer Daten kann beispielsweise die Bayes-Statistik verwendet werden.

Zur Ermittlung empirischer Modelle werden in der Regel gezielte Langzeitbeobachtungen an ausgewählten und für die zu untersuchende Aufgabenstellung repräsentativen Strecken durchgeführt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelten, netzweiten Zustandserfassungen werden in der Regel nicht primär zur Grundlagenforschung, sondern zur direkten Unterstützung der Entscheidungsprozesse (z.B. zur Baupro-

grammsbildung) durchgeführt und sind daher auch nicht auf die spezifischen Belange der Modellanalyse ausgerichtet.

Dies hat zur Folge, dass einige interessierende Modellgrößen nicht oder nicht mit ausreichender Genauigkeit erhoben werden und dass die Systematik der Zustandserfassung bereits eine Reihe von Annahmen und Verfahren enthält, die unter dem Gesichtspunkt der Modellbildung nicht nützlich bzw. sogar hinderlich sind. Nachfolgend werden die wichtigsten Punkte aufgeführt.

- **Auswahl der erfassten Merkmale:** Die zu messenden Zustandsgrößen werden nach dem Gesichtspunkt ausgewählt, wie relevant sie für das Gebrauchsverhalten bzw. für den Substanzerhalt sind. Die für die Grundlagenforschung wichtigen Eigenschaften, wie z.B. die Prognosefähigkeit stehen dabei im Hintergrund. Beispielsweise werden Unebenheitsgrößen wie LWI, IRI und AUN aus dem Höhen-Längsprofil abgeleitet und aufgezeichnet, während das „wahre Höhen-Längsprofil“ selbst in den Rohdaten nicht abgespeichert wird (nur das so genannte „trendbereinigte Höhen-Längsprofil“). Ähnlich wird auch durch die Griffigkeitsmessung die Reibkraft unter bestimmten, einem Bremsvorgang ähnelnden Bedingungen (Schlupf, Nässe, etc.) gemessen, jedoch nicht die für das Griffigkeitsmodell entscheidenden Mikro- und Makrorauheiten.
- **Auswahl des Erfassungsnetzes:** Bei netzweiten Erfassungen wird eine größtmögliche Abdeckung bestimmter Netze angestrebt, deren Zuschnitt sich nach geographischen bzw. anderen verwaltungstechnischen Grenzen (z.B. Straßenkategorie, Baulast) richtet. Für Modellbildungen wäre dagegen die intensive, häufige Beobachtung kleinerer, repräsentativer Netze ausreichend.
- **Genauigkeit:** Die Genauigkeit der netzweiten Erfassung wird aus Wirtschaftlichkeitsgründen so gewählt, dass die für den Entscheidungsprozess notwendigen Größen mit ausreichender Unterscheidbarkeit aufgenommen werden. In Deutschland werden daher beispielsweise keine Rissbreiten aufgezeichnet, da davon ausgegangen wird, dass das Vorhandensein der Risse, bzw. die durchschnittliche Risslänge eine ausreichende Informationsgrundlage zur Erhaltungsprogrammierung ist. Die Rissbreite ist aber als Modellgröße für Rissmodelle von entscheidender Bedeutung.
- **Bewertung:** In den Kapiteln 5 und 6 wurden die Prozesse der Zustandsgrößenbildung, der Bewertung und der Verknüpfung dargestellt. Eine Betrachtung dieser Verfahren, insbesondere der Zustandsbewertung, zeigt deutlich, dass hierbei vor allem die Relevanz des Zustands für den Nutzer bzw. Erhalter der Straße quantifiziert werden soll, wobei die tatsächliche „Ursprünglichkeit“ der Erfassungsgrößen durch Datenaggregation und mit jedem Transformationsprozess abnimmt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass auch die ursprünglichen Erfassungsdaten in der Regel verfügbar sind und für die Grundlagenforschung genutzt werden können. Es hat sich aber in der Praxis gezeigt, dass dies nicht konsequent durchgeführt wird. Im PMS in Deutschland werden bis heute (2005) ausschließlich Verhaltensfunktionen für Zustandswerte angewendet. Durch eine laufende [7] sowie eine abgeschlossene [62] Forschungsarbeit soll dies in naher Zukunft auf Zustandsgrößen-Verhaltensfunktionen umgestellt werden.

Diese Beispiele zeigen, dass die Prognosemodellbildung zwar mithilfe netzweiter Datenerfassungen durchgeführt werden kann und auch durchgeführt wird, dass aber die ursprüngliche Ausrichtung der Zustandsdatenerfassung andere Schwerpunkte setzt, was bei der Datenanalyse berücksichtigt werden sollte.

Die derzeit im PMS eingesetzten Zustandsprognosemodelle behandeln im Wesentlichen die folgenden beiden Aspekte:

- Modellierung der zeitlichen Veränderung des Zustands durch Primäreinwirkungen (z.B. innere chemische Prozesse, Eigendehnungen und -spannungen) und durch kontinuierliche, äußere Einwirkungen (z.B. Verkehrsbelastung, Witterung).
- Modellierung der Veränderung des Zustands durch Erhaltungsmaßnahmen.

Für die Ermittlung von Maßnahmewirkungen ist bei der Auswertung von netzweiten Zustandserfassungen zusätzlich zu den Zustandsdaten die Kenntnis der Art, der Lokalisierung und des Zeitpunkts zwischenzeitlich durchgeführter Maßnahmen notwendig. Solche Informationen liegen in der Regel nicht unmittelbar zu den Zustandsdaten vor, sondern werden in entsprechenden Forschungsprojekten gesondert zusammengestellt bzw. erhoben (siehe z.B. [62]).

In der vorliegenden Arbeit soll schwerpunktmäßig nur die Auswertung der Zustandsdynamik untersucht werden, so dass vor allem die Prognosemodelle zur kontinuierlichen, zeitlichen Veränderung des Zustands behandelt werden sollen.

Bei der Betrachtung der Verfahren zur Zustandsprognose kann zwischen deterministischen und stochastischen Prognosemodellen unterschieden werden. Nachfolgend werden diese beiden Modellgruppen vorgestellt.

### **8.3.1 Deterministische Prognosemodelle**

Deterministische Prognosemodelle betrachten die Veränderung eines Zustands als eine zwingende Folge seines Ausgangszustands und zwischenzeitlicher Einflussfaktoren. Falls der Zustand eines betrachteten Abschnitts zum Zeitpunkt  $t$  als  $X_t$  bezeichnet wird, kann für den Folgezustand  $X_{t+1}$  zum Zeitpunkt  $t+1$  ein deterministischer Ansatz folgendermaßen formuliert werden:

$$X_{t+1} = f(X_t, \alpha, \beta, \gamma \dots) \quad (8.35)$$

Hierbei können  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , usw. Einflussparameter sein, die gegebenenfalls auch zeitlich veränderbar sind, also beispielsweise:

$$X_{t+1} = f(X_t, \alpha_t, \beta_t, \dots) \quad (8.36)$$

Solche Gleichungen werden als „Verhaltensfunktionen“ bzw. „Verhaltensmodelle“ bezeichnet und im Rahmen des PMS eingesetzt. Der deterministische Prognoseansatz ist sehr intuitiv begreifbar und entspricht der ingenieurmäßigen Vorstellung einer Verbindung von Ursache und Wirkung sowie einer physikalischen Gesetzmäßigkeit. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Abhängigkeit des Straßenzustands von äußeren Faktoren einem komplexen Modell folgt, das die Kenntnis von Einflussparametern verlangt, welche nicht mit vertretbarem Aufwand bzw. zum Teil überhaupt nicht erhoben werden können. Aus diesem Grund werden viele dieser Parameter geschätzt. Nachfolgend sind hierfür einige Beispiele wiedergegeben.

- Für die exakte Bestimmung der Verkehrsbelastung müsste der Verlauf der Fahrspuren, die Achslasten und die Geschwindigkeiten jedes Fahrzeugs bekannt sein und eingerechnet werden. In der Praxis begnügt man sich mit der Kenntnis des durchschnittlichen täglichen Schwerverkehrs (DTV-SV auf dem Gesamtquerschnitt) und einer vereinfachten Annahme zur Aufteilung dieses Verkehrs auf die einzelnen Fahrstreifen. In Österreich wird hieraus ein Verkehrsbelastungskoeffizient ermittelt, der das Verhältnis aus zulässigen und tatsächlichen Normlastwechsel wiedergibt und als Eingangsgröße für die Zustandsprognose verwendet wird. In Deutschland wird im Rahmen der PMS-Anwendung derzeit auf eine Berücksichtigung der Verkehrsstärke bei der Zustandsprognose verzichtet. Dies wird sich zukünftig entsprechend der aktuellen Entwicklungen [62] ändern.
- Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Qualität der Bauausführung, insbesondere des eingebauten Materials und der Verdichtung. Dieser Faktor ist in der Regel nicht bekannt.
- Der Straßenzustand verschlechtert sich auch durch wetterbedingte Verwitterung, wobei die Häufigkeit, die Dauer und die Intensität von Frost-Tau-Wechseln einen wesentlichen Einfluss haben. Dieser Einfluss entzieht sich in der Regel einer ausreichend genauen Prognose und muss daher durch gemittelte Klimakenngrößen abgeschätzt werden.
- Neben diesen allgemein beschreibbaren Punkten sind Einflussfaktoren festzustellen, die sich aus unvorhersehbaren Einzelereignissen ergeben und gleichzeitig eine enorme Wirkung auf den Straßenzustand haben können. Gerade in Deutschland und in Österreich können anschauliche Beispiele benannt werden:

- Die Wiedervereinigung der Bundesrepublik Deutschland und die politische Öffnung Osteuropas ab 1989 haben zu einer enormen Zunahme des Transitverkehrs auf bestimmten Strecken der beiden Länder geführt.
- Die Weltausstellung in Hannover EXPO 2000 führte zu einer Zusatzbelastung der Zubringerrouten, welche z.B. durch eine Sondernutzung von Standstreifen und durch andere Maßnahmen in Niedersachsen abgefangen werden sollten. Durch solche temporären Ummarkierungen wurden nicht nur die PKW-Ströme, sondern auch der für die Beschädigung des Straßenoberbaus besonders relevante Schwerverkehr auf Befestigungen gelenkt, die ggf. nicht für eine solche Belastung dimensioniert worden sind.
- Schwere Flutkatastrophen, wie im Jahr 2002 und 2005 können einzelne Teilstrecken schwer beschädigen.
- Während der Austragung der Fußball-Weltmeisterschaft im Jahr 2006 (Deutschland) sowie der Fußball-Europameisterschaft 2008 (Österreich und Schweiz) wird auch in naher Zukunft mit einer besonderen Zusatzbelastung der Strecken gerechnet.

Anhand dieser Beispiele kann nachvollzogen werden, dass eine exakte Prognose der Zustandsverschlechterung nicht möglich ist. Dennoch werden derzeit, von einigen Forschungsanwendungen abgesehen, fast ausschließlich deterministische Modelle zur Zustandsprognose eingesetzt. Da die exakten Werte der Einflussparameter nicht bekannt sind, werden sie durch Schätzgrößen angenommen. Hierbei ergeben sich im Einzelfall gewisse Abweichungen gegenüber der Realität, die durch eine „abschnittsbezogene Kalibrierung“ ausgeglichen werden sollen. In der Praxis werden somit Standard-Verhaltensfunktionen bereitgestellt und durch Verschiebung („Curve-Shifting“) oder Veränderung der Krümmung an die bekannten Zustands- und Bestandsdaten angepasst (siehe [55] und [5]).

Durch die Schätzparameter und abschnittsbezogene Kalibrierung wird bei deterministischen Modellen versucht, die Streuungen der Einflussparameter zu berücksichtigen. Dennoch werden Prognoseresultate berechnet, die nach der Berechnung frei von stochastischen Unsicherheiten sind, d.h. die einen deterministischen, eindeutigen Wert enthalten.

### **8.3.2 Stochastische Prognosemodelle**

Stochastische Modelle haben gegenüber dem deterministischen Ansatz, bei dem eine Größe sich zwingend aus dem Ausgangszustand ergibt, eine andere Vorgehensweise. Sie betrachten das Ergebnis einer Prognose nicht als eindeutigen Wert, sondern als

eine Werteverteilung, bei der unterschiedlichen Wertebereichen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden.

Hierbei sollte betont werden, dass die Anwendung stochastischer Verfahren zur Prognosemodellbildung noch nicht ausreicht, um ein stochastisches Modell als solches zu klassifizieren. Die beiden derzeit in Österreich und in Deutschland angewendeten Modelle beruhen beispielsweise auf umfangreichen statistischen Voruntersuchungen; in beiden Fällen wurde aber anhand der stochastischen Überlegungen jeweils ein deterministisches Prognosemodell erarbeitet, welches bei gegebenen Inputdaten eindeutige Zustandsentwicklungen vorschreibt und keine Wahrscheinlichkeiten als Resultat hat.

Die Anwendung stochastischer Modelle beschränkt sich derzeit ausschließlich auf einige Probeanwendungen im akademischen Rahmen. Obwohl für solche Methoden bereits verschiedene theoretische Ansätze (z.B. in [32]) erarbeitet worden sind, fehlen zur praxisgerechten Umsetzung derzeit noch die softwaretechnischen Grundlagen. Es ist derzeit auf dem Markt noch keine geeignete Softwarelösung verfügbar.

### 8.3.3 Zustandsprognosemodell in Deutschland

In Deutschland wird derzeit ein deterministisches Modell verwendet, welches die Zustandsprognose für alle Merkmale nicht anhand von Zustandsgrößen, sondern ausschließlich anhand von Zustandswerten erlaubt. Das Prognosemodell wurde bei der Entwicklung der PMS-Systemelemente [55] erarbeitet, es wurden dort aber nicht alle Details des Berechnungsablaufs beschrieben. In einer gesonderten Analyse [56] wurden die internen PMS-Abläufe untersucht und dokumentiert. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Ergebnisse dieser Untersuchung.

Aus Umfangsgründen muss darauf verzichtet werden, die Prognosemodelle aller Merkmale einzubeziehen. Die Analyse der Modellergebnisse soll daher exemplarisch an dem in Deutschland und Österreich gleichermaßen vorhandenen Merkmal „Spurrinntiefe“ durchgeführt werden, wobei die hier vorgestellten Verfahren auch auf die anderen Merkmale übertragbar sind.

Die allgemeine Form zur Prognose der Spurrinntiefe gemäß [55] und [56] im deutschen PMS lautet:

$$ZWSPT_{(t)} = 1 + a \cdot t^b \quad (8.37)$$

Mit:  $t$  = Alter der Deckschicht

$\{a, b\}$  = Funktionsparameter

Durch Variation der Parameter  $a$  und  $b$  in der Gleichung (8.37) wurden im Prognosemodell Bezugslinien für vier unterschiedliche **Verhaltensklassen** definiert:

$$ZWSPT_{(t)} = 1 + 0,2051 \cdot t^{0,5850} \quad (\text{Bezugsfunktion für Verhaltensklasse 1}) \quad (8.38)$$

$$ZWSPT_{(t)} = 1 + 0,3520 \cdot t^{0,6320} \quad (\text{Bezugsfunktion für Verhaltensklasse 2}) \quad (8.39)$$

$$ZWSPT_{(t)} = 1 + 0,5246 \cdot t^{0,6660} \quad (\text{Bezugsfunktion für Verhaltensklasse 3}) \quad (8.40)$$

$$ZWSPT_{(t)} = 1 + 0,8394 \cdot t^{0,6781} \quad (\text{Bezugsfunktion für Verhaltensklasse 4}) \quad (8.41)$$

Mit:  $t$  = Alter der Deckschicht

Eine Aufteilung der Prognose in vier Verhaltensklassen ist ein Charakteristikum des deutschen PMS, welches auch für die anderen Zustandsmerkmale gilt. Die Definition der vier Bezugslinien der Verhaltensklassen erfolgte im Rahmen von [55] anhand von statistischen Überlegungen und soll die unterschiedliche Steilheit der Zustandsverschlechterung wiedergeben.

Zur Durchführung der Zustandsprognose eines Merkmals wird jeder einzelne PMS-Abschnitt zunächst einer dieser Verhaltensklassen zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt dadurch, dass anhand des tatsächlichen Alters des PMS-Abschnitts und des darauf zuletzt gemessenen Zustands abgeschätzt wird, zu welcher der Bezugslinien der geringste vertikale Abstand besteht. Diese Vorgehensweise wird in der Abbildung 63 skizziert.

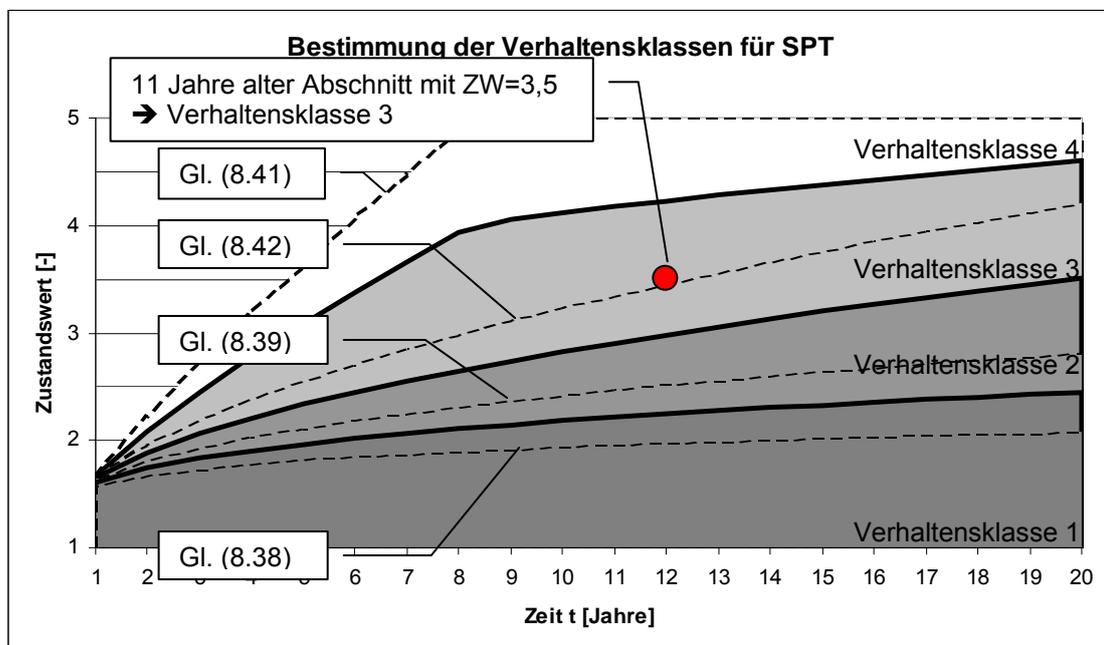


Abbildung 63: Prinzipskizze zur Zuweisung eines Abschnitts zu einer Verhaltensklasse [56]

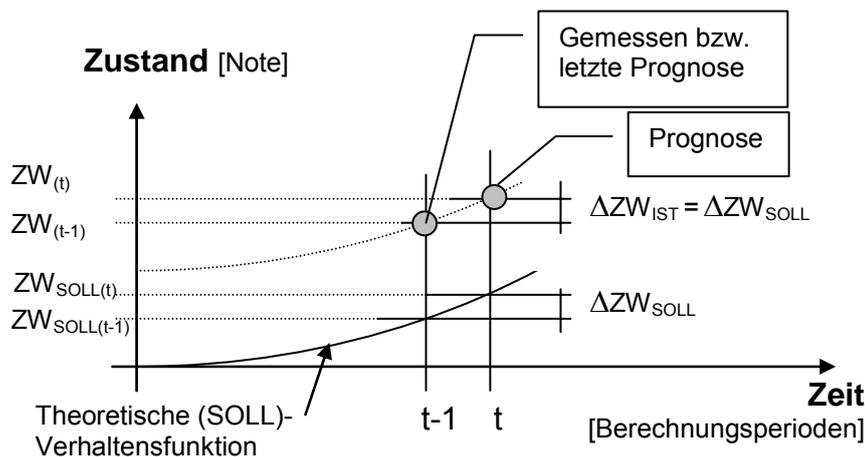
Die einem Abschnitt zugewiesene Verhaltensklasse wird für den gesamten Prognoseverlauf beibehalten und ändert sich nur dann, wenn eine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt wird. Hierdurch wird berücksichtigt, dass die Steilheit der Zustandsverschlechterung durch umfangreiche Maßnahmen, wie z.B. Erneuerungen, anders beeinflusst werden kann als durch Oberflächenmaßnahmen.

Die Anpassung einer Verhaltensfunktion an die unterschiedlichen Randbedingungen einzelner PMS-Abschnitte wird als „**abschnittsbezogene Kalibrierung**“ bezeichnet. Hierzu zählt in Deutschland neben der Verwendung der unterschiedlichen Verhaltensklassen auch die vertikale Verschiebung der Verhaltensfunktion durch das so genannte „**Curve-Shifting-Verfahren**“.

Das Curve-Shifting-Verfahren ermittelt anhand der bekannten Werte der unabhängigen Variablen (in diesem Fall das Deckschichtalter) und der theoretischen Verhaltensfunktion den SOLL-Wert für den Zustandwert im aktuellen Jahr und im Vorjahr und bestimmt die Differenz, d.h. die theoretische Verschlechterung des Zustandswerts  $\Delta ZW_{SOLL}$ . Diese Differenz wird zu dem tatsächlichen (IST-)Zustandswert des Vorjahres (t-1) addiert:

$$ZW_{(t)} = ZW_{(t-1)} + (ZW_{SOLL(t)} - ZW_{SOLL(t-1)})$$

Der Vorjahreswert ist entweder der gemessene Zustandswert aus der ZEB oder ein prognostizierter Wert. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist die Verschiebung der Modell-Verhaltenskurve durch den Ausgangswert. Das Prinzip ist in der Abbildung 64 wiedergegeben.



**Abbildung 64: Prinzipskizze des automatischen Curve-Shifting-Verfahrens [56]**

Durch Anwendung dieses Verhaltensmodells wird derzeit (Stand 2005) in Deutschland die Zustandsprognose im PMS durchgeführt.

### 8.3.4 Zustandsprognosemodell in Österreich

Das hier vorgestellte österreichische Prognosemodell wurde im Rahmen der Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches PMS [5] im Jahr 2000 erarbeitet und dokumentiert. Im Vergleich zum deutschen Prognoseverfahren unterscheidet sich das österreichische in drei wesentlichen Punkten.

- In Österreich wird die Prognose direkt anhand der Zustandsgrößen durchgeführt, und die Ermittlung der Zustandswerte ist ein Rechenschritt, der in jedem Berechnungsjahr gesondert durchgeführt werden muss.
- Es existiert keine Einteilung der Abschnitte in Verhaltensklassen. Zur abschnittsbezogenen Kalibrierung werden zum einen ein merkmals- und abschnittsbezogener Kalibrierfaktor sowie das bereits erwähnte Curve-Shifting-Verfahren angewendet.
- Als Einflussgröße zur Zustandsverschlechterung wird in Österreich nicht nur das Alter des Aufbaus, sondern auch ein Verkehrsbelastungsindex sowie die kumulierten Normlastwechsel verwendet.

Die Gleichung zur Prognose der Spurrinntentiefe im österreichischen PMS gemäß [5] lautet:

$$ZGSPT_{(t)} = K_{SR,j} \cdot \left( Alter_j^{0,999} \cdot VB_j^{-0,0619} \cdot NLW_j^{0,0685} \right) \quad (8.42)$$

Mit:  $K_{SR,j}$  = Kalibrierfaktor für Spurrinnen auf dem Abschnitt j

$Alter_j$  = Alter des Abschnittes j

$VB_j$  = Verkehrsbelastungskoeffizient auf dem Abschnitt j

$NLW_j$  = Kumulierte Normlastwechsel in 100.000 auf dem Abschnitt j

Sowohl das Alter, als auch die kumulierten Normlastwechsel sind zeitlich veränderliche Größen, während der Kalibrierfaktor und der Verkehrsbelastungskoeffizient für einen bestimmten Abschnitt konstant bleiben.

Der Kalibrierfaktor  $K_{SR,j}$  soll die Progression der Zustandsverschlechterung an die abschnittsbezogen unterschiedlichen Randbedingungen des jeweiligen PMS-Abschnitts anpassen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Kalibrierfaktors ist für die einzelnen Zustandsmerkmale unterschiedlich und wurde in [5] ausführlich dokumentiert. Der Wertebereich liegt für Asphaltdecken zwischen 0,2 und 1,2 sowie für Betondecken zwischen 0,12 und 0,74. Zusätzlich zur Verwendung dieses Kalibrierfaktors wird auch in Österreich die Funktion durch automatisches Curve-Shifting (siehe Kapitel 8.3.3) vertikal durch die Ausgangs-Zustandsgröße verschoben.

Die Bestimmung der kumulierten Normlastwechsel orientiert sich an der österreichischen Richtlinie zur Bemessung des Straßenoberbaus RVS 3.63 [63] aus dem Jahr 1998. Die mittlerweile aktualisierte Fassung von 2005 [64] wurde bei der Datenaufbereitung noch nicht umgesetzt. Anhand von gemessenen und über Zuwachsraten fortgeschriebenen Verkehrsbelastungen werden in Abhängigkeit von Straßenquerschnitt, richtungsmäßiger Aufteilung des Schwerverkehrs, Fahrspurvariation, Straßenkategorie und Fahrzeugkategorie so genannte „Äquivalenzwerte“ für einen Bezugs-Achslastübergang (10 t-Einheitsachse) ermittelt und über die Untersuchungsperiode kumuliert.

$$NLW_j = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{A=1}^E \left[ \frac{1}{2} \cdot (JDTLV_{i,A,j} + JDTLV_{i,A+1,j}) \cdot (t_{A+1} - t_A) \right] \cdot \ddot{A}_i \right\} \cdot R_j \cdot V_j \cdot S_j \cdot 365 \quad (8.43)$$

Mit:  $NLW_j$  = Kumulierte Normlastwechsel in 100.000 auf dem Abschnitt j

$JDTLV_{i,A,j}$  = Jährliche, durchschnittliche, tägliche Lastverkehrsstärke der Fahrzeugkategorie i auf dem Abschnitt j zum Zeitpunkt A

$JDTLV_{i,A+1,j}$  = Jährliche, durchschnittliche, tägliche Lastverkehrsstärke der Fahrzeugkategorie i auf dem Abschnitt j zum Zeitpunkt A+1

$t_A$  = Zeitpunkt A der Verkehrszählung

$t_{A+1}$  = Zeitpunkt A+1 der Verkehrszählung

$\ddot{A}_i$  = Mittlerer Äquivalenzwert der jeweiligen Fahrzeugkategorie i (0,70 für LKW ohne Anhänger; 1,20 für LKW mit Anhänger bzw. Sattelzüge; 0,60 für Busse)

$R_j$  = Richtungsfaktor für den Abschnitt j (1,0 für Autobahnen, Schnellstraßen und Einbahnen bei Straßen der Kategorie B; 0,5 für Straßen der Kategorie B)

$V_j$  = Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahrstreifen auf dem Abschnitt j

$S_j$  = Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrstreifens auf dem Abschnitt j (0,80 bei Autobahnen und Schnellstraßen; 0,85 bei Straßen der Kategorie B)

$n$  = Anzahl der berücksichtigten Fahrzeugkategorien (3)

$E$  = Anzahl der Jahre für welche die Belastung kumuliert werden soll

Falls bei der Verkehrszählung keine Unterscheidung zwischen den Fahrzeuggruppen vorgenommen wurde, können die Normlastwechsel auch anhand der Gesamtverkehrsstärke errechnet werden.

$$NLW_j \sum_{A=1}^E \left[ \frac{1}{2} \cdot (JDTLV_{ges,A,j} + JDTLV_{ges,A+1,j}) \cdot (t_{A+1} - t_A) \right] \cdot \ddot{A}_{JDTLV} \cdot R_j \cdot V_j \cdot S_j \cdot 365 \quad (8.44)$$

Mit:  $NLW_j$  = Kumulierte Normlastwechsel in 100.000 auf dem Abschnitt j

$JDTLV_{ges,A,j}$  = Jährliche, durchschnittliche, tägliche Lastverkehrsstärke auf dem Abschnitt j zum Zeitpunkt A

$JDTLV_{ges,A+1,j}$  = Jährliche, durchschnittliche, tägliche Lastverkehrsstärke auf dem Abschnitt j zum Zeitpunkt A+1

$t_A$  = Zeitpunkt A der Verkehrszählung

$t_{A+1}$  = Zeitpunkt A+1 der Verkehrszählung

$\ddot{A}_{JDTLV}$  = Mittlerer Äquivalenzwert des DTLV-Kollektivs (1,00 für Autobahnen und Schnellstraßen sowie 0,90 für sonstige Straßen)

$R_j$  = Richtungsfaktor für den Abschnitt j (1,0 für Autobahnen, Schnellstraßen und Einbahnen bei Straßen der Kategorie B; 0,5 für Straßen der Kategorie B)

$V_j$  = Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahstreifen auf dem Abschnitt j

$S_j$  = Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrestreifens auf dem Abschnitt j (0,80 bei Autobahnen und Schnellstraßen; 0,85 bei Straßen der Kategorie B)

$E$  = Anzahl der Jahre für welche die Belastung kumuliert werden soll

Der Verkehrsbelastungskoeffizient VB wird zur Einteilung des Oberbaus in über-, richtig- und unterdimensionierten Aufbauten verwendet. Er ist definiert als Quotient aus zulässigen und vorhandenen kumulierten Normlastwechseln.

$$VB_j = \frac{NLW_{zul,j}}{NLW_{vorh,j}} \quad (8.45)$$

Mit:  $VB_j$  = Verkehrsbelastungskoeffizient auf dem Abschnitt j

$NLW_{zul,j}$  = Zulässige kumulierte Normlastwechsel in 100.000 auf dem Abschnitt j; Abgeschätzt anhand der Oberbaukonstruktion

$NLW_{vorh,j}$  = Vorhandene kumulierte Normlastwechsel in 100.000 auf dem Abschnitt j; ermittelt gemäß Gl. (8.43)

Im österreichischen PMS wird sowohl die Werteentwicklung der Zustandsgrößen als auch der Zustandswerte ermittelt, wobei die Prognose der Zustandsgrößen nach dem hier vorgestellten Verfahren mit nach oben offenem Wertebereich durchgeführt wird, während die Zustandswerte anhand der im Kapitel 6.2 vorgestellten Verfahren aus den Zustandsgrößen abgeleitet werden.

#### 8.4 Analyse der Prognosemodelle

Sowohl in Deutschland als auch in Österreich werden für den regulären Einsatz von Pavement Management Systemen derzeit ausschließlich deterministische Zustandsprognosemodelle angewendet. Im Kapitel 8.3 wurden die Unterschiede zwischen deterministischen und stochastischen Prognosemodellen vorgestellt. Es ist festzustellen, dass in der Literatur (z.B. in [32]) betont wird, dass für die Anwendung von Pavement-Management-Systemen grundsätzlich stochastische Modelle vorzuziehen wären, die dafür notwendigen Grundlagen, insbesondere die softwaretechnischen Voraussetzungen bisher aber noch nicht ausreichend erarbeitet worden sind.

Es ist zwar im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich, die Grundlagen stochastischer Prognosemodelle vollständig für die Anwendung von PMS zu erarbeiten, es wird aber weiter unten gezeigt, dass durch die hier vorgestellten Analysen wertvolle Aussagen abgeleitet werden können, die eine Unterstützung bei der Schwerpunktsetzung für die zukünftige Weiterentwicklung der Prognosemodelle sein können.

Die Vorteile der stochastischen Modelle bzw. die Schwächen der deterministischen Modelle werden vor allem dann sichtbar, wenn die Ergebnisse der deterministischen Modelle durch statistische und visuelle Verfahren mit realen Daten verglichen werden. Da ein Vergleich der Ergebnisse durch statistische Lage- und Streuungskenngrößen nur bedingt aussagefähig ist, soll nachfolgend eine Analyse auf Basis von Übergangsmatrizen durchgeführt werden. Hierzu ist es notwendig, sowohl für die gemessenen (quasi: realen) Zustandsdaten als auch für die anhand von deterministischen Modellen prognostizierten Zustandsdaten eine Matrix mit relativen Übergangshäufigkeiten aufzustellen.

#### **8.4.1 Ermittlung von Übergangshäufigkeiten aus Zustandserfassungen**

Die später aufgeführten Auswertungen und Darstellungen verwenden als Inputgrößen Matrizen mit Übergangswahrscheinlichkeiten bzw. mit relativen Übergangshäufigkeiten. Im Kapitel 8.2.7 wurde auf den Unterschied zwischen relativen Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten und den Übergang der einen in die anderen eingegangen und es wurde festgestellt, dass der Übergang vom einen zum anderen ein reguläres Element der induktiven Statistik ist. Die Ermittlung relativer Häufigkeiten soll nachfolgend für zwei Beispieldatenkollektive aus Deutschland und Österreich durchgeführt werden.

##### **8.4.1.1 Beispielanwendung Deutschland**

In Deutschland sollen für die nachfolgende Beispielanwendung Zustandsdaten aus dem Land Hessen verwendet werden, die auf den Bundesstraßen in den Jahren 1999 und 2003 im Rahmen der regulären ZEB-Jahresmessungen erfasst worden sind. Zur Erhöhung der Datenqualität wurden die Daten durch visuelle Verfahren gesichtet und abschnittsweise auf Plausibilität kontrolliert. Es wurden hierbei alle Abschnitte ausgeschlossen, bei denen aufgrund des Vergleichs aller Erfassungsmerkmale der eindeutige Verdacht bestand, dass zwischenzeitlich zumindest eine Maßnahme stattgefunden hat. Zusätzlich wurden Lokalisierungsungenauigkeiten durch manuelle Verschiebung ausgeglichen. Diese relativ aufwändige Plausibilitätskontrolle und Plausibilitätssicherung erfolgte im Rahmen eines gesonderten Projektes aus anderem Anlass und gewährleistet eine für Vergleichszwecke wesentlich geeignetere Datenbasis, als die reinen Zustandserfassungsergebnisse. Das Abgleichverfahren ist in [41] dokumentiert worden. Durch die Verschiebung und den Ausschluss einiger Strecken wurde die ursprüngliche Verteilung der Stichprobe verändert. Aus ingenieurtechnischen Überlegungen ist aber die Datenbasis für eine Überprüfung des Prognosemodells als wesentlich geeigneter einzustufen, als die Ursprungsdaten. Nach diesem Bearbeitungsschritt lagen für ca. 2.724,889 km Fahrstreifenlänge Daten zu den Spurrinnen vor.

Auf Basis der plausibilitätsgesicherten Daten der beiden Jahresmessungen wurde für jeden Auswerteabschnitt die Zustandsgröße „Spurrinnentiefe“ ermittelt und in eine Klasse eingeteilt. Die Klassenbreite soll einheitlich gewählt werden und zunächst 2 mm betragen. Aufgrund der identischen Vorgehensweise zur Bestimmung der Zustandsgröße Spurrinnen in Ortsdurchfahrtsbereichen und auf der Freien Strecke ist es legitim, die Werte gemeinsam auszuwerten.

Es muss an dieser Stelle entschieden werden, ob die Häufigkeit der Klassenübergänge in den Auswerteabschnitten aufgrund ihrer Gesamtanzahl oder aufgrund ihrer Gesamtstreckenlänge bestimmt werden sollte. Aus Sicht des Erhaltungsmanagements ist eine gemessene bzw. prognostizierte Größe auf einer längeren Strecke relevanter, als auf einer kurzen Strecke. Die Beurteilung eines Prognoseverfahrens sollte also Rücksicht auf die Streckenlänge nehmen, zu der die Prognosedaten zugeordnet werden.

Da die Abschnittslängen stets in ganzen Metern angegeben werden, kann die Aufgabenstellung der Prognose auch so betrachtet werden, dass versucht wird, zu jedem Streckenmeter eine gesonderte Prognose durchzuführen, wobei zur Vereinfachung mehrere, homogene bzw. geographisch zusammenhängende Strecken zusammengefasst und deren Zustände einheitlich prognostiziert werden. Da das Verfahren zur Zusammenfassung der Abschnitte ein Bestandteil der Prognose ist, erscheint es legitim, die absoluten Übergangshäufigkeiten nach der Streckenlänge der Auswerteabschnitte zu gewichten.

Das Ergebnis wurde in der Tabelle 10 zusammengestellt. Die hervorgehobenen Wertfelder kennzeichnen jene Strecken, bei denen kein Klassenwechsel über die vier Jahre stattgefunden hat.

SPT [mm]		Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in Jahresmessung 1999	0-2	204,229	227,375	21,437	2,334	0,900	0,403	0,001	0,100	-	-	-	-	-
	2-4	63,055	630,768	342,463	54,000	11,315	3,361	0,409	0,351	0,300	-	0,105	-	-
	4-6	6,367	79,124	307,209	188,693	43,885	9,288	2,394	1,112	0,684	0,200	0,200	0,200	-
	6-8	2,073	10,694	41,546	119,143	90,030	24,570	6,174	2,048	0,579	0,332	0,300	0,015	0,100
	8-10	1,104	3,469	7,299	16,706	46,736	35,520	13,747	3,447	1,318	0,672	-	0,100	0,100
	10-12	0,100	1,300	1,500	2,631	7,634	16,954	15,218	6,601	2,218	0,300	-	0,149	0,100
	12-14	-	0,600	0,400	1,187	1,346	2,699	4,931	7,279	2,628	1,100	0,041	-	-
	14-16	0,100	0,419	0,525	0,007	0,841	0,884	1,700	2,382	2,901	1,377	0,423	-	-
	16-18	-	-	0,100	-	0,100	0,300	0,227	0,202	0,400	0,635	0,157	0,044	0,200
	18-20	-	0,200	0,125	-	0,100	0,030	0,100	0,200	0,493	0,448	0,200	0,100	0,100
	20-22	-	0,100	0,100	-	-	-	-	-	0,100	0,100	-	0,200	0,100
	22-24	-	0,100	-	-	-	-	-	-	-	-	0,100	0,100	0,100
	24-26	-	-	0,100	-	-	-	-	-	-	-	-	0,035	-

**Tabelle 10: Tabellarische Darstellung von absoluten Übergangshäufigkeiten in Deutschland 1999→2003 (Spurrinntiefe mit Klassenbreite = 2 mm) – Streckenlänge [km]**

Anhand dieser Zahlen lässt sich durch Gl. (8.46) eine Matrix mit relativen Übergangshäufigkeiten aufstellen. Hierbei muss die Randbedingung aus Gleichung (8.27) berücksichtigt werden, welche besagt, dass die Zeilensummen jeweils 1 ergeben müssen. Das Ergebnis ist in der in Tabelle 11 wiedergegeben.

$$p_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{\sum_{k=1}^{n_i} S_{i,k}} \quad (8.46)$$

Mit:  $p_{i,j}$  = Häufigkeit eines Übergangs von der Klasse  $z_i$  nach  $z_j$

$S_{i,j}$  = Strecke auf denen Übergänge von der Klasse  $z_i$  nach  $z_j$  auftreten

$n_i$  = Anzahl aller möglichen Zielklassen

SPT [mm]		Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in der Jahresmessung 1999	0-2	0,45	0,50	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2-4	0,06	0,57	0,31	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4-6	0,01	0,12	0,48	0,30	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6-8	0,01	0,04	0,14	0,40	0,30	0,08	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8-10	0,01	0,03	0,06	0,13	0,36	0,27	0,11	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
	10-12	0,00	0,02	0,03	0,05	0,14	0,31	0,28	0,12	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00
	12-14	0,00	0,03	0,02	0,05	0,06	0,12	0,22	0,33	0,12	0,05	0,00	0,00	0,00
	14-16	0,01	0,04	0,05	0,00	0,07	0,08	0,15	0,21	0,25	0,12	0,04	0,00	0,00
	16-18	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,13	0,10	0,09	0,17	0,27	0,07	0,02	0,08
	18-20	0,00	0,09	0,06	0,00	0,04	0,01	0,04	0,09	0,22	0,20	0,09	0,04	0,04
	20-22	0,00	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,14	0,00	0,29	0,14
	22-24	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25
	24-26	0,00	0,00	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00

**Tabelle 11: Tabellarische Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten in Deutschland 1999→2003 (Spurrinntiefe mit Klassenbreite = 2 mm) – stochastische Matrix**

Aus der Betrachtung der beiden Tabellen können verschiedene Aussagen abgeleitet werden.

- Zunächst scheint es zu überraschen, dass selbst in einer mit hohem Aufwand plausibilitätsgesicherten Vergleichsdatenbasis ein nicht unerheblicher Anteil der Strecken offenbar eine Verbesserung der *erfassten* Spurrinntiefe erfährt. Dies sind sämtliche Abschnitte unterhalb der hervorgehobenen Diagonalen (2.672 von 27.912 Auswerteabschnitten). Bei der gewählten Klassenbreite von 2 mm sind somit etwa 10 % aller Abschnitte betroffen. Bei einer kleineren Klassenbreite kann festgestellt werden, dass auch ein Großteil der sich derzeit in der hervorgehobenen Diagonalen befindenden Strecken, d.h. der Strecken ohne Klassenwechsel, eine Verbesserung der gemessenen Zustandsgröße erfahren. Eine direkte Analyse ergibt eine solche Verbesserung bei immerhin 24 % aller Auswerteabschnitte. Ähnliche Zahlen lassen sich auch für andere Zustandsmerkmale ermitteln. Dieser Sachverhalt hat eine besondere Bedeutung für die hier besprochenen Modelle und Analyseverfahren und soll im Kapitel 8.4.6 gesondert diskutiert werden.
- Weiterhin lassen sich verschiedene Aussagen über die Brauchbarkeit der Darstellungsform treffen. Die Darstellung der absoluten Übergangshäufigkeiten in Tabelle 10 ist zwar exakt, die Aussagekraft der einzelnen Werte hängt aber wesentlich vom Umfang der Gesamtstichprobe ab. Die Abbildung der relativen Übergangswahrscheinlichkeiten in Tabelle 11 ist zwar mathematisch korrekt, führt aber aufgrund der Nichtberücksichtigung der Repräsentativität einzelner Übergangshäufigkeiten zu einer verzerrten Wahrnehmung. Beispielsweise kann abgelesen werden, dass 74 % aller Strecken in der Klasse 24 mm – 26 mm nach vier Jahren in die Klasse 4 mm – 6 mm übergehen. Dieser relativ hohe

Wert beruht auf einer einzigen Messung in einem einzigen Auswerteabschnitt mit 0,1 km Streckenlänge, die wahrscheinlich fehlerhaft war. Die weiter unten zu entwickelnde Darstellung der relativen Häufigkeiten sollte daher Rücksicht auf den Umfang der Ausgangsklasse nehmen können.

- Die gewählte Klassenbreite ist verhältnismäßig grob, da ein Großteil der Daten (ca. 49 %) keine Veränderung der Klassen aufweist. Die tatsächlichen Änderungen finden somit offenbar im kleineren Maßstab statt. Eine feinere Klasseneinteilung (z.B. mit einer Breite von 0,1 mm) würde eventuell zu deutlicheren Aussagen führen, eine tabellarische Darstellung wäre aber sehr unübersichtlich. Bei einer Verkleinerung der Klassenbreite ist zudem zu berücksichtigen, dass die mess- und auswertetechnischen Fehler die tatsächlichen Zustandsdifferenzen überlagern können und somit quantitative Abhängigkeiten nicht zuverlässig abgeleitet werden dürfen. Eine Interpretation der Tendenz sollte aber dennoch möglich sein.

Bevor eine geeignetere Darstellung untersucht werden soll, soll zunächst eine entsprechende Übergangsmatrix auch für österreichische Beispieldaten aufgestellt werden.

#### 8.4.1.2 Beispielanwendung Österreich

In Österreich sollen für die Beispielanwendung die Daten der beiden messtechnischen Erfassungen auf Bundesstraßen der Kategorien A und S verwendet werden. Die Erste Erfassung fand in den Jahren 1999 und 2000 statt, während die zweite Erfassung einige Jahre später im Jahr 2004 durchgeführt worden ist.

In der Tabelle 12 ist ein anonymisierter Auszug aus der Datenbank VIAPMS-AUSTRIA wiedergegeben.

ElementID	Laenge	Bauweise	Jahr_Decke	Material_Deckschicht	ZG Spurrinnen 1	Erfassungsjahr 1	ZG Spurrinnen2	Erfassungsjahr 2	Prognose 2004
A	0,720	Asphalt	1989	SMA	4,5	1999	9,4	2004	6,9
B	0,524	Beton	1983	DD-H	4,5	1999	9,3	2004	6,1
C	0,225	Beton	1983	DD-H	4,5	1999	9,3	2004	6,1
D	0,054	Beton	1983	DD-H	11,8	1999	9,3	2004	15,9
E	0,561	Asphalt	1973	AB	10,4	2000	10,5	2004	12,3
F	2,400	Asphalt	1973	AB	8,8	2000	10,5	2004	10,4
G	0,473	Asphalt	1973	AB	10,0	2000	10,5	2004	11,8
H	1,293	Asphalt	1973	AB	10,0	2000	9,3	2004	11,8
I	0,498	Asphalt	1973	AB	10,0	2000	9,3	2004	11,8
J	0,548	Asphalt	1973	AB	10,0	2000	9,3	2004	11,8
K	0,653	Asphalt	1973	AB	10,0	2000	11,6	2004	11,8

**Tabelle 12: Auszug aus VIAPMS-AUSTRIA mit gemessenen und prognostizierten Spurrinntiefen in Österreich**

Anhand dieses Auszuges können einige wichtige Eigenschaften der Daten vorgestellt werden. Es fällt auf, dass die Datensätze mit den Spurrinnendaten zu Strecken zugeordnet wurden, die eine sehr unterschiedliche Länge aufweisen. Dies resultiert daraus, dass die Zustandsdaten bereits den anhand von Homgenitätskriterien (siehe [5]) zusammengestellten PMS-Abschnitten zugeordnet worden sind. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass sich einzelne Spurrinnen-Zustandsgrößen über mehrere Datensätze wiederholen. Dies gilt sowohl für die Daten der Ersterfassung als auch für die Daten der Zweiterfassung, wobei die Grenzen der Wiederholung nicht deckungsgleich sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den beiden Erfassungen, die Abschnittsgrenzen separat festgelegt wurden und somit unterschiedlich sein können.

Da die Prognose auf die Daten der Ersterfassung zurückgreift, wiederholen sich auch hier die Resultate über mehrere Abschnitte (siehe ZGSPT=10,0 in Erfassung 1 und ZGSPT= 9,3 in der Erfassung 2). Es kann aber aufgrund von unterschiedlichen, zugrunde liegenden Deckschichtarten, Verkehrsbelastungskoeffizienten und Kalibrierfaktoren auch zu abweichenden Prognosen kommen (siehe ZGSPT= 4,5 in Erfassung 1 und ZG=6,1 bzw. ZG=6,9 in der Prognose – je nach Deckschichtart).

Anders als bei den Beispieldaten aus Deutschland konnte im Vorfeld der Analyse keine aufwändige Datenbereinigung auf Rohdatenbasis durchgeführt werden. Es liegt somit eine auswertbare Strecke von 1.988,274 km zur Untersuchung vor, in der aber auch alle Abschnitte enthalten sind, bei denen möglicherweise zwischenzeitlich eine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt worden ist.

Im ersten Bearbeitungsschritt sollen auch hier die absoluten Übergangshäufigkeiten zwischen unterschiedlichen Spurrinnenklassen bestimmt werden. Wie auch bei der vorhergehenden Analyse der deutschen Beispieldaten soll anhand der Messweglänge gewichtet werden. Das Ergebnis ist in der nachfolgenden Tabelle 13 zusammengestellt worden.

SPT [mm]		Klassenbelegung in Erfassung 2004												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in Erfassung 1999/2000	0-2	-	-	-	-	0,024	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	1,196	120,697	43,039	15,609	12,189	2,156	0,075	0,051	0,139	-	-	-	-
	4-6	0,399	239,227	393,855	210,636	83,051	24,074	6,844	4,028	0,558	0,327	-	0,095	-
	6-8	-	8,660	56,606	83,181	61,516	17,380	11,305	0,756	0,026	0,250	-	-	-
	8-10	-	3,554	30,388	87,605	131,198	77,304	25,442	17,164	2,558	0,675	0,078	1,042	-
	10-12	-	3,171	16,295	12,169	20,470	27,002	13,517	9,642	4,258	2,815	1,123	0,649	-
	12-14	-	0,455	6,319	6,165	4,197	2,908	4,895	3,219	2,576	0,720	0,147	-	-
	14-16	-	0,497	7,746	5,690	3,070	6,030	8,885	5,251	4,323	2,358	0,100	0,647	-
	16-18	-	0,001	2,281	4,316	2,256	0,866	1,970	0,237	1,102	0,150	-	-	-
	18-20	-	-	0,996	1,552	0,102	0,288	0,174	0,753	0,674	0,267	-	0,584	-
	20-22	-	-	-	0,225	1,990	-	0,801	0,074	1,346	0,333	0,741	0,130	-
	22-24	-	-	0,263	0,218	-	0,327	0,125	-	-	-	-	-	-
	24-26	-	-	-	-	-	-	0,198	-	-	0,142	-	-	-

**Tabelle 13: Tabellarische Darstellung von absoluten Übergangshäufigkeiten in Österreich '99/'00→'04 (Spurrinntiefe mit Klassenbreite = 2 mm) – Streckenlängen [km]**

Zur Ermittlung der stochastischen Matrix kann die Gleichung (8.46) verwendet werden. Das Ergebnis ist in der Tabelle 14 abgebildet.

SPT [mm]		Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in der Jahresmessung 1999	0-2	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2-4	0,01	0,62	0,22	0,08	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4-6	0,00	0,25	0,41	0,22	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6-8	0,00	0,04	0,24	0,35	0,26	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8-10	0,00	0,01	0,08	0,23	0,35	0,21	0,07	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	10-12	0,00	0,03	0,15	0,11	0,18	0,24	0,12	0,09	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00
	12-14	0,00	0,01	0,20	0,20	0,13	0,09	0,15	0,10	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00
	14-16	0,00	0,01	0,17	0,13	0,07	0,14	0,20	0,12	0,10	0,05	0,00	0,01	0,00
	16-18	0,00	0,00	0,17	0,33	0,17	0,07	0,15	0,02	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00
	18-20	0,00	0,00	0,18	0,29	0,02	0,05	0,03	0,14	0,13	0,05	0,00	0,11	0,00
	20-22	0,00	0,00	0,00	0,04	0,35	0,00	0,14	0,01	0,24	0,06	0,13	0,02	0,00
	22-24	0,00	0,00	0,28	0,23	0,00	0,35	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	24-26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00

**Tabelle 14: Tabellarische Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten in Österreich '99/'00→'04 (Spurrinntiefe mit Klassenbreite = 2 mm) – stochastische Matrix**

Für diese Beispieldaten soll zunächst eine geeignete Visualisierungstechnik gefunden werden. In den späteren Kapitel 8.4.3 und 8.4.5 werden diese Daten fachlich ausgewertet.

### 8.4.2 Geeignete Visualisierung der Übergangsmatrizen

Nachfolgend soll eine Darstellungsform gefunden werden, welche die Sachverhalte geeignet abbilden kann und einen universellen Vergleich der Übergangsmatrizen erlaubt. Um einen Vergleich der Übergangshäufigkeiten auch bei unterschiedlichen Net-

zen zu ermöglichen, dürfen keine absoluten, sondern es müssen relative Übergangshäufigkeiten dargestellt werden. Die Repräsentativität der einzelnen Ausgangsklassen kann dadurch berücksichtigt werden, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten anhand der Belegung der Ausgangsklassen gewichtet werden. Es wird eine neue Matrix  $\mathbf{Q}$  mit den Einzelwerten  $q_{i,j}$  gebildet.

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \dots & q_{1,n} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & \dots & q_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n,1} & q_{n,2} & \dots & q_{n,n} \end{pmatrix}, \text{ wobei: } q_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{\sum_{j=1}^n S_{i,j}} \quad (8.47)$$

Mit:  $\mathbf{Q}$  = Matrix relativer Häufigkeiten

$q_{i,j}$  = Relative Häufigkeit eines Klassenwechsels aus der Klasse  $z_i$  in die Klasse  $z_j$  bezogen auf alle vorhandenen Klassenwechsel aus allen Klassen  $z_i = z_1 \dots z_n$  zu allen Klassen  $z_j = z_1 \dots z_n$

$p_{i,j}$  = Relative Häufigkeit eines Klassenwechsels aus der Klasse  $z_i$  in die Klasse  $z_j$  bezogen auf alle Werte der Ausgangsklasse  $z_i$  und allen Zielklassen  $z_j = z_1 \dots z_n$

$S_{i,j}$  = Gesamtstrecke mit Klassenwechsel aus Klasse  $z_i$  zur Klasse  $z_j$

Hierdurch wird die Bedingung stochastischer Matrizen verletzt, dass die Zeilensummen jeweils den Wert 1 erhalten müssen, siehe Gleichung (8.27). Die Matrix  $\mathbf{Q}$  ist somit keine stochastische Matrix. Es kann eine neue Bedingung formuliert werden, dass die Summe aller Übergangswahrscheinlichkeiten der Matrix den Wert 1 erhalten muss.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{i,j} = 1 \quad (8.48)$$

Das Resultat dieser Transformation kann weiterhin als Matrix mit relativen Übergangshäufigkeiten bezeichnet werden, wobei die Relativität sich nicht mehr zeilenweise auf die jeweiligen Ausgangsklassen sondern auf die Gesamtdatenmenge bezieht. Die Werte einer solchen Matrix können auch verhältnismäßig einfach, direkt aus den absoluten Häufigkeiten ermittelt werden, da dort nur die absolute Strecke, auf der ein Klassenwechsel vorkommt, durch die Gesamtstrecke aller Klassenwechsel dividiert werden muss.

$$q_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{i,j}} \quad (8.49)$$

Für die im Kapitel 8.4.1.1 dargestellte Klasseneinteilung der Beispieldaten aus Deutschland aufgrund einer Klassenbreite von 2 mm würden sich somit die relativen Übergangshäufigkeiten aus Tabelle 15 ergeben.

SPT [mm]	Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003												
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung bei Jahresmess. 1999	0-2	0,075	0,083	0,008	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2-4	0,023	0,231	0,126	0,020	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	4-6	0,002	0,029	0,113	0,069	0,016	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	6-8	0,001	0,004	0,015	0,044	0,033	0,009	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
	8-10	0,000	0,001	0,003	0,006	0,017	0,013	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
	10-12	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,006	0,006	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
	12-14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
	14-16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
	16-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	18-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	20-22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	22-24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	24-26	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabelle 15: Tabellarische Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten (Deutsche Beispieldaten) bezogen auf die Gesamtzahl aller Übergänge**

Die entsprechende Darstellung für die Daten aus Österreich ist in der Tabelle 16 aufgeführt.

SPT [mm]	Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003												
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung bei Jahresmess. 1999	0-2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2-4	0,001	0,061	0,022	0,008	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	4-6	0,000	0,120	0,198	0,106	0,042	0,012	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
	6-8	0,000	0,004	0,028	0,042	0,031	0,009	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	8-10	0,000	0,002	0,015	0,044	0,066	0,039	0,013	0,009	0,001	0,000	0,000	0,001
	10-12	0,000	0,002	0,008	0,006	0,010	0,014	0,007	0,005	0,002	0,001	0,001	0,000
	12-14	0,000	0,000	0,003	0,003	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
	14-16	0,000	0,000	0,004	0,003	0,002	0,003	0,004	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000
	16-18	0,000	0,000	0,001	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
	18-20	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	20-22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
	22-24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	24-26	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabelle 16: Tabellarische Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten (Österreichische Beispieldaten) bezogen auf die Gesamtzahl aller Übergänge**

Um solche Matrizen auch für kleinere Klassenbreiten übersichtlich darstellen zu können, ist es sinnvoll, aus den Tabellen graphische Darstellungen zu generieren. Eine mögliche Darstellungsform wäre eine dreidimensionale Abbildung der Übergangshäufigkeiten. Hierbei würde die Matrix eine Ebene darstellen, auf der die relativen Häufigkeiten die Höhe markieren würden. Je häufiger ein Klassenwechsel vergleichsweise stattfinden, desto höher die jeweilige Übergangshäufigkeit und desto höher auch die Topologie im 3D-Übergangsdigramm. Nachfolgend wurden für die deutschen und

österreichischen Beispieldaten drei solche Darstellungen für unterschiedliche Klassenbreiten 2 mm (Abbildung 65), 1 mm (Abbildung 66) und für 0,5 mm (Abbildung 67) erstellt.

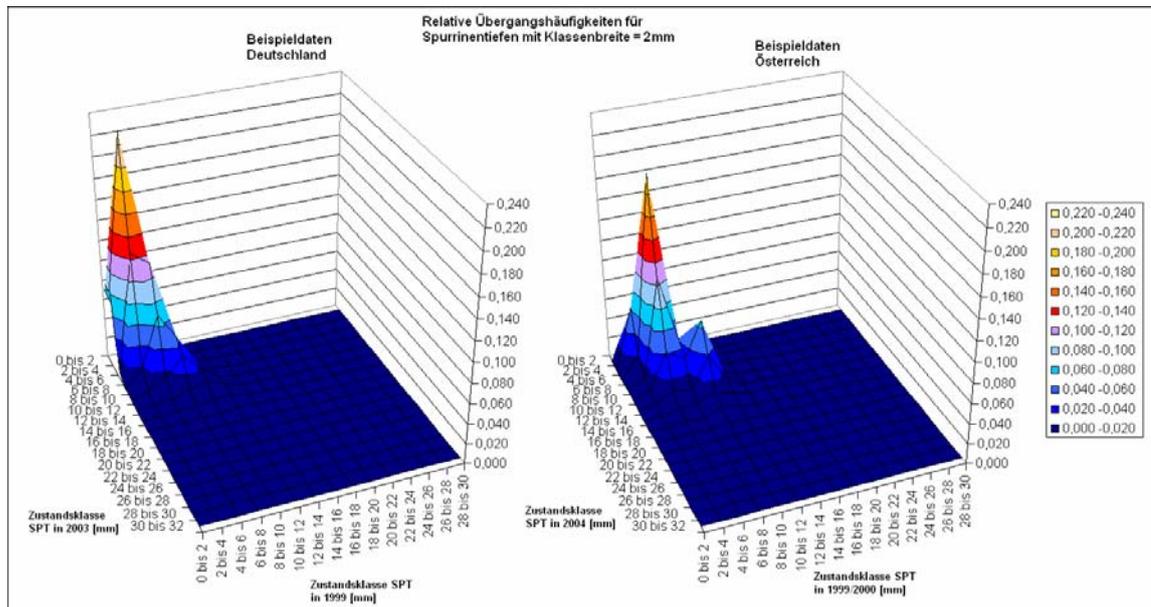


Abbildung 65: Dreidimensionale Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten der Spurrinntiefe für eine Klassenbreite von 2 mm (Beispieldaten Deutschland und Österreich)

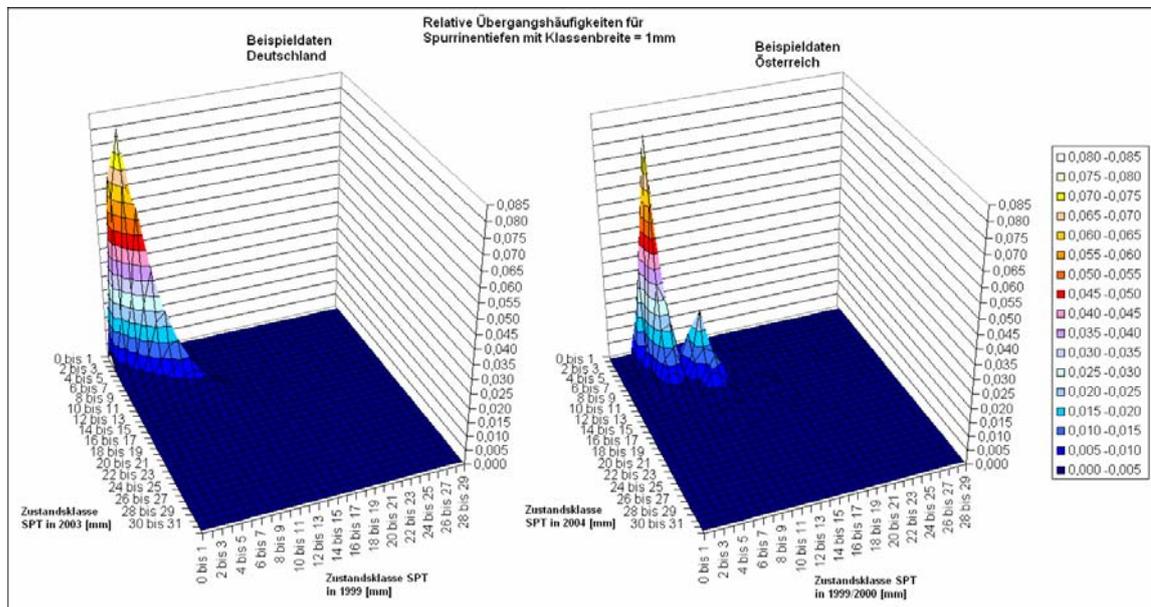
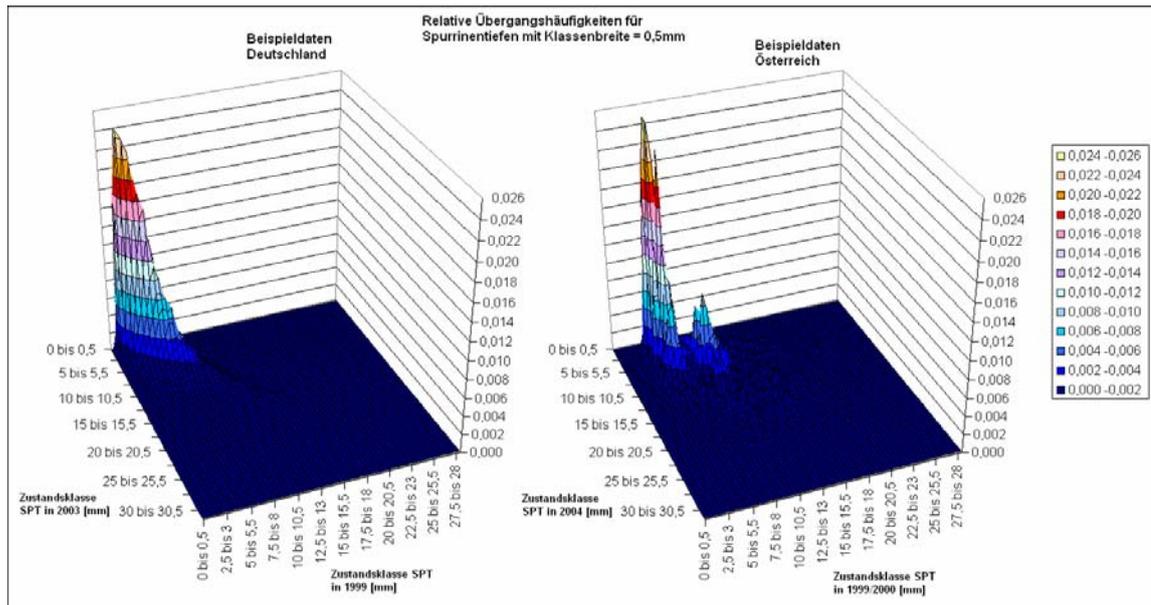


Abbildung 66: Dreidimensionale Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten der Spurrinntiefe für eine Klassenbreite von 1 mm (Beispieldaten Deutschland und Österreich)



**Abbildung 67: Dreidimensionale Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten der Spurrintiefe für eine Klassenbreite von 0,5 mm (Beispieldaten Deutschland und Österreich)**

Eine noch feinere Darstellung mit einer Klassenbreite von 0,1 mm sollte, da die Häufigkeitsausprägungen sehr unterschiedlich sind, für Österreich und für Deutschland auf getrennten Diagrammen mit getrennten Skalen abgebildet werden. Die unterschiedliche Häufigkeitsausprägung resultiert daraus, dass in Österreich die Spurrintiefen nicht für Abschnitte von 100 m sondern für längere PMS-Abschnitte vorliegen und somit bestimmte Klassenübergänge auf längeren Strecken in die Datenbank eingetragen worden sind. Diese Strecken führen zu einer Konzentration von bestimmten Klassenübergängen, die zu verhältnismäßig hohen Übergangshäufigkeiten führen können, obwohl sie auf nur wenigen PMS-Abschnitten vorkommen. Die jeweiligen Spitzen entsprechen somit einzelnen, längeren Strecken, denen die gleichen Spurrintiefen zugewiesen wurden, wobei die Höhe im Diagramm mit der Gesamt-Abschnittslänge korrespondiert. Eine derart feine Klasseneinteilung (0,1 mm) ist für diese Daten somit nur bedingt aussagefähig. Die Diagramme sind in der Abbildung 68 für Deutschland und in der Abbildung 69 für Österreich abgebildet.

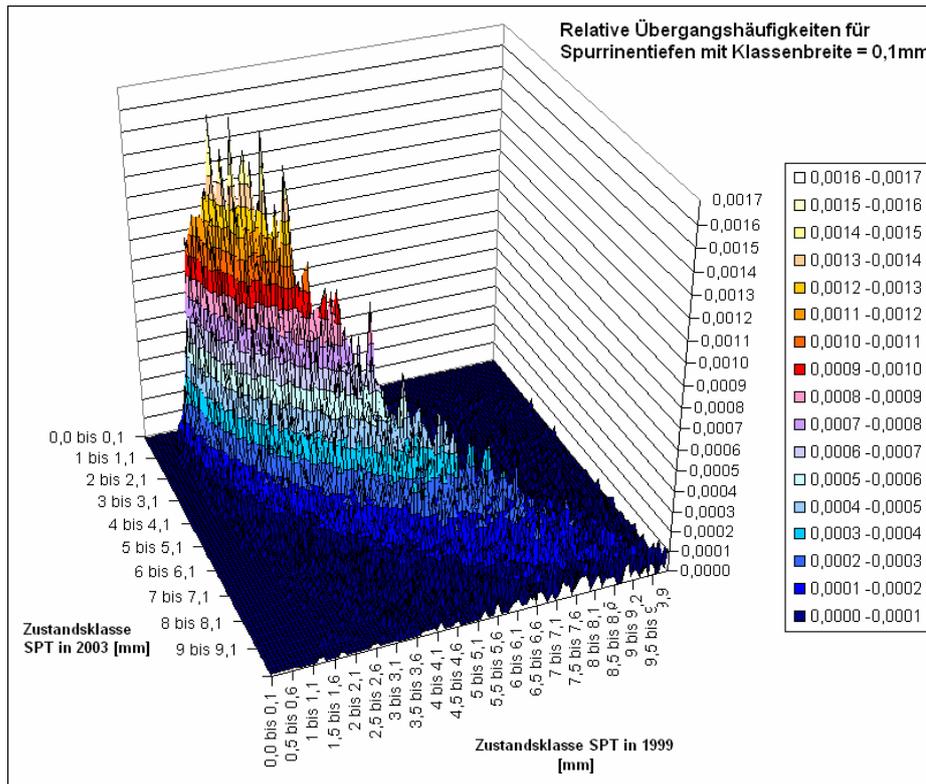


Abbildung 68: Dreidimensionale Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten der Spurrintiefe für eine Klassenbreite von 0,1 mm (Beispieldaten Deutschland)

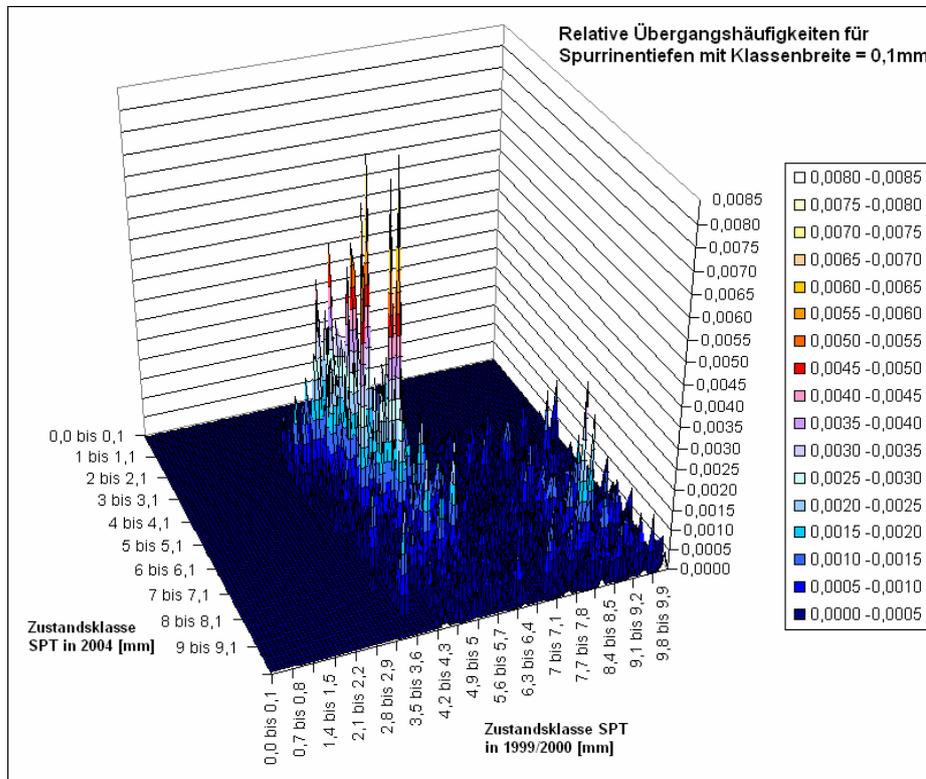


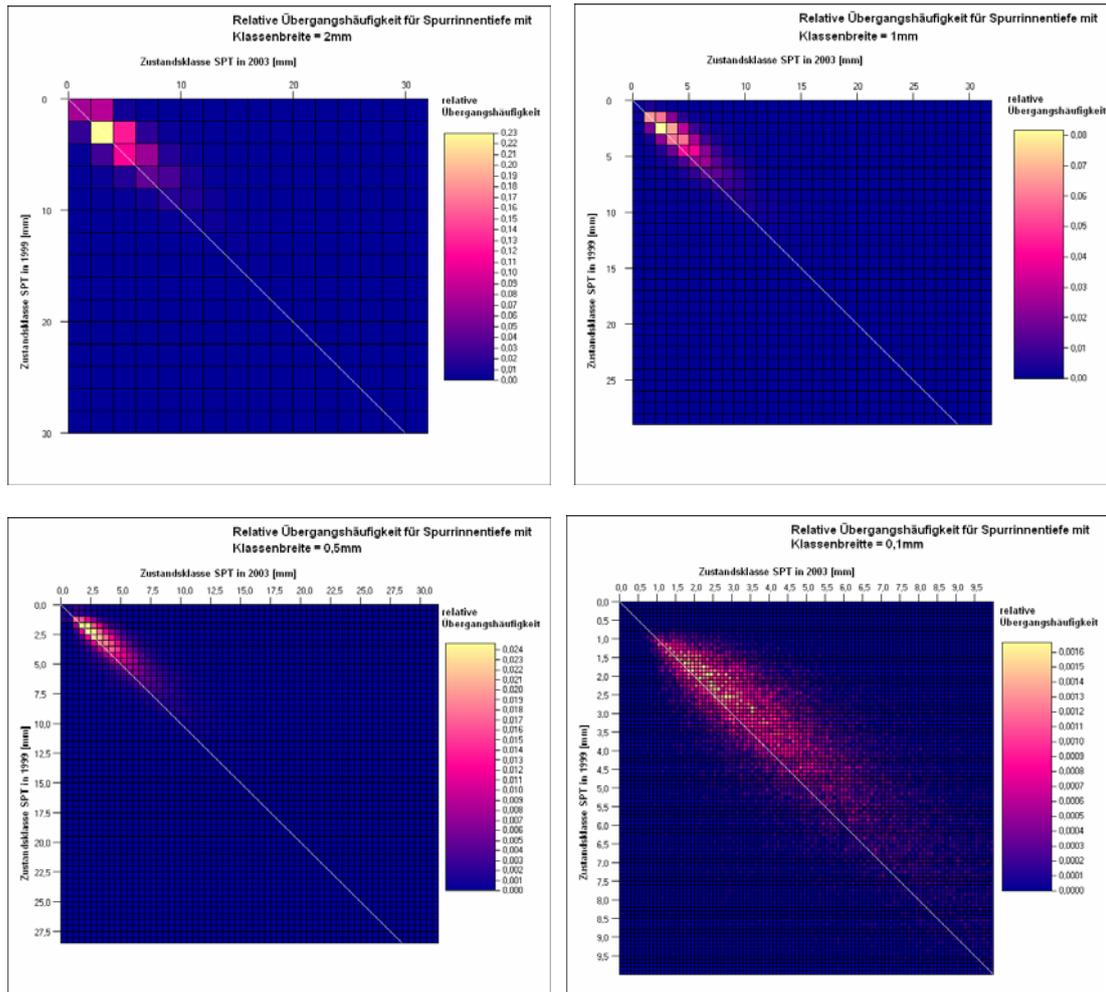
Abbildung 69: Dreidimensionale Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten der Spurrintiefe für eine Klassenbreite von 0,1 mm (Beispieldaten Österreich)

Bereits bei den Darstellungen mit geringer Auflösung wird deutlich, dass für die österreichischen Beispieldaten zwei Klassenübergangs-Schwerpunkte ausgemacht werden können. Diese ungewöhnliche Verteilung soll weiter unten im Kapitel 8.4.7 ausführlicher diskutiert werden. Nachfolgend soll zunächst noch eine verbesserte Möglichkeit gesucht werden, die Daten visuell untersuchen zu können.

Dreidimensionale Abbildungen sind für komplexe Sachverhalte beliebte Darstellungsformen und durchaus dafür geeignet, Tendenzen oder Unplausibilitäten in den Werten zu erkennen. Aus den obigen Abbildungen wird beispielsweise schnell deutlich, dass sich die häufigsten Übergänge in der Nähe der Diagonalen befinden, die für die beiden Vergleichsjahre die gleichen Klassen markieren, d.h. die eine Beibehaltung der Klasse bedeuten. Eine weitere Aussage, die sich für die deutschen Beispieldaten weniger aus dem Diagramm, aber mehr aus den Zahlen (siehe oben) ablesen lässt, ist, dass die größten Höhen oberhalb der Diagonalen liegen, d.h. dass wie erwartet eher eine Zustandsverschlechterung stattfindet.

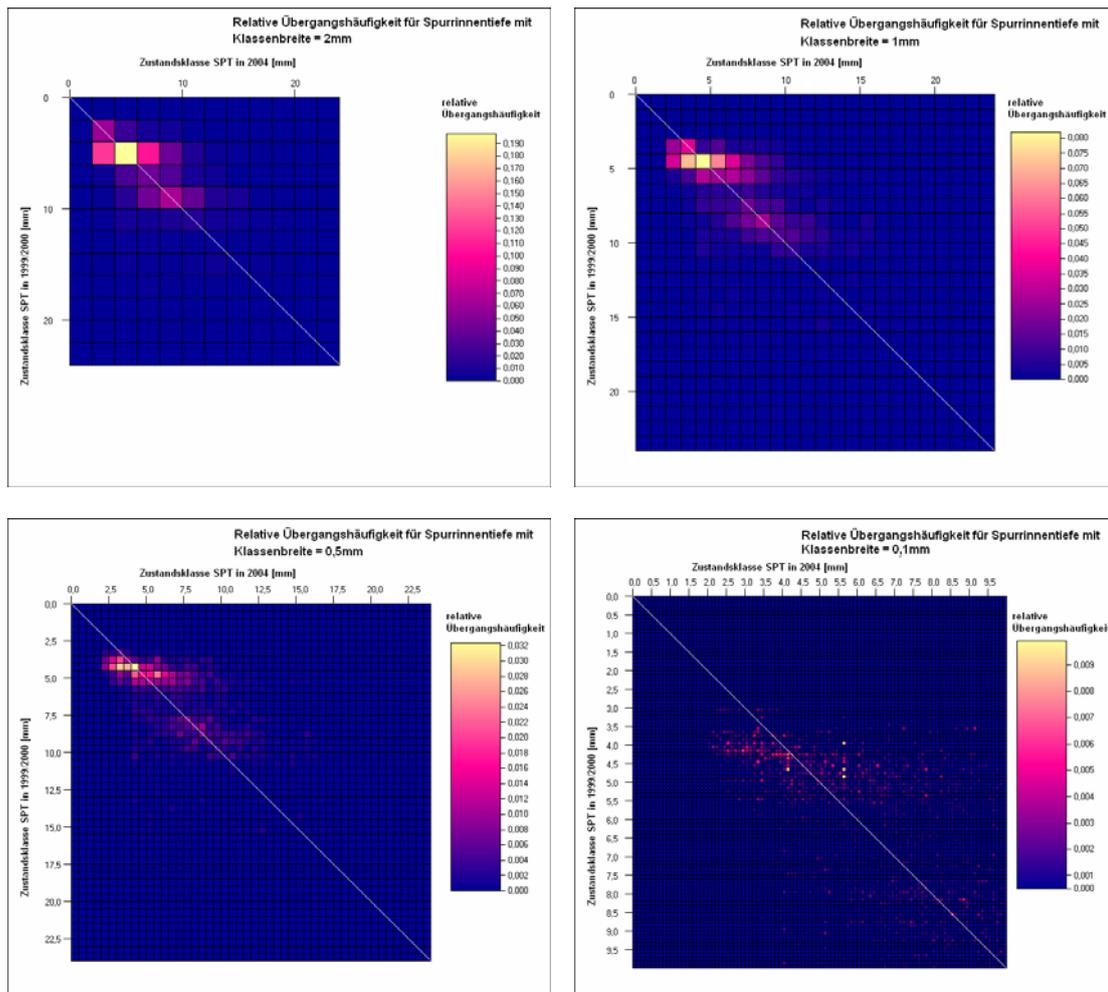
Diese dreidimensionale Darstellung vermittelt einen plastischen Eindruck der Übergangshäufigkeiten, hat aber auch verschiedene Nachteile. Die Einzelwerte sind ohne Hilfsmittel nicht präzise abzulesen, interessante Werte im hinteren Bereich der Abbildung können überdeckt werden und es muss beachtet werden, dass durch die Projektion auf ein zweidimensionales Medium, d.h. durch die Reduktion um eine Dimension, Uneindeutigkeiten in eine Abbildung eingefügt werden, welche die Interpretation einer Darstellung erschweren.

Eine geeigneterere, wenn auch weniger plastische Darstellung ist durch das Drehen der Abbildung zu erreichen, so dass eine direkte Betrachtung von unten auf die Matrix erfolgt. In der Abbildung 70 sind die relativen Häufigkeiten der deutschen Beispieldaten für die Klassenbreiten 2 mm, 1 mm, 0,5 mm und 0,1 mm durch stetige Farbverläufe wiedergegeben. Die eingezeichnete Diagonale kennzeichnet die Fälle, bei denen kein Klassenübergang stattfindet. Die darunterliegenden Bereiche bedeuten eine Zustandsverbesserung, die darüber liegenden Bereiche bedeuten eine Zustandsverschlechterung.



**Abbildung 70: Vorschlag einer alternativen Darstellung von relativen Übergangshäufigkeiten (hier: Spurrinnentiefe auf Bundesstraßen; Beispieldaten Deutschland) – unterschiedliche Skalen**

Da die relative Häufigkeit in den Diagrammen mit grober Klasseneinteilung höhere Werte annimmt, als in den Diagrammen mit feinerer Klasseneinteilung, wurden in den einzelnen Grafiken unterschiedliche Skalen verwendet. Die gleiche Farbe kann somit unterschiedlichen Häufigkeitsausprägungen entsprechen. In den nachfolgenden Ausführungen wird diese Darstellungsform beibehalten. Zur Vervollständigung werden in der Abbildung 71 die entsprechenden Darstellungen auch für die österreichischen Daten aufgeführt.



**Abbildung 71: Alternative Darstellung der relativen Übergangshäufigkeiten für die österreichischen Beispieldaten – unterschiedliche Skalen**

Auch bei dieser Darstellungsform zeigt sich, dass für die österreichischen Daten die feinste Auflösungsstufe mit einer Klassenbreite von 0,1 mm aufgrund der Konzentration bestimmter Spurrinnen-Messwerte auf längeren Strecken nur bedingt aussagefähig ist. Zudem werden auch hier die beiden Peaks sichtbar, die in Kapitel 8.4.7 vertieft behandelt werden sollen.

Die visuelle Analyse von Prognosemodellen mithilfe dieser Darstellungsverfahren wird im Kapitel 8.4.5 vorgestellt.

### 8.4.3 Ermittlung von Übergangshäufigkeiten aus Prognosemodellen

Durch die vorangegangenen Überlegungen wurden anhand von real gemessenen Vergleichsdaten Matrizen mit Übergangshäufigkeiten aufgestellt. Da ein deterministisches Prognosemodell immer als ein Sonderfall eines stochastischen Modells betrachtet werden kann (jeweils 100 % bzw. 0 % Übergangswahrscheinlichkeit zwischen den Werten bzw. Klassen), kann auch für dieses Modell, unter Annahme einer Ausgangsverteilung, eine Übergangshäufigkeits-Matrix aufgestellt werden.

Um einen geeigneten Vergleich zwischen den Prognosemodellen und den realen Daten erhalten zu können, bietet es sich an, bei den beiden verwendeten Datenkollektiven jeweils die Ausgangsdaten der ersten Erfassung als Input für die Prognosemodelle zu verwenden. Diese sind für Deutschland und Österreich unterschiedlich.

#### 8.4.3.1 Beispielanwendung Deutschland

In Deutschland sind die Ausgangsdaten für die Zustandsprognose die Spurrinntiefen auf den Bundesstraßen in Hessen, welche in der Jahresmessung 1999 erfasst worden sind. Da das Prognosemodell nur aufgrund von Zustandswerten angewendet werden kann, muss die Prognoserechnung in drei Schritte aufgeteilt werden.

- Ermittlung der Zustandswerte aus den Zustandsgrößen des Jahres 1999
- Durchführung einer Vier-Jahres-Prognose auf Basis der Zustandswerte; das Ergebnis sind Zustandswerte für das Jahr 2003.
- Ermittlung von Zustandsgrößen für das Jahr 2003 aus den prognostizierten Zustandswerten

Der dritte Schritt ergibt aufgrund der Unstetigkeiten in der Normierungsfunktion Zustandsgrößen von begrenztem Aussagewert. Bei einer strikten Deutung des zugrunde liegenden Skalenniveaus ist dieser Schritt nicht sinnvoll. Dies wird weiter unten diskutiert.

Durch die Anwendung der Prognosemodelle auf die jeweiligen Inputdaten entsteht eine Folge von Wertepaaren mit den Spurrinntiefen-Zustandsgrößen des Jahres 1999 und des Jahres 2003. Wenn diese Werte zur Ermittlung der Übergangshäufigkeiten in Zustandsklassen mit fester Klassenbreite eingeteilt werden, entsteht für Deutschland die Matrix aus Tabelle 17.

SPT [mm]		Klassenbelegung in der Prognose für 2003												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in der Jahressm. 1999	0-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4-6	-	-	503,682	108,739	4,749	0,700	-	-	-	-	-	-	-
	6-8	-	-	-	209,344	75,305	1,837	2,709	2,400	0,589	-	-	-	-
	8-10	-	-	-	-	75,051	28,367	12,340	5,061	2,342	2,474	-	-	-
	10-12	-	-	-	-	-	0,400	28,328	8,399	10,051	0,111	-	-	-
	12-14	-	-	-	-	-	-	-	10,365	4,295	4,168	-	-	-
	14-16	-	-	-	-	-	-	-	-	3,948	3,172	-	-	-
	16-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,035	-	-	-
	18-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 17: Prognostizierte absolute Häufigkeit von Klassenübergängen (Beispieldaten Deutschland 1999→2003; Streckenlänge in km)**

Aus der Tabelle wird ein weiterer Aspekt des bisher in Deutschland verwendeten Prognosemodells deutlich. Durch die Normierungsfunktion wird der Wertebereich für Zustandsgrößen <4 mm bzw. >20 mm im Zustandswertebereich gleichermaßen mit 1,0 bzw. 5,0 bewertet. Eine Unterscheidung, d.h. eine Rücküberführung eines Zustandswerts aus dem Jahr 2003 außerhalb des Bereichs 1,5...4,5 zurück zur Zustandsgröße ist nicht eindeutig möglich. Diese Werte mussten von der Auswertung ausgeschlossen werden, so dass in diesem Bereich keine Übergänge gezählt werden können. Es zeigt sich zudem, dass alle Auswerteabschnitte, welche bei der Prognose für 2003 zu Zustandswerten außerhalb des bestimmaren Bereichs führten, bereits im Jahr 1999 außerhalb des Bereichs 4 mm...20 mm liegen, was dadurch erklärt werden kann, dass das Prognoseverfahren keinen Übergang vom Zustandswert 1,0 nach 1,5 in 4 Jahren zulässt.

#### 8.4.3.2 Beispielanwendung Österreich

Für die Beispielanwendung in Österreich können die Daten der Zustandserfassung 1999/2000 auf den Bundesstraßen der Kategorien A und S als Ausgangsdaten zur Prognose verwendet werden. Die Prognose für das Jahr 2004 wurde durch das ISTU für jeden einzelnen PMS-Abschnitt gemäß dem in Kapitel 8.3.4 beschriebenen Verfahren, unter Berücksichtigung der abschnittsbezogenen unterschiedlichen Normlastwechsel, Kalibrierfaktoren, Deckschichtalter und Messjahre durchgeführt und die Prognoseergebnisse wurden für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt.

Im Gegensatz zu dem deutschen Prognosemodell wird in Österreich nicht auf die Zustandswerte, sondern direkt auf die Zustandsgrößen zurückgegriffen, so dass keine zusätzliche Transformation stattfinden muss. Aufgrund der Überlegungen aus Kapitel 8.4.1.2 soll auch hier bei der Aufstellung der absoluten Übergangshäufigkeiten nicht nur die Anzahl der Übergänge gezählt werden, sondern es soll anhand der Abschnitts-

länge gewichtet werden. Das Ergebnis wird für eine Klassenbreite von 2 mm in der Tabelle 18 zusammengestellt. Aufgrund des sehr breiten Spektrums der prognostizierten Größen, wird die Tabelle in zwei Teile zerlegt.

SPT [mm]	Klassenbelegung in der Prognose für 2004												
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in der Erfassung 1999/2000	0-2	-	-	-	0,024	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	-	23,041	122,579	9,377	7,587	7,670	0,678	15,609	8,610	-	-	-
	4-6	-	24,870	175,416	266,617	155,403	81,621	88,466	92,824	41,558	34,162	2,157	-
	6-8	-	0,340	0,975	7,050	71,352	45,561	28,154	30,978	16,881	31,692	6,697	-
	8-10	-	0,425	2,338	0,657	17,060	60,035	43,858	144,383	36,991	41,033	25,64	4,588
	10-12	-	0,116	0,755	1,360	2,347	11,912	7,044	21,023	31,192	13,939	12,526	5,933
	12-14	-	0,078	0,093	0,027	0,187	0,185	0,017	1,637	5,602	9,898	4,951	6,903
	14-16	-	-	0,100	-	-	-	-	2,691	4,203	8,356	4,462	7,679
	16-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,602	1,694	1,432
	18-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,151	0,349
	20-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,192
	22-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,007	-
	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	26-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32-34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

SPT [mm]	Klassenbelegung in der Prognose für 2004												
	26-28	28-30	30-32	32-34	34-36	36-38	38-40	40-42	42-44	44-46	46-48	48-50	50-52
Klassenbelegung in der Erfassung 1999/2000	0-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12-14	1,399	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14-16	2,025	-	0,599	-	0,133	0,284	0,049	0,732	-	-	-	3,110
	16-18	1,519	1,686	0,463	0,049	0,403	0,426	0,126	-	-	0,820	-	2,459
	18-20	1,067	0,657	1,286	0,472	-	-	-	0,012	-	0,555	0,174	-
	20-22	0,170	0,118	0,982	0,150	0,640	-	0,026	-	-	-	0,226	-
	22-24	0,278	-	0,200	-	-	0,274	-	-	-	-	-	-
	24-26	-	-	0,142	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	26-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,352	-	-	
30-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32-34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 18: Prognostizierte absolute Häufigkeit von Klassenübergängen (Beispieldaten Österreich 1999/2000 → 2004)

Es kann zunächst überraschen, dass bei den Ergebnissen der deterministischen, österreichischen Prognose auf kurzen Strecken eine Zustandsverbesserung prognostiziert wird (Werte unterhalb der hervorgehobenen Diagonalen). Dies ist eine Folge des zulässigen Wertebereichs der Kalibrierfaktoren und ein bewusster Effekt des ange-

wendeten Prognosemodells. Durch den Effekt wird erreicht, dass Abschnitte, bei denen bereits kurz nach Fertigstellung oder Sanierung sehr hohe Zustandsgrößen gemessen wurden, nicht noch stärker fortschreiten, sondern sich verbessern. Dies entspricht der Erwartung, dass diese Abschnitte im Rahmen der Gewährleistung saniert werden und nicht das im PMS zu berücksichtigende Erhaltungsbudget belasten sollen.

In den hier aufgeführten Beispielauswertungen für Deutschland und für Österreich wurden Klassenbreiten von 2 mm Spurrinnentiefe verwendet. Für die spätere visuelle Analyse soll zur verbesserten Detaillierung eine wesentlich feinere Verteilung mit 0,1 mm (für die deutschen und österreichischen Beispieldaten) bzw. 0,5 mm (nur für die österreichischen Beispieldaten) angewendet werden. Im Kapitel 8.4.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die aus einem solchen Detaillierungsgrad resultierende Datenmenge nicht mehr übersichtlich in Tabellenform dargestellt werden kann. Die visuelle Darstellung wird im Kapitel 8.4.5 im Rahmen der visuellen Vergleichsanalyse verwendet und dort aufgeführt. Nachfolgend soll zunächst eine Vergleichsanalyse anhand eines ausgewählten statistischen Tests, dem Chiquadrat-Test, geprüft werden.

#### **8.4.4 Vergleichsanalyse durch Chiquadrat-Test**

Statistische Tests erlauben es zu untersuchen, inwiefern eine angenommene, z.B. durch Prognose ermittelte Verteilung mit einer tatsächlichen Werteverteilung übereinstimmt. Bei einigen Testverfahren, so zum Beispiel beim t-Test oder beim Chiquadrat-Test, kann die prognostizierte, angenommene Verteilung beliebig sein, d.h. es wird keine Standardverteilung wie z.B. die Normalverteilung vorausgesetzt.

Hintergrund ist die Annahme, dass jeder Messvorgang in einer bestimmten Form mit einem Fehler behaftet ist. Gemäß der Theorie sind solche Fehler normalverteilt, das bedeutet, sie folgen der Dichtefunktion der Normalverteilung. Bei einem statistischen Test ist somit die folgende Annahme zugrunde zu legen: Die Stichprobe folgt einer bestimmten, beliebigen, z.B. durch ein Prognosemodell ermittelten Verteilung. Die Fehler bei der Erhebung der Stichprobe sind dagegen normalverteilt.

Unter dieser Annahme kann also zunächst davon ausgegangen werden, dass eine Stichprobe von Messwerten zwar „in etwa“ einer bestimmten Verteilung folgt, aber nicht exakt. Es ergibt sich eine Abweichung, die sowohl von der Fehleranfälligkeit der Messung als auch von der Größe der Stichprobe abhängt. Unter Voraussetzung eines bestimmten Signifikanzniveaus (in der Regel wird ein Signifikanzniveau von 5 % gewählt) lässt sich schließen, dass die Abweichungen der (gemessenen) relativen Häufigkeiten von den (prognostizierten) Erwartungswerten je nach Umfang der Stichprobe und Anzahl der möglichen Klassenbelegungen bestimmte Werte nicht überschreiten sollten. Durch statistische Tests kann theoretisch untersucht werden, inwiefern die festgestellten Abweichungen im Rahmen der Erwartungen liegen.

Sollten die Abweichungen zu groß sein, empfiehlt es sich, die Verteilungsannahme zu verwerfen. Sollten die Abweichungen mit dem Modell verträglich sein, gilt dies aber noch nicht als Beweis für die Gültigkeit des Modells sondern besagt lediglich, dass das Modell zunächst noch nicht zu verwerfen ist. Je nach gewähltem statistischen Test und auch nach der Art, wie der Test angewendet wird, kann es vorkommen, dass eine bestimmte Verteilung mal zu verwerfen ist und mal nicht. In solchen Fällen gilt es zu beachten, dass die jeweiligen Tests gegenüber bestimmten Einflussfaktoren (Abhängigkeit der Verteilungswerte, sehr kleine Erwartungswerte, zu großer Stichprobenumfang) empfindlich sein können und bei Nichtbeachtung der Testvoraussetzungen das Testergebnis fehlerbehaftet sein kann.

In der Statistik sind eine Reihe unterschiedlicher Tests bekannt, welche zur Überprüfung einer Übereinstimmung einer Stichprobenverteilung mit einer Vergleichsverteilung dienen. Viele davon setzen voraus, dass die Vergleichsverteilung eine Standardverteilung, wie z.B. eine Weibull-Verteilung oder eine Normalverteilung ist. Da für die Zustandsdaten diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, können hierfür nur solche Tests herangezogen werden, welche eine beliebige Verteilungshypothese überprüfen können. Beispiele hierfür sind der Chi-Quadrat-Test, der Anderson-Darling-Test oder der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest. Da bei der Erarbeitung der deutschen Prognosemodelle nach Angaben der Projektbearbeiter der Chi-Quadrat-Test zur Überprüfung der Signifikanz der Prognosemodelle angewendet worden ist, soll dieser Test nachfolgend vorgestellt werden.

Die Anwendung des Chi-Quadrat-Tests ist allerdings für die vorliegende Aufgabenstellung mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden. Die Probleme sind sowohl technischer als auch fachlicher Natur.

- Die technischen Schwierigkeiten liegen zunächst in der Bestimmung der so genannten Testgrößen. Weiter unten wird auf die Regeln zu Bestimmung und auf die Berechnungsprobleme eingegangen.
- Die fachliche Schwierigkeit besteht darin, dass diese Tests in der Lage sind zu entscheiden, ob eine Stichprobe einer vorgegebenen Verteilung folgt. Eine wesentliche statistische Eigenschaft der Tests ist, dass je mehr Elemente in der Stichprobe enthalten sind, desto eher Abweichungen als statistisch signifikant erkannt werden. Da die Beurteilung der Prognosemodelle anhand aller Datensätze der Beispielnetze erfolgt, wird bei den Tests eine sehr hohe Übereinstimmung verlangt, die bereits bei geringen Abweichungen zwischen Modell und Realität zu einem Verwerfen der Übereinstimmungsannahmen führen muss. Dies führt insbesondere bei den österreichischen Beispieldaten, in denen der systematische Einfluss zwischenzeitlicher Maßnahmen enthalten ist, dazu dass diese Tests nicht aussagekräftig angewendet werden können. Die Ergebnisse sind somit signifikant, jedoch nicht praxisrelevant.

Nachfolgend soll zur Erläuterung auf die Vorgehensweise zur Durchführung eines Chi-Quadrat-Tests eingegangen werden. Gemäß dem Chi-Quadrat-Test muss eine Testgröße  $T$  durch Gegenüberstellung von gezählter, absoluter Häufigkeit und erwarteter Häufigkeit (Erwartungswert) gebildet werden. Die Gleichung zur Bestimmung von  $T$  ist nachfolgend wiedergegeben.

$$T = \sum_{j=1}^m \frac{(S^{(j)} - n\pi_0^{(j)})^2}{n\pi_0^{(j)}} \quad (8.50)$$

Mit:  $T$  = Testgröße des Chi-Quadrat-Tests

$m$  = Anzahl der möglichen Klassen, die in der Verteilung vorkommen

$n$  = Anzahl der Werte in der Stichprobe

$S^{(j)}$  = Anzahl der Elemente, die in die Klasse  $j$  fallen

$\pi_0^{(j)}$  = prognostizierte Wahrscheinlichkeit (0..1), dass ein Element in die Klasse  $j$  fällt

Die Gleichung (8.50) für die Testgröße  $T$  hat die wichtige Eigenschaft, dass die Anzahl der Stichprobenwerte eingeht. Die Anzahl ist nicht ohne weiteres durch einen anderen Gewichtungsfaktor, wie z.B. der Streckenlänge zu ersetzen, da bereits die Wahl der Einheit der Streckenlänge (Meter oder Kilometer) einen erheblichen Einfluss auf die Testgröße hätte. Die Empfindlichkeit der Testgröße gegenüber der Anzahl der Messwerte ist eine Folge des Gesetzes der Großen Zahl, gemäß dem ein durchschnittlicher Messwert sich mit wachsender Anzahl von Messungen immer mehr dem „Wahren Wert“ nähern muss. Für den Chi-Quadrat-Test bedeutet dies, dass bei einer sehr hohen Anzahl von Messungen die gleichen Abweichungen zu schlechteren Testergebnissen führen.

Die Anwendung des Chi-Quadrat-Tests erfordert somit, dass die Belegung einzelner Klassen gezählt wird, wobei jede Belegung gleichwertig ist. Während dies für die Beispieldaten aus Deutschland aufgrund der weitestgehend einheitlichen Regellänge (100 m auf der Freien Strecke, 20 m in Ortsdurchfahrten) noch annähernd angenommen werden kann, ist dies für die österreichischen Beispieldaten aufgrund der sehr unterschiedlichen Streckenlängen eine unsichere Annahme.

Ein weiteres Problem besteht in der Bestimmung der Übergangsklassen und somit der Freiheitsgrade zum Chi-Quadrat-Test. Dies soll anhand der deutschen Beispieldaten erläutert werden. Aufgrund der Eigenschaften des Chi-Quadrat-Tests ist es notwendig, die Analyse nicht anhand der streckengewichteten, absoluten Häufigkeiten, sondern anhand der Anzahl der Klassenübergänge durchzuführen. In der Tabelle 19 wurden diese Werte zusammengestellt.

SPT [mm]		Klassenbelegung in der Prognose für 2003												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in der Jahresm. 1999	0-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4-6	-	-	5167	1122	50	7	-	-	-	-	-	-	-
	6-8	-	-	-	2151	781	19	28	24	6	-	-	-	-
	8-10	-	-	-	-	777	299	128	53	25	28	-	-	-
	10-12	-	-	-	-	-	4	288	88	105	2	-	-	-
	12-14	-	-	-	-	-	-	-	107	46	46	-	-	-
	14-16	-	-	-	-	-	-	-	-	42	35	-	-	-
	16-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-
	18-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 19: Prognostizierte absolute Häufigkeit von Klassenübergängen (Beispieldaten Deutschland 1999→2003; Anzahl)**

Um eine vergleichbare Darstellung zu den empirischen Daten zu erhalten, muss darüber hinaus berücksichtigt werden, dass für einige der Ausgangsdaten in der 4-Jahres-Prognose im Kapitel 8.4.3 Zustandswerte ermittelt worden sind, die aufgrund der Unstetigkeiten in der Normierungsfunktion nicht eindeutig in Zustandsgrößen zurückgeführt werden können.

Um den Vergleich durchführen zu können, ist es daher notwendig die gezählten Übergänge aus den beiden Messungen ebenfalls nur auf die verwendbaren Daten zu reduzieren. Das Ergebnis ist die absolute Anzahl der Klassenübergänge der reduzierten Datenbasis (siehe Tabelle 20).

SPT [mm]		Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003												
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Klassenbelegung in Jahresmessung 1999	0-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4-6	52	751	3069	1898	435	92	24	12	7	2	2	2	-
	6-8	17	105	421	1201	913	250	65	21	6	4	3	1	1
	8-10	11	27	70	169	474	356	143	36	12	7	-	1	1
	10-12	-	11	12	22	62	150	147	60	21	1	-	-	1
	12-14	-	4	4	7	12	25	44	65	26	9	3	-	-
	14-16	-	5	2	1	5	7	8	18	21	7	3	-	-
	16-18	-	-	-	-	-	1	1	1	4	4	-	-	-
	18-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 20: Gemessene , absolute Häufigkeit von Klassenübergängen (Beispieldaten Deutschland 1999→2003; Anzahl; nur prognostizierbare Ausgangsdaten)**

Da der gemessene Wertebereich z.T. Klassen enthält, die durch die Prognose nicht berührt werden, gilt es, mehrere Klassen zusammenzufassen. Das Ergebnis ist in der Tabelle 21 wiedergegeben.

SPT [mm]	Klassenbelegung in der Jahresmessung 2003								
	0-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-26	
Klassenbelegung in Jahresmessung 1999	0-2	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	-	-	-	-	-	-	-	-
	4-6	3872	1898	435	92	24	12	7	6
	6-8	543	1201	913	250	65	21	6	10
	8-10	108	169	474	356	143	36	12	12
	10-12	23	22	62	150	147	60	21	2
	12-14	8	7	12	25	44	65	26	12
	14-16	7	1	5	7	8	18	21	10
	16-18	-	-	-	1	1	1	4	4
	18-20	-	-	-	-	-	-	-	-
	20-22	-	-	-	-	-	-	-	-
	22-24	-	-	-	-	-	-	-	-
24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	

**Tabelle 21: Gemessene , absolute Häufigkeit von Klassenübergängen (Beispieldaten Deutschland 1999→2003; Anzahl; nur prognostizierbare Ausgangsdaten; zusammengefasste Klassen)**

Anhand dieser Zahlen soll die Testgröße T für den Chi-Quadrat-Test gemäß Gleichung (8.50) bestimmt werden. Hier wird ein erstes Problem in der Anwendung deutlich. Aufgrund der sehr häufig vorkommenden prognostizierten Wahrscheinlichkeit  $n \cdot \pi_0^{(j)} = 0$  muss durch Null dividiert werden, was in der Mathematik undefiniert ist. Die Testgröße T kann somit nicht eindeutig bestimmt werden.

Um zu erfahren, ob die Verteilungsannahme zu verwerfen ist, wäre die Testgröße einem kritischen Wert c gegenüberzustellen, der von der Anzahl der Freiheitsgrade  $\nu$  der Verteilung, d.h. von den möglichen Klassenbelegungen abhängt. Je mehr Klassenbelegungen möglich sind, desto höher ist der zulässige kritische Wert. Der Freiheitsgrad  $\nu$  wird für den Chi-Quadrat-Test folgendermaßen bestimmt:

$$\nu = m - 1 \tag{8.51}$$

Mit:  $\nu$ : Anzahl der Freiheitsgrade

m: Anzahl der möglichen Klassen, die in der Verteilung vorkommen

Da einige der Klassenübergänge bei den Prognosedaten, andere bei der Realdatenauswertung nicht vorkommen, ist es schwierig, eine begründbare Entscheidung darüber zu fällen, welche Klassen bei den Freiheitsgraden berücksichtigt werden sollen. Somit kann auch kein kritischer Wert c eindeutig bestimmt werden.

Für die österreichischen Beispieldaten sind die gleichen technischen Ausführungsschwierigkeiten vorhanden wie für die deutschen Daten. Darüber hinaus muss für Österreich beachtet werden, dass in den Klassenübergängen zwischen den beiden Messungen weiterhin auch Abschnitte enthalten sind, in denen zwischenzeitlich Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt worden sind. Diese Maßnahmen sind in den Prognoseberechnungen nicht berücksichtigt worden, so dass auch dieser Umstand die Vergleichbarkeit der Daten einschränkt. Da bei einem Chi-Quadrat-Test eine solche Abweichung als signifikant registriert werden muss, ist seine Anwendung auch aus fachlichen Gründen nicht sinnvoll.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Anwendung des Chi-Quadrat-Tests zur Überprüfung der Zuverlässigkeit von Prognosemodellen nicht ohne weiteres durchgeführt werden kann. Bei anderen Tests, wie z.B. dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest oder seiner Variante im Anderson-Darling-Test wären die technischen Schwierigkeiten eventuell zu überwinden, allerdings ist zu erwarten, dass aufgrund der fachlichen Randbedingungen die SOLL-Verteilung zu sehr von der IST-Verteilung abweicht und die Verteilungshypothese verworfen werden müsste. Da die Abweichungen aber eventuell fachlich erklärt werden könnten, haben die Ergebnisse der Tests nur eine geringe Aussagekraft zur Eignung der Prognoseverfahren.

Um die Prognosequalität aus ingenieurtechnischer Sicht beurteilen zu können sollte gesondert auf die Besonderheiten der Zustandsdaten anhand geeigneter Verfahren eingegangen werden. Nachfolgend wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Eignung der Modelle visuell überprüft werden kann.

#### **8.4.5 Vergleichsanalyse durch visuelle Darstellung**

Visuelle Verfahren erlauben aufgrund der Fähigkeiten des menschlichen Gehirns, optische Einzelreize zu Strukturen zu verbinden (Gestaltwahrnehmung), häufig eine einfache Plausibilitätskontrolle. In dem Kapitel 8.4.2 wurde ein Verfahren zur standardisierten Darstellung von Übergangshäufigkeiten vorgestellt. Da das Verfahren nicht die absolute Gesamtlänge der Klassenübergänge, sondern die relativen Übergangshäufigkeiten in Bezug auf die Gesamtzahl der Übergänge darstellt, müssen diese zunächst ermittelt werden.

Als Ausgangsdaten werden die absoluten Klassenübergänge der Prognosemodelle (Tabelle 17 für die Beispieldaten aus Deutschland und Tabelle 18 für die Beispieldaten aus Österreich) sowie der gemessenen Zustandsveränderung (Tabelle 20 für die Beispieldaten aus Deutschland und Tabelle 22 für die Beispieldaten aus Österreich) verwendet.

SPT [mm]	Klassenbelegung in der Prognose für 2004															
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32
Klassenbelegung in der Erfassung 1999/2000	0-2	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-4	4	248	120	57	49	17	1	2	1	-	-	-	-	-	-
	4-6	2	552	989	648	375	110	38	21	3	2	-	1	-	-	-
	6-8	-	50	209	301	219	69	31	4	1	2	-	-	-	-	-
	8-10	-	15	132	274	353	197	75	52	8	4	2	5	-	-	-
	10-12	-	24	76	73	71	81	47	31	19	13	3	2	-	-	-
	12-14	-	5	30	24	18	23	31	22	9	3	1	-	-	-	-
	14-16	-	4	24	26	19	20	37	16	20	7	1	2	-	-	-
	16-18	-	1	11	21	18	5	12	4	5	2	-	-	-	-	-
	18-20	-	-	6	5	3	4	1	4	3	2	-	2	-	-	-
	20-22	-	-	-	2	7	-	7	1	4	1	2	2	-	-	-
	22-24	-	-	3	2	-	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	24-26	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-
	26-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28-30	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
30-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32-34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	

Tabelle 22: Prognostizierte, absolute Häufigkeit von Klassenübergängen (Beispieldaten Österreich 1999/2000→2004; Anzahl)

Aus den Matrizen mit den absoluten Gesamtstrecken der Klassenübergänge werden durch Anwendung der Gleichung (8.49) Matrizen mit Übergangshäufigkeiten erstellt. Diese können dann anhand der Verfahren aus 8.4.2 visualisiert werden.

#### 8.4.5.1 Beispielanwendung Deutschland

In der Abbildung 72 sind prognostizierte Übergangswahrscheinlichkeit und gemessene relative Übergangshäufigkeiten gemäß diesem Muster nebeneinander dargestellt.

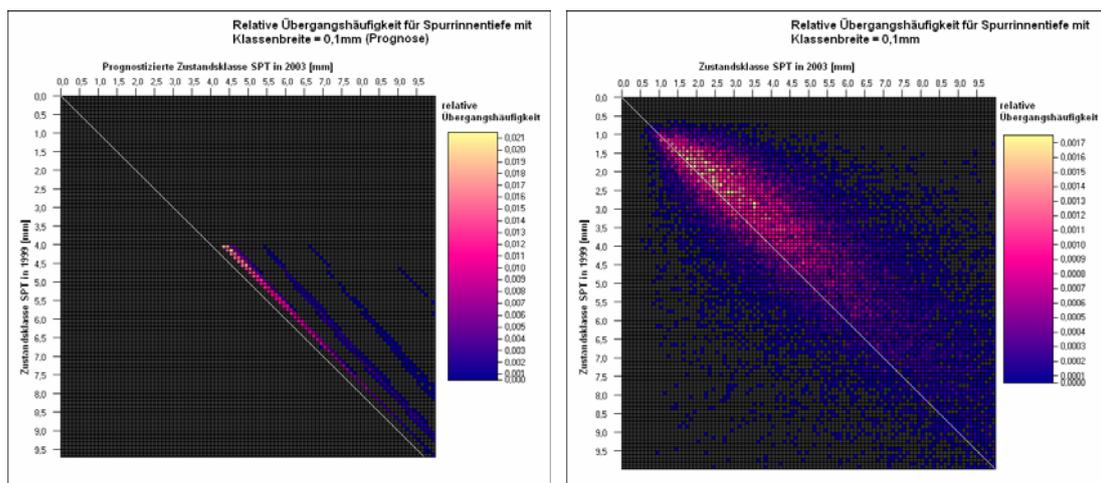


Abbildung 72: Prognostizierte (links) und gemessene (rechts) relative Übergangshäufigkeit für die Spurrinnentiefe (Beispieldaten Deutschland) – unterschiedliche Skalen

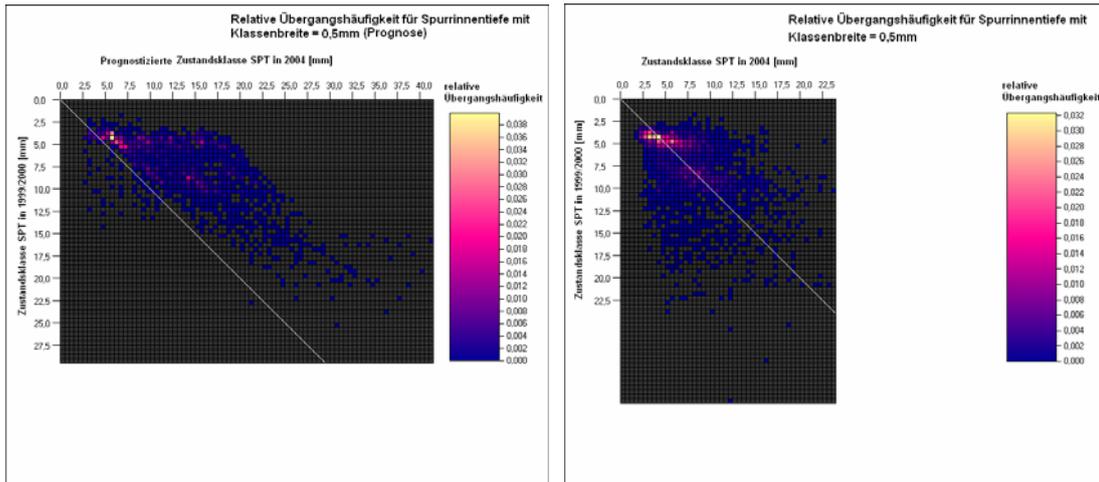
Zur Verdeutlichung der Unterschiede wurden bei der Darstellung Übergänge, die bei keinem Abschnitt des Datenkollektivs festgestellt werden konnten, sehr dunkel eingefärbt. Die beiden Darstellungen unterscheiden sich zunächst sehr stark optisch voneinander. Hierfür können verschiedene Erklärungen gefunden werden.

Die sich bei der Prognose abbildenden vier Streifen sind eine Folge des Ansatzes, die Ausgangsdaten in vier Verhaltensklassen aufzuteilen, denen eine jeweils unterschiedliche Prognosefunktion zugrunde gelegt wird. Die Tatsache, dass um die Streifen keine Streuung zu finden ist, ist auf die strikt auf vier Verhaltensklassen reduzierte Form der „abschnittsbezogenen Kalibrierung“ zurückzuführen.

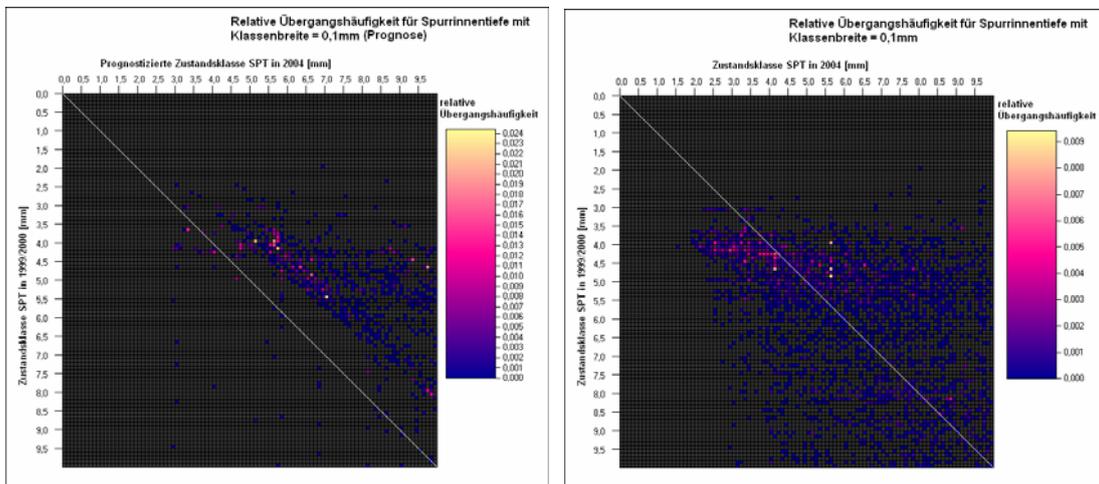
Bei der Betrachtung der Darstellungen ist darauf zu achten, dass das Farbspektrum (gelb→rot→blau) in den beiden Fällen unterschiedlich skaliert ist. Ein Farbwert im mittleren Bereich der Skala hat bei der Darstellung des Prognosemodells die Bedeutung einer Übergangswahrscheinlichkeit von etwa 1 %, während die gleiche Farbe in der rechten Darstellung eine relative Übergangshäufigkeit von 0,09 % indiziert. Der Unterschied in der Skala erklärt sich dadurch, dass beim deutschen Prognoseansatz nur wenige unterschiedliche Klassenübergänge  $z_{i,j}$  überhaupt auftreten können, zu diesen demnach eine verhältnismäßig große Anzahl an Klassenbelegungen gezählt werden kann, die zu einer entsprechend hohen Übergangswahrscheinlichkeit führen. Bei den tatsächlich gemessenen Übergängen sind dagegen sehr viele Übergangsmöglichkeiten mit Zahlenwerten belegt, was zu einer jeweils kleineren relativen Übergangshäufigkeit führt. Die Summe aller Matrixwerte beträgt =1,0 und diese Summe verteilt sich bei gemessenen Übergangshäufigkeiten auf mehrere Matrixfelder.

#### 8.4.5.2 Beispielanwendung Österreich

Aufgrund der bereits angesprochenen Eigenschaften der österreichischen Beispieldaten werden nachfolgend die Gegenüberstellungen der Prognoseergebnisse zu den realen Daten für zwei unterschiedliche Klassenbreiten abgebildet. Die Abbildung 73 zeigt eine Klassenbreite von 0,5 mm, die Abbildung 74 zeigt die feinere Klassenbreite von 0,1 mm.



**Abbildung 73: Prognostizierte (links) und gemessene (rechts) relative Übergangshäufigkeit für die Spurrinnentiefe (Beispieldaten Österreich – Klassenbreite 0,5 mm) – unterschiedliche Skalen**



**Abbildung 74: Prognostizierte (links) und gemessene (rechts) relative Übergangshäufigkeit für die Spurrinnentiefe (Beispieldaten Österreich – Klassenbreite 0,1 mm) – unterschiedliche Skalen**

Durch den direkten Vergleich können den Darstellungen verschiedene Informationen entnommen werden.

- Anders als bei den deutschen Prognosedaten zeigen die Prognoseergebnisse in Österreich eine weite Streuung, die auf die unterschiedlichen Kalibrierfaktoren zurückgeführt werden kann. Sie empfinden somit das tatsächliche Zustandsverhalten besser nach.
- Im Vergleich zu den realen Messdaten zeigen die Prognosedaten tendenziell eine stärkere Zustandsverschlechterung. Hierfür können verschiedene Ursachen in Frage kommen. Zum einen liefert das deterministische Prognosemodell grundsätzlich keine Zustandsverbesserungen, welche aber (siehe auch Diskussion im Kapitel 8.4.6) bei Messungen durch fehlerverursachte Streuungen

durchaus auftreten können. Zum anderen beinhaltet die Prognose keine Berücksichtigung zwischenzeitlicher Maßnahmen, während die österreichischen Messungs-Beispieldaten auch Strecken enthalten, auf denen zwischenzeitlich eine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt worden ist.

- Eine Besonderheit der österreichischen Prognose ist, dass dabei sehr hohe Spurrinnenwerte prognostiziert werden, die in einer Größenordnung liegen (über 25 mm), die in der Realität weder bei der Ersterfassung 1999/2000, noch bei der Zweiterfassung 2004 gemessen worden ist. Dies kann zum einen dadurch begründet werden, dass die tatsächliche Erhaltungspraxis bemüht ist, solche Spurrinntiefen gar nicht aufkommen zu lassen, sondern beim Auftreten gezielt beseitigt. Andererseits kann dies aber auch ein Hinweis auf ein zu pessimistisches Prognosemodell sein.

Im Kapitel 8.5 wird eine Gegenüberstellung der wesentlichen Unterschiede zwischen dem deutschen und dem österreichischen Prognosemodell aufgestellt.

#### **8.4.6 Diskussion: Verbesserung von Zustandsgrößen ohne Maßnahmeeinwirkung**

Ein interessanter Aspekt, der bei der Darstellung der Übergangshäufigkeiten deutlich wird, ist, dass bei einem relevanten Teil der Auswerteabschnitte eine Zustandsverbesserung gemessen worden ist. Dies erfolgte auch bei den Zustandsdaten, welche durch einen hohen Aufwand manuell plausibilitätsgesichert worden sind. Dieses Phänomen, welches generell bei verschiedenen Analysen von Zustandsdynamiken festgestellt wird (z.B. in [41] und [60]), ist aus fachlicher Sicht durch eine rein deterministische Betrachtungsweise nicht erklärbar und hat in Einzelfällen dazu geführt, dass ein Großteil der Daten als „unplausibel“ eingestuft und von der Analyse ausgeschlossen worden ist (z.B. [62]).

Der Ausschluss der Daten begründet sich in der Regel dadurch, dass angenommen wird, dass eine Zustandsverbesserung nur durch eine Maßnahme stattfinden kann und daher an den fraglichen Stellen eine nicht dokumentierte Maßnahme zu der Verbesserung geführt haben müsste. Da für die obige Darstellung eine von Maßnahmen bereinigte Datengrundlage verwendet worden ist, ist dies aber auszuschließen. Die Streuung kann aber bei einer stochastischen Betrachtungsweise auch anders erklärt werden.

In der Statistik wird davon ausgegangen, dass jede Messung mit einem bestimmten Fehler behaftet ist. Selbst wenn systematische Messfehler ausgeschlossen werden, verbleibt stets ein zufälliger Fehler. Falls die Zustandsveränderung als die zu untersuchende Messgröße betrachtet wird, können systematische Fehler aus unterschiedlichen Messsystemkalibrierungen in den einzelnen Jahren oder aus zwischenzeitlich durchgeführten Maßnahmen resultieren. Werden diese systematischen Fehler (z.B.

aufgrund der ingenieurmäßigen Datenplausibilisierung) weitestgehend ausgeschlossen, verbleiben bei jeder Messung zufällige Abweichungen vom wahren Wert.

Mehrere, zufällige Fehler einzelner Messsystemkomponenten verstärken sich teilweise, heben sich aber auch teilweise gegenseitig zum endgültigen Messwert auf, so dass bei einer großen Anzahl von Messungen eine um den wahren Wert streuende Messwert-Verteilung entsteht. Falls angenommen werden kann, dass die einzelnen Messfehler (auch in den Messsystemkomponenten) weitestgehend unabhängig voneinander sind, kann mathematisch nachgewiesen werden, dass die durch diese Streuung entstehende Verteilung mit wachsender Anzahl der Messungen einer Normalverteilung mit der Lage  $\mu$  und der Streuung  $\sigma^2$  [ $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ ] immer ähnlicher wird (so genannter „Zentraler Grenzwertsatz“). Der Mittelwert und somit die Lage  $\mu$  der Messwerte entspricht mit zunehmender Anzahl der Messungen immer genauer dem wahren Wert (so genanntes „Gesetz der großen Zahlen“).

Wenn nun, wie im Fall der gemessenen Zustandsveränderung, aus fachlicher Sicht angenommen wird, dass  $\mu$  stets positiv sein muss (positives  $\Delta\text{SPT}$  = Zustandsverschlechterung), können dennoch, bei ausreichend großen Streuungen durchaus negative Veränderungswerte (Zustandsverschlechterungen) festgestellt werden, die durchaus mit dem stochastischen Modell verträglich sind. Für die Schätzung der Lage  $\mu$  (z.B. durch den arithmetischen Mittelwert) wäre es bei einer stochastischen Betrachtungsweise nicht sinnvoll, die negativen Werte auszuschließen, da eine systematische Verfälschung der Ergebnisse stattfindet. Die negativen Werte resultieren gemäß diesem Modell aus Messfehlern, die aber ähnliche Messfehler im positiven Bereich ausgleichen, z.B. wenn größere Zustandsverschlechterungen gemessen werden, als tatsächlich vorhanden sind.

#### **8.4.7 Diskussion: Zwei Übergangs-Peaks in Österreich**

Bei der Betrachtung der Übergangshäufigkeiten für die Beispieldaten in Österreich fiel auf, dass sich zwei Häufungen bei den Spurrinnenwerten von 4 mm und 8 mm bilden. Es soll untersucht werden, wie diese Peaks zu erklären sind.

Da zwischen diesen Häufungsstellen kein fließender Übergang stattfindet, kann vermutet werden, dass es sich um zwei systematisch verschiedene Datenkollektive handelt. Es bietet sich daher an, das Datenkollektiv nach verschiedenen Kriterien einzuteilen und die daraus entstehenden Datengruppen einzeln zu untersuchen. Anhand der vorliegenden Daten können verschiedene Unterscheidungen vorgenommen und visualisiert werden.

- Strecken mit Betondecke / Strecken mit Asphaltdecke (siehe Abbildung 75)
- Bundesstraßen der Kategorie A / Bundesstraßen der Kategorie S (siehe Abbildung 76)

- Strecken, die 1999 erstmalig erfasst wurden / Strecken, die 2000 erstmalig erfasst wurden (siehe Abbildung 77)

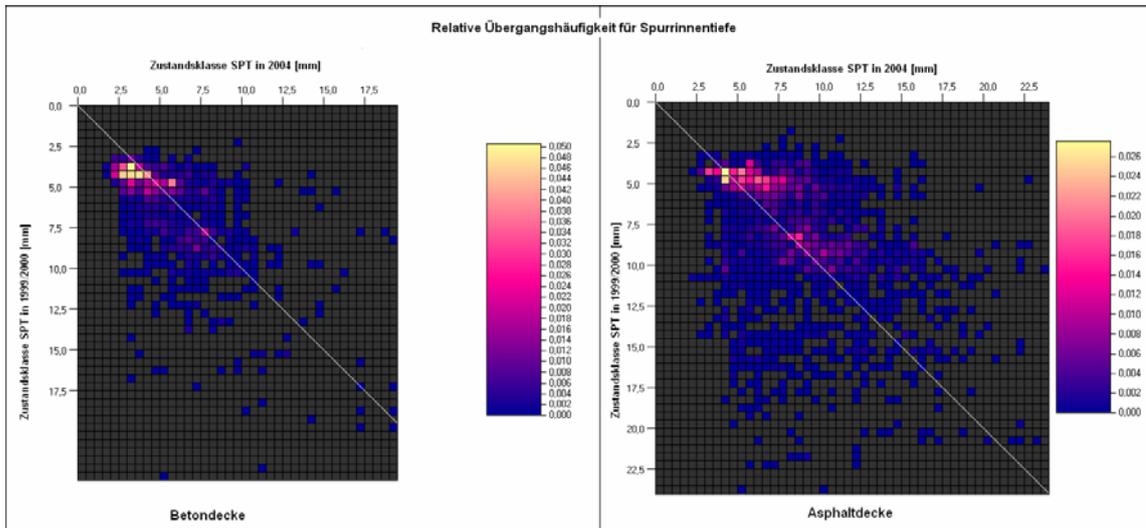


Abbildung 75: Visualisierung der Übergangshäufigkeiten für die beiden Datenkollektive Betondecke / Asphaltdecke (Klassenbreite = 0,5 mm)

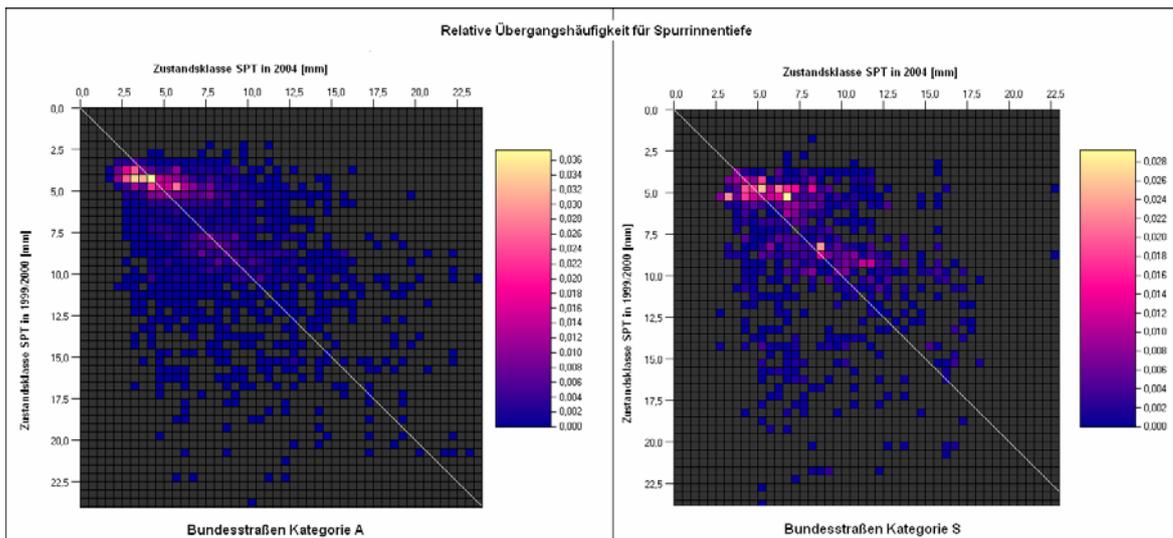
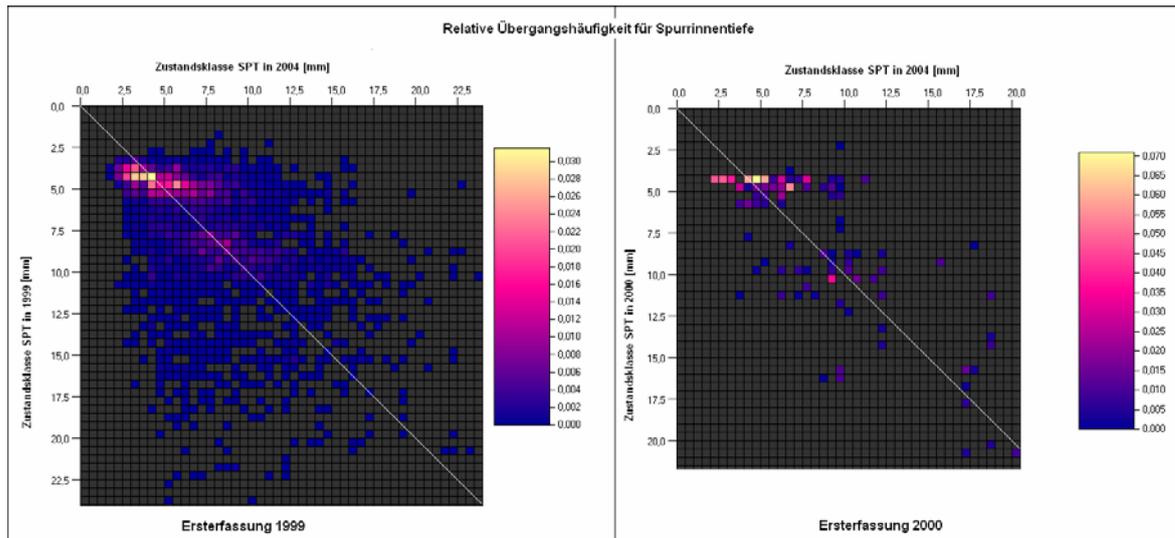


Abbildung 76: Visualisierung der Übergangshäufigkeiten für die beiden Datenkollektive Straßenkategorie A / Straßenkategorie S (Klassenbreite = 0,5 mm)



**Abbildung 77: Visualisierung der Übergangshäufigkeiten für die beiden Datenkollektive Ersterfassung 1999 / Ersterfassung 2000 (Klassenbreite = 0,5 mm)**

Es zeigt sich, dass bei keinem der untersuchten Aufteilungskriterien ein systematischer Einfluss auf die Häufung der Spurrinnen-Klassenübergänge nachgewiesen werden kann. Bei allen Datengruppen sind jeweils die beiden Peaks sichtbar.

Der Effekt lässt sich auch nicht durch einen systematischen Messfehler erklären, da die Häufungen auf sehr vielen Strecken und auf unterschiedlichen Straßen verteilt sind. Zudem haben die Strecken, die bei der Ersterfassung 4 mm bzw. 8 mm Spurrinnen aufweisen, in der Zweiterfassung in etwa gleich hohe Zustandsgrößen (siehe Abbildung 77), so dass sich ein Messfehler in beiden Erfassungen an der gleichen Stelle hätte ereignen müssen, was sehr unwahrscheinlich erscheint.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass zwar bei den Zustandsdaten in Österreich ein systematischer, nicht auf Messfehler zurückzuführender Effekt existiert, der eine ausgeprägte Häufung von Messungen von ca. 4 mm Spurrinnen und eine weniger ausgeprägte Häufung von Messungen von ca. 8 mm verursacht, dieser Effekt aber keiner der bisher untersuchten Systematiken folgt, und daher noch zu erforschen ist. Da im Rahmen dieser Arbeit hierfür keine ausreichenden Unterscheidungsdaten vorliegen, soll die Untersuchung an dieser Stelle nicht fortgesetzt werden. Eventuell können aber die hier vorgestellten Visualisierungsverfahren eine Unterstützung für die Ursachenforschung bieten.

## 8.5 Zusammenfassende Beurteilung

In dem vorliegenden Kapitel wurden die Grundlagen der deutschen und österreichischen Prognosemodelle vorgestellt und die Qualität der Modelle anhand von Realdaten untersucht. Die Untersuchung wurde zunächst für beide Prognoseverfahren anhand des Chiquadrat-Testverfahrens versucht, wobei sich aufgrund von fachlicher und technischer Randbedingung eine Umsetzung als problematisch erwies. Durch ergän-

zend erarbeitete, visuelle Verfahren wurden die Verteilungen in mehreren Diagrammen dargestellt, anhand derer Schwerpunkte und Ursachen der Abweichungen untersucht werden konnten. Aus dieser Untersuchung können zusammenfassend verschiedene Aussagen abgeleitet und diskutiert werden.

- Der Versuch einer Analyse der Prognosemodelle durch das Chi-Quadrat-Testverfahren führte zu keinem zufrieden stellenden Ergebnis. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Anwendung von solchen statistischen Tests an Voraussetzungen gebunden ist, die bei dem vorliegenden Datenmaterial nicht gegeben sind. Vor Allem führen die fachlichen Randbedingungen zu statistisch signifikanten Abweichungen der Realverteilung von der Prognoseverteilung. Diese Abweichungen sind aber teilweise ingenieurtechnisch erklärbar.
- Demgegenüber erlauben geeignete visuelle Verfahren durch die Fähigkeit des Menschen, Strukturen optisch zu erkennen und zu vergleichen, sehr wohl eine Beurteilung der Prognosequalität, die allerdings nur qualitativ und nicht quantitativ sein kann.
- Sowohl in Deutschland als auch in Österreich wird dem Problem, dass sich die Zustandsentwicklung einzelner Abschnitte aufgrund von vielfältigen Bedingungen unterschiedlich verhält, durch Anwendung einer „abschnittsbezogenen Kalibrierung“ begegnet. Es besteht allerdings ein Unterschied in der Umsetzung. In Deutschland werden alle Abschnitte anhand ihres Alters und des gegenwärtigen Zustands in vier vordefinierte Verhaltensklassen eingeteilt, während in Österreich abschnittsbezogene Kalibrierfaktoren entwickelt werden. Die visuelle Analyse zeigt, dass die deutschen Prognoseergebnisse aufgrund der Einteilung der Verhaltensklassen den tatsächlichen, in der Realität festgestellten Messwertstreuungen nicht gerecht werden, sondern sich auf vier schmale Ergebnisstreifen (siehe Abbildung 72) konzentrieren. In Österreich zeigen die Prognosedaten dagegen eine Streuung, welche ähnlich der realen Streuung ist (siehe Abbildung 73 und Abbildung 74). Das österreichische Verfahren ist somit in dieser Hinsicht vorzuziehen.
- Bei der Anwendung der verschiedenen Analyse- und Darstellungsverfahren auf die Beispieldaten wurde in vielen Fällen deutlich, dass die Verwendung von Zustandswerten für die Zustandsprognose problematisch ist. Dieser Punkt ist in Fachkreisen bekannt und hat in Deutschland dazu geführt, dass ein alternativer Ansatz im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte [7] und [62] erarbeitet wird bzw. wurde. In Österreich wurde von Beginn an anhand von Zustandsgrößen prognostiziert.
- Zusammenfassend zeigt sich, dass das derzeit in Österreich verwendete Prognosemodell [5], welches in etwa im Jahr 2000 für die österreichischen Verhältnisse erarbeitet wurde, einige der Schwächen des in Deutschland im Jahr 1997 entwickelten Prognosemodells [55] beseitigt hat. Dies gilt insbesondere für die

Anwendung der Prognose auf die Zustandsgrößen anstatt auf die Zustandswerte und für die abschnittsbezogene Kalibrierung anhand eines Kalibrierfaktors anstatt anhand von vier Verhaltensklassen. Demgegenüber ist bei dem österreichischen Prognosemodell jedoch auch festzustellen, dass die Prognoseergebnisse einen wesentlich größeren Wertebereich aufweisen als die gemessenen Daten. Hier ist wahrscheinlich eine zusätzliche Feinkalibrierung des Modells zu empfehlen, z.B. eine obere Anwendungsgrenze.

- Die im Rahmen der hier durchgeführten Analyse erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Streuungen in den gemessenen Zustandsveränderungen beider Länder derartig groß sind, dass auch Zustandsverbesserungen gemessen werden können, die auch ohne Maßnahmeeinfluss sehr wohl im Rahmen einer stochastischen Betrachtungsweise erklärbar und gerechtfertigt sind. Gemäß der stochastischen Betrachtungsweise ist es notwendig, diese Daten für die Erarbeitung und Erforschung von Prognosemodellen zu verwenden, und es wäre nicht korrekt, sie von der Analyse auszuschließen. In der laufenden Forschung wird auf diesen Umstand noch nicht ausreichend Rücksicht genommen.
- Die gemessene Zustandsdynamik mit den ihr eigenen Streuungen im einzelnen Messwert kann in Österreich durch die Verwendung des Kalibrierfaktors im Rahmen des deterministischen Modells in etwa nachvollzogen werden. Anders als die durch Kalibrierfaktoren nachbildbaren Streuungen sind die oben erwähnten, auf längeren Strecken ohne Maßnahmen gemessenen Zustandsverbesserungen jedoch nicht mit deterministischen Modellen in Einklang zu bringen. Dies ist ein Hinweis darauf, die Anwendungsmöglichkeiten *stochastischer* Modelle, insbesondere bei der Erhaltungsplanung mittels PMS, zukünftig stärker zu erforschen.

Zu diesen Punkten kann eine aktuelle, noch laufende Entwicklung angefügt werden. Die Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV) befindet sich derzeit in einer Umorganisationsphase, in der auch die einzelnen Arbeitskreise ihre Aufgabenfelder definieren müssen. Im Rahmen der Umstrukturierung hat der (derzeitige) Arbeitskreis 9.15.7 die Berücksichtigung stochastischer Effekte bei der Zustandserfassung und -bewertung sowie die perspektivische Erarbeitung stochastischer Prognosemodelle als zukünftiges Forschungsfeld aufgenommen.

## 9. Qualitätsuntersuchung durch Quantilenanalyse

Aus der Übersicht der bisherigen Methoden zur Nutzung von Zustandsdaten im Kapitel 7 wurde deutlich, dass die quantitative Beschreibung eines Netzzustandes in der Regel ausschließlich durch die folgenden Kenngrößen erfolgt:

- Mittelwerte von Zustandsgrößen
- Standardabweichung der Zustandsgrößen
- Perzentilwerte von Zustandsgrößen
- Mittelwerte von Zustandswerten
- Klassenbelegungshäufigkeiten

Darüber hinaus werden zwar auch Einzelwerte der Objektebene dargestellt und ausgewertet, diese sind aber bei der vorliegenden Betrachtung nicht als Kenngrößen des Netzes zu interpretieren.

Diese Kennzahlen werden zwar durch unterschiedliche Verfahren in verschiedenen Formen, z.B. auf Karten, Streckenbändern oder Säulendiagrammen, aufgabenbezogen abgebildet, der Inhalt der Darstellungen setzt sich aber grundsätzlich aus den oben benannten Kenngrößen zusammen. Die Mittelwerte der Zustandsgrößen, die Standardabweichung und sämtliche einhundert Perzentilwerte sind Inhalt der Summenlinien und werden nur in dieser Auswerteform verwendet. Alle anderen Standardauswertungen verwenden Mittelwerte oder Klassenbelegungshäufigkeiten der Zustandswerte.

Bei dieser Auflistung wird deutlich, dass ausschließlich statistische Standardverfahren, wie z.B. Mittelwertbildung zur Anwendung kommen, ohne dass diese durch weitergehende Verfahren in eine ingenieurmäßige Analyse integriert werden. Wie bereits im Kapitel 8.1.2 diskutiert, sollte zudem darauf hingewiesen werden, dass die Berechnung von Mittelwerten für Zustandswerte derzeit als fraglich eingestuft wird, da diese nicht das notwendige Skalenniveau aufweisen. Darüber hinaus sind die oben aufgeführten Kenngrößen zwar ein Indikator für den absoluten Netzzustand, erlauben aber keine Aussage zur Homogenität des Netzes. Dieses ist aber, wie eingangs festgestellt, eine wesentliche Fragestellung, die durch die Analyse von Straßenzustandsdaten beantwortet werden soll.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwiefern die derzeit verwendeten Kenngrößen um weitere Indikatoren ergänzt werden können, welche ohne zusätzlichen Messaufwand ermittelt werden können. Die neuen Indikatoren sollten ausschließlich anhand der bereits gemessenen Datengrundlage, durch geeignete, neue Auswerteformen abgeleitet werden.

## 9.1 Ergänzung bisheriger Netzkenngößen durch Quantilenanalyse

Bei der vorherigen Betrachtung der derzeit im Rahmen der Standardauswertungen ermittelten Netzkenngößen wurde diskutiert, dass die jetzt verwendete Palette an Netzkenngößen in zweierlei Hinsicht ergänzt werden sollte.

- Verschiedene Darstellungen des Zustands der Straßen verwenden unter anderem Mittelwerte von Zustandswerten. Diese Vorgehensweise ist mathematisch umstritten, da die Zustandswerte zum einen kein geeignetes Skalenniveau aufweisen zum anderen die Werteverteilung zu unsymmetrisch ist, um durch einen Mittelwert ausreichend beurteilt zu werden. Es sollte daher ein Verfahren gefunden werden, welches die Zustandsqualität des Netzes anhand eines zulässigen Verfahrens quantifizieren kann.
- Neben der Zustandsqualität ist auch die Verteilung des Zustands von besonderer Bedeutung. Eine in der Statistik beliebte Kenngröße, die Standardabweichung, ist ebenso wie der Mittelwert nicht auf ordinalskalierten Werten anwendbar. Für die Quantifizierung der Zustandshomogenität des Netzes sind die derzeit verfügbaren Kenngrößen somit nicht geeignet.

Netzkenngößen für Teilnetze werden in der Praxis vor allem auf der Politikebene verwendet. Hier liegt entsprechend Kapitel 2.3.1 häufig die Aufgabenstellung vor, den Zustand unterschiedlicher Teilnetze miteinander sowie im Bezug zum Gesamtnetz zu vergleichen. Dies kann, wie im Fall der Mittelwerte, dadurch erfolgen, dass ein Absolutwert berechnet wird, der mit anderen Absolutwerten verglichen werden kann. Hierbei ergibt sich grundsätzlich das Problem, dass mit wenigen Ausnahmen bislang keine physikalisch-ingenieurtechnischer Wert einer Zustandsgröße oder eines Zustandswertes bestimmt werden konnte, der eine absolute Beurteilung des Zustands zulässt. Aufgrund dieses Mangels wurde beispielsweise in einer aktuellen, umfassenden Studie zur Einführung einer praxisnahen Bewertung [45] darauf verzichtet, Begründungen für Warn- und Schwellenwerte zusammenzustellen und es wurden aus Vergleichbarkeitsgründen alte Grenzwerte für Normierung beibehalten, während die Normierungsfunktionen vereinfacht wurden. Es wurde in [45] aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die gewählten Normierungsgrenzen nicht fundiert sind.

Im internationalen Vergleich zeigt es sich zudem, dass die Bewertung eines Straßenzustands sehr stark durch das Anforderungsniveau geprägt ist, welches von einer Reihe von Faktoren, wie z.B. bestehender Zustand oder politische Zielsetzungen beeinflusst werden kann. In verschiedenen Studien, auch in Deutschland und Österreich wurden zwar Ansätze entwickelt, die eine absolute Bewertung des Zustands anhand objektiver Kriterien (z.B. durch Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für Erhaltung bzw. Unfall- und Betriebskosten) gewährleisten sollen. Aber auch diese Ergebnisse hängen sehr stark von zeitlichen und örtlichen Gegebenheiten ab und verlieren teilweise ihre Gültigkeit, sobald wesentliche Veränderungen in der Fahrzeugtechnik (z.B. unfallsichere Fahrzeuge), in der Bautechnik (z.B. kostengünstigere Erhaltungsmaßnahmen) oder

aber auch in der Verantwortungszuordnung (z.B. durch höhere Sicherheitsanforderungen an privatisierten Strecken) auftreten. Grundsätzlich ergibt sich stets das Problem, dass die Einführung eines absoluten Bewertungshintergrunds je nach Wertebild der Entscheidungsträger variieren kann.

Aus diesen Gründen soll in den nachführenden Konzepten darauf verzichtet werden, einen weiteren Ansatz für die Bestimmung einer Absolutkenngröße zu erarbeiten. Vielmehr soll angestrebt werden, einen Wert zu bestimmen, welcher eine Werteverteilung von Absolutkenngrößen quantifiziert. Aufgrund der Fragestellungen der Politik-ebene soll der Wert bereits eine Relativbeurteilung beinhalten, so dass er eine Aussage zu einem Teilnetz stets in Bezug auf ein Gesamtnetz erlaubt.

Nachfolgend soll daher ein alternatives Verfahren zur relativen Beurteilung des Zustands und der Zustandsverteilung des Netzes erarbeitet werden. Die Basis dieses Ansatzes bildet die Quantilenanalyse. Im Gegensatz zur Mittelwertbildung und der Ermittlung der Standardabweichung ist es sehr wohl zulässig, Quantile, wie z.B. den Median sowohl für Werte einer Ordinalskala als auch einer Intervallskala zu ermitteln. Diese Operation wäre für Zustandswerte somit in jedem Fall mathematisch korrekt und kann daher in den weitergehenden Auswertungen genutzt werden.

## 9.2 Quantilenbasierte Analyse des relativen Zustandsniveaus

Durch die quantilenbasierte Analyse des Zustands ergibt sich die Möglichkeit, das relative Zustandsniveau eines Teilnetzes, also z.B. eines Bundeslandes in Bezug auf das Gesamtnetz zu quantifizieren. Es sollen zunächst die mathematischen Grundlagen vorgestellt werden.

### 9.2.1 Quantile und Mächtigkeiten

Zur Durchführung der Quantilenanalyse ist es zunächst notwendig, den Umfang der Gesamtmenge  $A$  und der darin enthaltenen Teilmengen  $a_1, a_2, a_3$ , usw. zu definieren. Es soll also gelten:  $a_1 \subseteq A$ ,  $a_2 \subseteq A$ ,  $a_3 \subseteq A$ <sup>17</sup>, usw.

Da für die vorliegende Arbeit die Untersuchung des Straßenzustands auf Netzebene im Vordergrund steht, sollen in den nachfolgenden Beispielen das Gesamtnetz einer Erfassung als Gesamtmenge und die Teilnetze einzelner Bundesländer als Teilmengen gewählt werden. Bei kleineren Erfassungsnetzen können selbstverständlich entsprechend andere administrative Grenzen gewählt werden, z.B. ein Landesnetz als Gesamtmenge und die Netze der nachgeordneten Straßenbauämter als Teilnetze. Bei der Quantilenanalyse sollten nur Abschnitte berücksichtigt werden, zu denen gültige Messdaten vorliegen, so dass die Menge  $A$  aus allen gültigen Abschnitten eines Erfassungsnetzes gebildet wird. Für den ersten Ansatz soll zudem zunächst die Annahme gelten, dass alle Elemente der Menge  $A$  gleichermaßen zu gewichten sind, d.h. dass

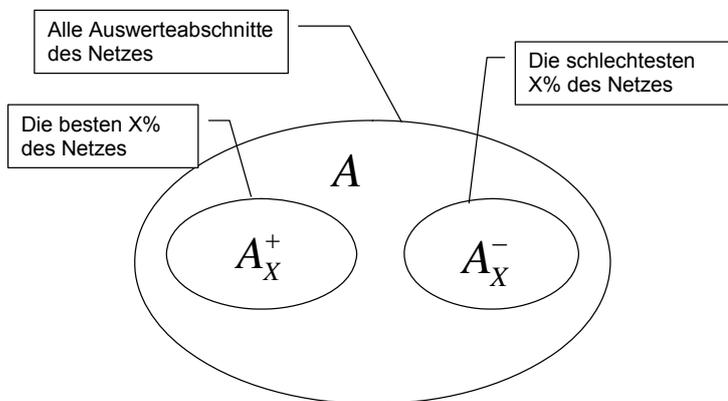
---

<sup>17</sup> Das Symbol  $\subseteq$  hat die Bedeutung „ist Teilmenge von“.

von Abschnitten mit gleicher Länge bzw. gleicher Fläche ausgegangen werden soll. Dies ist in der Praxis, insbesondere bei den Beispieldaten aus Österreich nicht gegeben, erleichtert aber die Herleitung des Verfahrens. Die Vorgehensweise zur Berücksichtigung einer Gewichtung wird im Kapitel 9.2.7 vorgestellt.

Da das hier vorgestellte Verfahren das relative, quantilenbasierte Zustandsniveau  $Q_i$  eines Teilnetzes  $a_i$  gegenüber dem Gesamtnetz  $A$  quantifiziert, ist eine vollständige Aufteilung des Gesamtnetzes nicht notwendig. Da die Beziehung zwischen den Teilnetzen nicht bei der Auswertung berücksichtigt wird, ist es darüber hinaus auch zulässig, dass sich die Teilnetze überlappen.

Die Analyse wird jeweils für ein ausgewähltes Zustandsmerkmal durchgeführt. Dies kann sowohl eine Zustandsgröße, als auch ein Zustandswert sein. Dieses Merkmal dient der Ermittlung zustandsbezogen „guter“ und „schlechter“ Teilmengen des Gesamtnetzes  $A$ . Die Bildung der Teilmengen erfolgt dadurch, dass für ein gewähltes Quantil (z.B. 5 %-Quantil<sup>18</sup> oder 3 %-Quantil) der Merkmalswert  $Z_X^-$  gefunden wird, der die schlechtesten  $X$  % des Gesamtnetzes abgrenzt. Für die nachfolgende Darstellung der Zusammenhänge wird zunächst davon ausgegangen, dass hohe Merkmalswerte einen schlechten Zustand bedingen, d.h. im Regelfall haben  $X$  % (oder mehr) des Netzes einen Wert  $\geq Z_X^-$ . Analog hierzu wird der Merkmalswert  $Z_X^+$  ermittelt, der die  $X$  % besten Werte abgrenzt. Die durch den Prozentwert  $X$  abgegrenzten Teilmengen erhalten die Bezeichnung  $A_X^+$  und  $A_X^-$  (siehe Abbildung 78).



**Abbildung 78: Ermittlung der Teilmengen  $A_X^+$  und  $A_X^-$**

Da die Teilmengen  $A_X^+$  und  $A_X^-$  ausschließlich aufgrund des Zustands gebildet wurden, sind sie nicht direkt abhängig von der Festlegung der Teilmengen  $[a_1, a_2, \dots, a_n]$ , welche aufgrund von administrativen Grenzen gebildet wurden. Im Regelfall ergeben sich somit zwischen einem administrativ begrenzten Teilnetz  $a_i$  und den qualitätsbe-

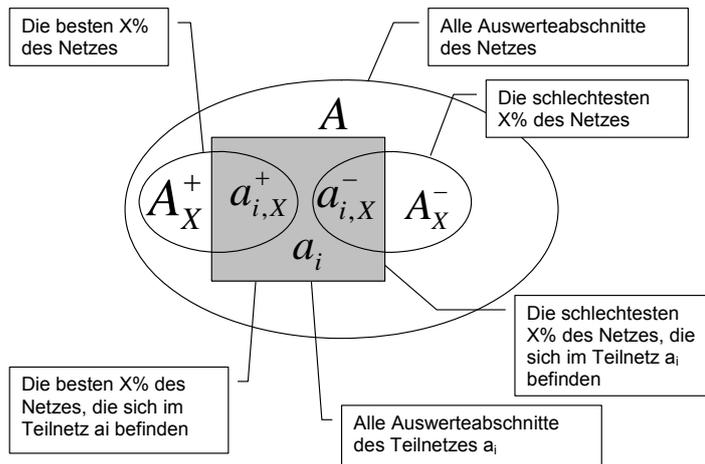
---

<sup>18</sup> Anstatt 5 %-Quantil wird auch der Begriff „0,05-Quantil“ oder „5tes Perzentil“ häufig angewendet.

grenzten Teilnetzen  $A_X^+$  und  $A_X^-$  Schnittmengen. Diese Schnittmengen müssen bestimmt werden und erhalten die Bezeichnungen  $a_{i,X}^+$  und  $a_{i,X}^-$ . Es gilt daher:

$$a_{i,X}^+ = A_X^+ \cap a_i \quad \text{und} \quad a_{i,X}^- = A_X^- \cap a_i \quad 19$$

Die Ausgangsmengen und die entstehenden Schnittmengen sind in der Abbildung 79 dargestellt.



**Abbildung 79: Bildung der Schnittmengen zum administrativ abgegrenzten Teilnetz  $a_i$**

Die „Mächtigkeit“ oder auch „Kardinalität“ einer (endlichen) Menge bezeichnet die Anzahl der Elemente in dieser Menge. Zur mathematischen Beschreibung werden Betragstriche verwendet, so dass beispielsweise  $|A|$  die Anzahl der Elemente in der Menge  $A$  bezeichnet, d.h. die Anzahl der Auswerteabschnitte des gesamten Netzes.

Für die obige Einteilung des Netzes in Teilmengen lassen sich Erwartungsgrößen<sup>20</sup> für die Mächtigkeiten  $a_{i,X}^+$  und  $a_{i,X}^-$  bestimmen. Falls die Verteilung des betrachteten Zustandsmerkmals im administrativ begrenzten Teilnetz  $a_i$  der Verteilung im Gesamtnetz entspricht, ist zu erwarten, dass die Mächtigkeiten  $|a_{i,X}^+|$  und  $|a_{i,X}^-|$  genau X% der Mächtigkeit  $|a_i|$  betragen. Es können somit die beiden Erwartungsgrößen  $E_{i,X}^+$  und  $E_{i,X}^-$  bestimmt werden.

$$E_{i,X}^+ = \frac{x}{100} \cdot |a_i| \quad \text{und} \quad (9.1)$$

<sup>19</sup> Die Operation  $A \cap B$  hat in der Mengenlehre die Bedeutung „A geschnitten mit B“ oder „Durchschnitt von A und B“. Der Begriff „Schnittmenge“ wird mathematisch beim Verschneiden beliebig vieler Mengen verwendet, kann daher auch wie im vorliegenden Fall den Durchschnitt zweier Mengen bedeuten.

<sup>20</sup> Der Begriff „Erwartungsgröße“ wurde hier in Anlehnung an den mathematischen Begriff „Erwartungswert“ gewählt. Falls angenommen wird, dass die Verteilung des Gesamtnetzes  $A$  und des Teilnetzes  $a_i$  identisch wäre, wäre es tatsächlich ein Erwartungswert.

$$E_{i,X}^- = \frac{x}{100} \cdot |a_i| \quad (9.2)$$

Die beiden Werte  $E_{i,X}^+$  und  $E_{i,X}^-$  sind somit identisch, was aber nicht für die tatsächlichen Mächtigkeiten der Mengen  $a_{i,X}^+$  und  $a_{i,X}^-$  gilt.

### 9.2.2 Qualität eines Teilnetzes für ein gewähltes Quantil

Anhand der Zusammenstellung der Quantile und der Ermittlung der Mächtigkeiten liegt für das zu untersuchende Teilnetz  $a_i$  sowohl eine theoretische errechnete Erwartungsgröße als auch ein durch Zählung bestimmter Wert für die Anzahl der „schlechten“ bzw. „guten“ Abschnitte vor. Anhand dieser Werte lässt sich eine quantilenbasierte Qualität des Netzes bestimmen. Nachfolgend soll die Betrachtung zunächst nur für die „schlechten“ Abschnitte erfolgen, d.h. für die Mengen  $a_{i,X}^-$  und  $A_X^-$  sowie für die Erwartungsgröße  $E_{i,X}^-$ . Da das hier zu erarbeitende Verfahren weitestgehend frei von subjektiven Festlegungen sein soll, sollen zwar beide Datengruppen gleichermaßen in der Betrachtung berücksichtigt werden, es kann aber weiter unten (siehe 9.2.5) gezeigt werden, dass die Betrachtung der „guten“ Abschnitte zum identischen Auswertergebnis führen wird.

Die Differenz aus der erwarteten Mächtigkeit und der durch Zählung bestimmten Mächtigkeit kann als Kriterium für die Qualität eines Teilnetzes verwendet werden. Da diese Differenz von der Größe des betrachteten Teilnetzes abhängt, soll sie durch Division durch die Mächtigkeit des Teilnetzes auf eine vergleichbare Größe gebracht werden.

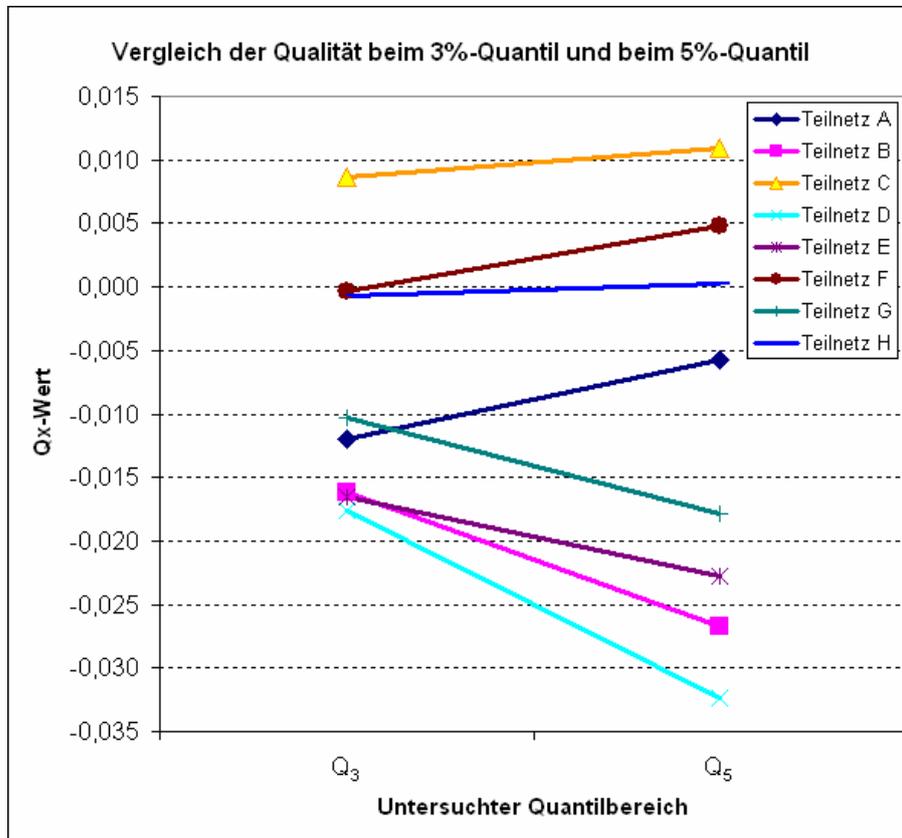
$$Q_{i,X} = \frac{E_{i,X}^- - |a_{i,X}^-|}{|a_i|} \quad (9.3)$$

Das Ergebnis ist ein Wert, der ausdrückt, ob verhältnismäßig viele oder verhältnismäßig wenige der „schlechten“ Abschnitte im betrachteten Teilnetz enthalten sind. Bei einem  $Q_{i,X}$ -Wert von genau 0 entspricht die vorgefundene Anzahl den Erwartungen. Ein positiver Wert für  $Q_{i,X}$  zeigt, dass verhältnismäßig wenig schlechte Abschnitte vorhanden sind und das Teilnetz somit hinsichtlich dieses Kriteriums besser ist, als zu erwarten gewesen wäre. Ein negativer Wert für  $Q_{i,X}$  zeigt dagegen, dass der Abschnitt schlechter ist, als erwartet.

Die Größe  $Q_{i,X}$  ist somit eine vergleichbare Kennzahl für die relative Qualität des Teilnetzes  $a_i$ . Falls diese Kennzahl zur Beurteilung eines Netzes genutzt werden soll, wäre es aber zunächst notwendig zu entscheiden, welches X%-Quantil zu verwenden ist.

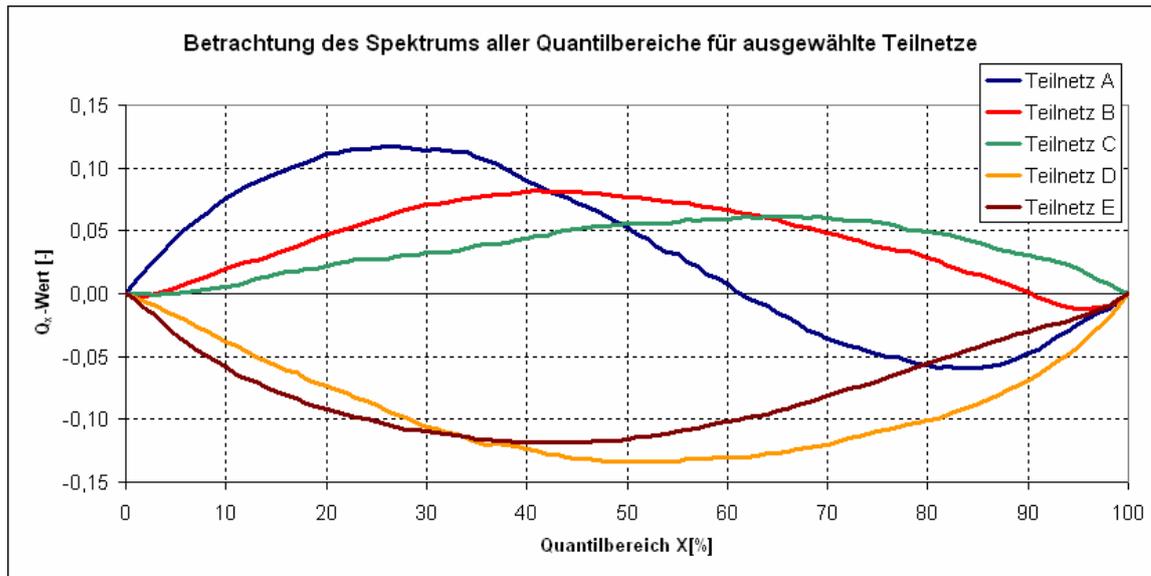
Bei einer Untersuchung an einer realen Datenmenge zeigt sich schnell, dass die Wahl des Quantils einen entscheidenden Einfluss auf die Reihung der Teilnetze und auf das

Verhältnis der Qualitäten untereinander hat. Als Beispiel wurden für die Teilnetze einiger ausgewählter Bundesländer einer realen ZEB-Jahresmessung der  $Q_{i,3}$ -Wert und der  $Q_{i,5}$ -Wert, d.h. der Qualitätswert des 3 %-Quantils und des 5 %-Quantils bestimmt und in der Abbildung 80 dargestellt. Der Länderindex  $i$  wurde aus Übersichtsgründen entfernt.



**Abbildung 80: Vergleich der Qualitäten  $Q_3$  und  $Q_5$  an einer realen, anonymisierten Datenmenge**

Die Auswertergebnisse der beiden Quantilen wurden für jedes Teilnetz mit einer Geraden verbunden. Es zeigt sich, dass sowohl die Position eines Teilnetzes innerhalb einer Reihung wechselt als auch dass die Abstände zwischen den Positionen sehr stark schwanken. Diese Aussage gilt auch bei der Betrachtung anderer Quantilen, was anhand der Grafik aus Abbildung 81 verdeutlicht wird.



**Abbildung 81: Betrachtung aller ganzzahligen Quantile für mehrere Teilnetze**

Die Auswahl der Teilnetze A-E weicht gegenüber der vorherigen Abbildung ab, um exemplarisch sehr unterschiedliche, reale Kurvenverläufe einer ZEB-Jahresmessung darzustellen. Es wird deutlich, dass die Festlegung auf ein bestimmtes X-Quantil und somit auf einen bestimmten Qualitätswert  $Q_{i,X}$  nicht mit der gewünschten Objektivität des Verfahrens vereinbart werden kann.

Die obige Abbildung erlaubt bereits einige interessante Aussagen zu den einzelnen Teilnetzen. In der Abbildung kann die Nulllinie als die Verteilung des Gesamtnetzes interpretiert werden. Da die Linie des Teilnetzes D nach unten gewölbt ist, beinhaltet dieses Teilnetz bei jedem beliebigen Quantilbereich übermäßig viele „schlechte“ Strecken, ist also auch insgesamt schlechter als das Gesamtnetz. Im Gegensatz dazu enthält das Teilnetz C übermäßig wenig „schlechte“ Strecken und wölbt sich daher in den positiven Bereich. Eine Besonderheit ist bei dem Teilnetz A zu beobachten. Dieses Teilnetz enthält in den „sehr schlechten“ Bereichen (z.B. in den 0 % bis 20 % der schlechten Strecken, also den Quantilbereichen 0 % bis 20 %) übermäßig wenig Abschnitte. Es enthält aber auch gleichzeitig übermäßig wenig der „guten“ Abschnitte. Im Vergleich zum Gesamtnetz weist es also deutliche Inhomogenitäten auf, so dass ein Urteil über die Gesamtqualität (in Bezug auf das Gesamtnetz) aufgrund der Betrachtung aller Quantile erfolgen sollte.

### 9.2.3 Zusammengefasste Qualität für alle Qualitätsbereiche

Da die alleinige Betrachtung eines einzelnen Quantils nicht ausreichend objektiv ist, liegt es nahe, das gesamte Spektrum aller ganzzahligen Quantilen und somit aller Qualitätszahlen  $Q_{i,1}, Q_{i,2}, \dots, Q_{i,100}$  zu untersuchen und zusammenzufassen. Durch die Beschaffenheit der Qualitätszahlen  $Q_{i,X}$  ist es möglich, durch einfache Addition über alle einhundert Quantilen eine repräsentative Kennzahl  $Q_i$  zu erhalten.

$$Q_i = \sum_{X=1}^{100} Q_{i,X} = \sum_{X=1}^{100} \frac{E_{i,X}^- - |a_{i,X}^-|}{|a_i|} \quad (9.4)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (9.2) für die Erwartungsgröße entsteht ein Term, der ausschließlich die Mächtigkeiten der jeweiligen Mengen verwendet.

$$Q_i = \sum_{X=1}^{100} Q_{i,X} = \sum_{X=1}^{100} \frac{\frac{X}{100} \cdot |a_i| - |a_{i,X}^-|}{|a_i|} \quad (9.5)$$

Der  $Q_i$ -Wert entspricht dem Integral unter der Kurve aus Abbildung 81 und setzt sich somit aus der Fläche zwischen Kurve und X-Achse zusammen, wobei Flächen oberhalb der X-Achse positiv und Flächen unterhalb der X-Achse negativ gezählt werden. Diese Kennzahl charakterisiert auf Basis der Quantilanalyse die Qualität eines Teilnetzes  $a_i$  in Bezug auf das Gesamtnetz A und kann als objektive Vergleichsgröße verwendet werden. Es zeigt sich, dass durch das gewählte Verfahren diese Kennzahl verschiedene Eigenschaften aufweist, welche die Anwendbarkeit erleichtern und die Aussagefähigkeit stärken.

- Die Qualitätszahl  $Q_i$  kann für jedes Teilnetz  $a_i$  innerhalb des Gesamtnetzes A ermittelt werden. Die Mächtigkeit der anderen Mengen, z.B. des Gesamtnetzes oder benachbarter Teilnetze haben auf  $Q_i$  keinen direkten Einfluss. Entscheidend ist ausschließlich die Verteilung des gereihten Zustands, welcher die Mächtigkeit der Schnittmengen bestimmt.
- Dadurch, dass der Zuschnitt eines Teilnetzes  $a_i$  nicht die Auswertung der Kennzahl  $Q_i$  eines anderen Teilnetzes  $a_j$  beeinflusst, können Teilnetze beliebig gebildet und dennoch miteinander verglichen werden, solange gilt, dass alle Teilnetze jeweils eine Teilmenge von A sind ( $a_i \subseteq A$  und  $a_j \subseteq A$ ). Dies bedeutet insbesondere, dass es zulässig ist, Teilnetze zu überlappen. Dadurch ist es beispielsweise möglich, die Qualität aller Strecken im Osten der Bundesrepublik mit der Qualität eines östlichen Bundeslandes zu vergleichen, sofern der Bezug der beiden Netze das gesamte Bundesgebiet bleibt.
- Das Verfahren verwendet die Zustandsverteilung des gesamten Netzes. Bisherige Quantilenanalysen, bei denen beispielsweise die „schlechtesten“ 5 % des Netzes ermittelt und ausgewertet wurden, haben nur einen Teil der Datenverteilung berücksichtigt. Dies wurde bisher als eine subjektive Festlegung empfunden und kann durch den hier vorgestellten Ansatz vermieden werden.
- In der bisher vorgestellten Betrachtung wurden ausschließlich Quantile anhand der „schlechtesten“ Strecken gebildet. Weiter unten im Kapitel 9.2.5 kann aber gezeigt werden, dass zwangsläufig das gleiche Ergebnis erzielt wird, wenn das

gleiche Verfahren für die Quantile der „besten“ Strecken angewendet wird. Dies unterscheidet diese Analyseform ebenfalls gegenüber bisher eingesetzten quantilenbasierten Zustandsanalysen und erlaubt somit eine weitere, zuvor notwendige, subjektive Festlegung zu vermeiden.

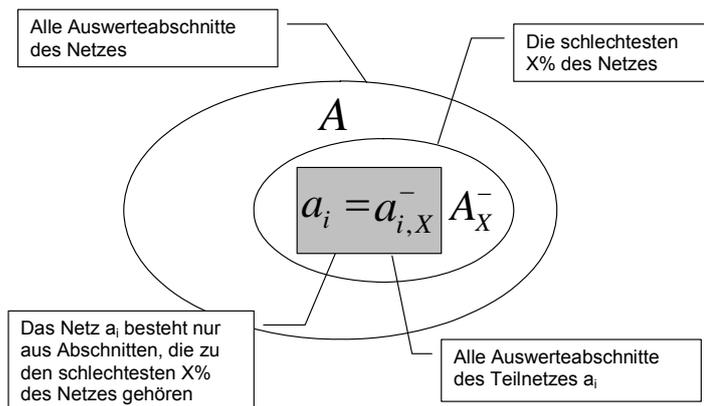
- Durch die konsequente Anwendung des Verfahrens auf mehrere Quantile zwischen 0 % und 100 %, ist es legitim, dieses Verfahren auch auf Zustandswerte anzuwenden. Hierbei müssen einige Besonderheiten beachtet werden, die aufgrund der ordinalskalierten Zustandswerte zu Problemen bei der Bestimmung der Mächtigkeit der Schnittmengen führen. Hierauf wird im Kapitel 9.2.6 weiter eingegangen.
- Die Bestimmung des Erwartungswertes und der Mächtigkeiten wurde, wie in der Mengenlehre vorgegeben, anhand der Anzahl der Elemente bestimmt. In der Praxis der Erhaltungsplanung ist es aber notwendig, die Qualitäten nicht nach der Anzahl der Auswerteabschnitte, sondern nach Länge oder Fläche der Erhaltungstrecke zu gewichten. Das hier vorgestellte Verfahren kann und soll mit entsprechenden Längen bzw. Flächengewichten angewendet werden. Bereits die weiter oben aufgeführte Beispielauswertung in Abbildung 80 wurde mit einer Streckengewichtung durchgeführt. Die entsprechende mathematische Definition des Verfahrens wird im Kapitel 9.2.7 erläutert.
- Es fällt auf, dass die einzelnen  $Q_x$  Werte zum Teil überschneidenden Inhalt haben. So ist beispielsweise in der  $Q_5$ -Menge auch die  $Q_4$ -Menge vollständig enthalten, da die „schlechtesten“ 4 % auch ein Bestandteil der „schlechtesten“ 5 % eines Teilnetzes sind. Es gehen somit die „schlechtesten“ Abschnitte wesentlich häufiger in die Gesamt-Qualitätszahl  $Q$  ein, als die besseren Abschnitte. Dieser Effekt ist beabsichtigt und führt zu einer Gewichtung der schlechten Abschnitte.
- Es ist zudem zu erwähnen, dass unterschiedliche Verläufe der  $Q_x$ -Werte gemäß Abbildung 81 zu identischen Qualitätszahlen führen können, sofern das Integral unter der Kurve gleich ist. Bei der Bildung der Qualitätszahl geht somit ein Teil der Informationen über die Zustandsverteilung verloren. Dieser Sachverhalt gilt aber für jeden Ansatz, bei dem eine einzige Kennzahl aus einer Verteilung gebildet werden soll.

Weiterhin ist zu vermerken, dass die Qualitätszahl  $Q_i$  einen begrenzten Wertebereich hat. Das Maximum ( $Q_{\max} = 49,5$ ) wird dann erreicht, wenn in einem Teilnetz alle Strecken zu den „besten“ 1 % des Gesamtnetzes gehören, d.h. wenn  $|a_{i,x}^-| = 0$  für  $X=1$  bis 99 und  $|a_{i,100}^-| = |a_i|$ . Umgekehrt wird das Minimum ( $Q_{\min} = -49,5$ ) dann erreicht, wenn alle Strecken den schlechtesten  $X$  % zugeordnet werden, d.h. wenn  $|a_{i,x}^-| = |a_i|$  für alle  $X$ . Beide Fälle sind nur dann möglich, wenn das Teilnetz ausreichend klein ist, d.h. wenn es maximal 1 % des Gesamtnetzes einnimmt (siehe 9.2.4).

Grundsätzlich besteht die Tendenz, dass je größer ein Teilnetz  $a_i$  gegenüber dem Gesamtnetz  $A$  wird, desto geringer die Spannweite wird, die der Wert  $Q_i$  annehmen kann. Besteht der Sonderfall, dass das Teilnetz  $a_i$  exakt mit dem Gesamtnetz  $A$  übereinstimmt so kann  $Q_i$  nur den Wert 0 annehmen. Dieses Verhalten ist nachvollziehbar und sinnvoll. Da  $Q_i$  die Qualität eines Teilnetzes in Bezug auf das Gesamtnetz ausdrücken soll, kann der Wert umso weniger extreme Größen annehmen, umso mehr das Teilnetz mit dem Gesamtnetz übereinstimmt. Hierauf wird auch im Kapitel 9.3 durch exemplarische Modellrechnungen eingegangen.

### 9.2.4 Wertebereiche

Um den Wertebereich für die Qualitätszahl  $Q_i$  näher untersuchen zu können, sollen zunächst die Wertebereiche der Summanden  $Q_{i,X}$  betrachtet werden. Der mögliche Wertebereich für  $Q_{i,X}$  hängt davon ab, welches X-Quantil gewählt wurde und wie groß der Anteil des Teilnetzes  $a_i$  am Gesamtnetz  $A$  ist. Der ungünstigste Fall ist der, dass das komplette Teilnetz  $a_i$  in den Bereich  $A_X^-$  der schlechtesten X% des Gesamtnetzes fällt (siehe Abbildung 82).



**Abbildung 82: Skizze für Extremfall: Alle Abschnitte von  $a_i$  gehören zu den schlechtesten X%**

Der Fall  $a_i = a_{i,X}^-$  kann aber nur dann auftreten, wenn das Teilnetz  $a_i$  ausreichend klein ist, d. nur dann wenn gilt:

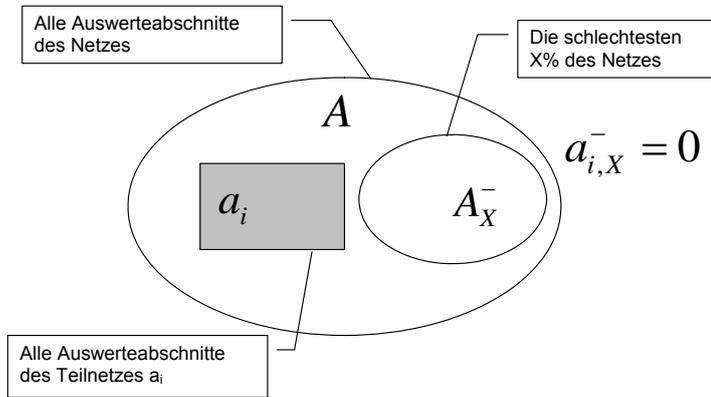
$$|a_i| \leq |A| \cdot \frac{X}{100} \quad (9.6)$$

In diesem Fall kann  $Q_{i,X}$  einen Wert annehmen, dessen Absolutbetrag stets unter 1 liegt und direkt von der Höhe von X abhängt.

$$Q_{i,X,\min} = \frac{|a_i| \cdot \frac{X}{100} - |a_i|}{|a_i|} = \frac{X}{100} - 1 \quad (9.7)$$

Beispiel:  $Q_{i,3,\min} = -0,97$ ;  $Q_{i,5,\min} = -0,95$ ;  $Q_{i,10,\min} = -0,90$ ; usw.

Umgekehrt kann  $Q_{i,X}$  dann einen maximalen Wert annehmen, wenn das Teilnetz überhaupt keine Überschneidung mit den schlechtesten X% des Gesamtnetzes hat (siehe Abbildung 83).



**Abbildung 83. Skizze für Extremfall: Kein Abschnitt von  $a_i$  gehört zu den schlechtesten X%**

Auch für den Fall  $a_{i,X}^- = 0$  muss eine Bedingung hinsichtlich der maximalen Netzgröße für  $a_i$  eingehalten werden.

$$|a_i| \leq |A| \cdot \left(1 - \frac{X}{100}\right) \quad (9.8)$$

Der Maximalwert für  $Q_{i,X}$  beträgt in diesen Fällen:

$$Q_{i,X,\max} = \frac{|a_i| \cdot \frac{X}{100} - 0}{|a_i|} = \frac{X}{100} \quad (9.9)$$

Beispiel:  $Q_{i,3,\max} = 0,03$ ;  $Q_{i,5,\max} = 0,05$ ;  $Q_{i,95,\max} = 0,95$ ; usw.

Der Wertebereich für die quantilenübergreifende Qualitätszahl  $Q_i$  ergibt sich unmittelbar aus diesen Überlegungen. Falls für alle gewählten X (also auch für das 1 %-Quantil) die Bedingung aus Gleichung (9.6) gilt, kann unter Anwendung der arithmetischen Reihenbildung aus Gl. (9.11) der folgende kleinste Wert  $Q_{i,\min}$  gebildet werden:

$$Q_{i,\min} = \sum_{X=1}^{100} \left(\frac{X}{100} - 1\right) = \frac{1}{100} \cdot \sum_{X=1}^{100} X - \sum_{X=1}^{100} 1 = \frac{1}{100} \cdot \frac{100 \cdot (100+1)}{2} - 100 = -49,5 \quad (9.10)$$

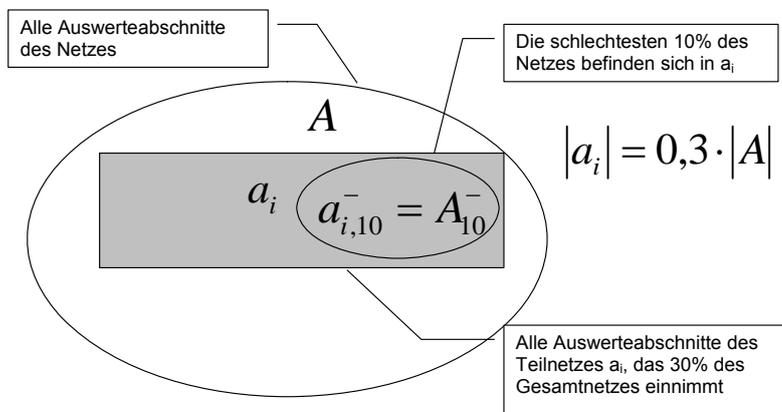
da für die arithmetische Reihe gilt:  $1 + 2 + 3 + \dots + n = \sum_{X=1}^n X = \frac{n(n+1)}{2} \quad (9.11)$

Für die Ermittlung des maximalen Wertes für  $Q_i$  kann für  $X=1$  bis 99 der Sonderfall angenommen werden, dass keiner der Abschnitte des Teilnetzes  $a_i$  in den schlechtesten  $X\%$  des Gesamtnetzes enthalten ist, d.h. der Wert  $|a_{i,X}^-|$  wird zu 0. Für das letzte Quantil mit  $X=100$  muss allerdings die Größe  $|a_{i,X}^-|$  den Wert  $|a_i|$  annehmen, da das Teilnetz definitionsgemäß vollständig in den 100 % schlechtesten Strecken (d.h. im kompletten Gesamtnetz) enthalten sein muss. Unter Berücksichtigung der Gleichung (9.11) zur Bildung der arithmetischen Reihe kann der Maximalwert  $Q_{i,\max}$  bestimmt werden:

$$Q_{i,\max} = \sum_{X=1}^{99} \frac{X}{100} + \frac{|a_i| \cdot \frac{100}{100} - |a_i|}{|a_i|} = \frac{1}{100} \cdot \frac{99 \cdot (99+1)}{2} + 0 = 49,5 = Q_{i,\min} \cdot (-1) \quad (9.12)$$

Es wurde somit gezeigt, dass für den Fall, dass das Teilnetz  $a_i$  maximal 1 % des Gesamtnetzes annimmt, der Wertebereich für  $Q_i$  zwischen -49,5 und +49,5 liegt. Es stellt sich die Frage, wie sich der Wertebereich bei größeren Teilnetzen verändert.

Hierfür muss zunächst wieder auf die Summanden  $Q_{i,X}$  eingegangen werden. In der Abbildung 84 ist hierzu exemplarisch ein Fall skizziert, bei dem das Teilnetz  $a_i$  genau 30 % des Gesamtnetzes enthalten soll.



**Abbildung 84: Skizze: Alle 10 % der schlechtesten Abschnitte des Netzes A gehören zum Teilnetz  $a_i$ , welches aber 20 % des Gesamtnetzes einnimmt.**

Es sollen die schlechtesten 10 % des Gesamtnetzes untersucht werden. Der ungünstigste Fall entsteht dadurch, dass alle diese Abschnitte sich im Teilnetz  $a_i$  befinden. Der Wert für  $|a_{i,10}^-|$  kann aber nur ein Drittel (10 % von 30 %) von  $|a_i|$  betragen. Für die weitere Betrachtung soll ein neuer Wert  $\alpha$  eingeführt werden, der den Anteil des Teilnetzes  $a_i$  am Gesamtnetz  $A$  quantifiziert.

$$\alpha_i = \frac{|a_i|}{|A|} \cdot 100 \quad (9.13)$$

Im vorliegenden Beispiel beträgt  $\alpha_i = 30$  und für  $Q_{i,10}$  ergibt sich somit ein Minimalwert von:

$$Q_{i,10,\min} = \frac{\frac{10}{100} \cdot |a_i| - \frac{1}{3} \cdot |a_i|}{|a_i|} = \frac{10}{100} - \frac{1}{3} = -0,2\bar{3} \quad (9.14)$$

Oder allgemein für jedes beliebige  $Q_{i,X}$  :

$$Q_{i,X,\min} = \frac{\frac{X}{100} \cdot |a_i| - \frac{X}{\alpha} |a_i|}{|a_i|} = \frac{X}{100} - \frac{X}{\alpha} \quad (9.15)$$

Die Gleichung (9.15) gilt nur für den Fall, dass das Teilnetz zu groß ist, d.h. Nur dann wenn die nachfolgende Gleichung gilt.

$$\frac{X}{100} \leq \frac{|a_i|}{|A|} \quad \text{bzw.} \quad X \leq \alpha \quad (9.16)$$

Andernfalls gilt für  $Q_{i,X,\min}$  wieder die Gleichung aus (9.6). Für die Qualitätszahl  $Q_i$  ergibt sich also zusammenfassend der nachfolgende Minimalwert.

$$\begin{aligned} Q_{i,\min} &= \sum_{X=1}^{\alpha} \left( \frac{X}{100} - \frac{X}{\alpha} \right) + \sum_{X=\alpha+1}^{100} \left( \frac{X}{100} - 1 \right) = \sum_{X=1}^{100} \frac{X}{100} - \sum_{X=1}^{\alpha} \frac{X}{\alpha} - \sum_{X=\alpha+1}^{100} 1 \\ &= \frac{1}{100} \cdot \frac{100 \cdot (100+1)}{2} - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\alpha \cdot (\alpha+1)}{2} - (100 - \alpha) \\ &= \frac{101}{2} - \frac{(\alpha+1)}{2} - (100 + \alpha) = \frac{101 - \alpha - 1 - 200 - 2\alpha}{2} = \frac{\alpha - 100}{2} \end{aligned} \quad (9.17)$$

$$Q_{i,\min} = \frac{\alpha - 100}{2} \quad (9.18)$$

Der Wert  $\alpha$  soll in der Gleichung (9.17) einen ganzzahligen Wert annehmen, wobei er aus der Gleichung (9.13) immer *aufgerundet* werden soll. Falls die Summenzeichen bei einer Infinitesimalbildung durch Integrale ersetzt werden sollen, entfällt diese Bedingung. In diesem Fall würde bei sehr kleinen Teilnetzen, d.h. bei sehr kleinen Werten für  $\alpha$ , der Minimalwert gegen  $Q_{i,X,\min} = -0,50$  gehen.

$$Q_i = \int_0^{100} Q_{i,x} \cdot dx = \int_0^{100} \frac{X}{100} \cdot \frac{|a_i| - |a_{i,x}^-|}{|a_i|} \cdot dx \quad (9.19)$$

Eine Behandlung des Übergangs zur Infinitesimalrechnung kann aufgrund der durch Auswahlabfrage zu bestimmenden Menge  $a_{i,x}^-$  nicht anschaulich dargestellt werden und würde auch keine fachliche Ergänzung bringen. Es wird daher darauf verzichtet, hierzu eine gesonderte Betrachtung zu vertiefen.

Für den Maximalwert muss aus Symmetriegründen auch hier gelten dass:

$$Q_{i,\max} = Q_{i,\min} \cdot (-1) \quad (9.20)$$

Die Symmetrie wird im nachfolgenden Kapitel 9.2.5 behandelt.

### 9.2.5 Vergleich der „schlechten“ und der „guten“ Quantile

Bei der bisherigen Betrachtung wurde die Qualitätszahl  $Q_i$  ausschließlich aufgrund der Betrachtung der „schlechten“ Quantile  $a_{i,x}^-$  und  $A_x^-$  ermittelt. Es zeigt sich, dass die Durchführung der Analyse aufgrund der „guten“ Quantile  $a_{i,x}^+$  und  $A_x^+$  zum gleichen Ergebnis führt. Die Ursache liegt darin, dass diese Mengen direkt miteinander zusammenhängen. Durch die Festlegung einer bestimmten Menge  $a_{i,x}^-$  wird auch die Komplementärmenge zu  $a_i$  abgegrenzt. Die Bildung einer Komplementärmenge wird mathematisch durch ein „\“ notiert. Die Komplementärmenge von  $a_{i,x}^-$  in Bezug auf die Menge  $a_i$  ist die Menge  $a_{i,100-x}^+$ . Dies wird in der Abbildung 85 skizziert.

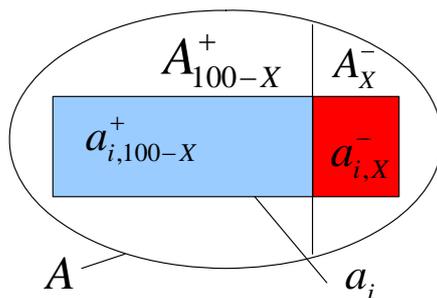


Abbildung 85: Zusammenhang zwischen den Komplementärmengen  $a_{i,x}^-$  und  $a_{i,100-x}^+$

Es gilt somit:

$$a_{i,x}^- \setminus a_i = a_{i,100-x}^+ \quad (9.21)$$

Daraus ergibt sich auch ein Zusammenhang der Mächtigkeiten:

$$|a_{i,X}^-| + |a_{i,100-X}^+| = |a_i|$$

bzw.

$$|a_{i,X}^-| = |a_i| - |a_{i,100-X}^+| \quad (9.22)$$

Die Erwartungsgröße für die Komplementärmenge lautet:

$$E_{i,100-X}^+ = \frac{100-x}{100} \cdot |a_i| = |a_i| - \frac{x}{100} \cdot |a_i| = |a_i| - E_{i,X}^- \quad \text{bzw.}$$

$$E_{i,X}^- = |a_i| - E_{i,100-X}^+ \quad (9.23)$$

Der Qualitätswert  $Q_{i,X}$  eines bestimmten Quantils gemäß Gleichung (9.3) lässt sich somit auch anhand der „guten“ Quantilbereiche durch Einsetzen von (9.22) und (9.23) bestimmen:

$$Q_{i,X} = \frac{E_{i,X}^- - |a_{i,X}^-|}{|a_i|} = \frac{(|a_i| - E_{i,100-X}^+) - (|a_i| - |a_{i,100-X}^+|)}{|a_i|}$$

$$Q_{i,X} = -\frac{E_{i,100-X}^+ - |a_{i,100-X}^+|}{|a_i|} \quad (9.24)$$

Und für den zusammengefassten Qualitätswert  $Q_i$  aller ganzzahligen Quantile gilt:

$$Q_i = \sum_{X=1}^{100} Q_{i,X} = \sum_{X=1}^{100} \frac{E_{i,X}^- - |a_{i,X}^-|}{|a_i|} = \sum_{X=1}^{100} -\frac{E_{i,100-X}^+ - |a_{i,100-X}^+|}{|a_i|}$$

Da über alle 100 Quantile aufsummiert wird, kann auch gesetzt werden:

$$Q_i = \sum_{X=1}^{100} -\frac{E_{i,100-X}^+ - |a_{i,100-X}^+|}{|a_i|} = -\sum_{X=1}^{100} \frac{E_{i,X}^+ - |a_{i,X}^+|}{|a_i|} \quad \text{und dar-}$$

aus:

$$Q_i = \sum_{X=1}^{100} \frac{E_{i,X}^- - |a_{i,X}^-|}{|a_i|} = -\sum_{X=1}^{100} \frac{E_{i,X}^+ - |a_{i,X}^+|}{|a_i|} \quad (9.25)$$

Dies bedeutet, dass die Durchführung der Analyse aufgrund der „schlechten“ Abschnitte zum gleichen Absolutbetrag mit vertauschtem Vorzeichen führt, wie die Auswertung anhand der „guten“ Abschnitte. Dies ist nachvollziehbar, da bei der Differenzbildung der tatsächliche Wert einer Quantilmächtigkeit vom erwarteten Wert abgezogen wird. Ist diese Differenz bei der Betrachtung der „schlechten“ Abschnitte positiv, bedeutet dies, dass weniger „schlechte“ Abschnitte vorhanden sind als erwartet. Das Teilnetz

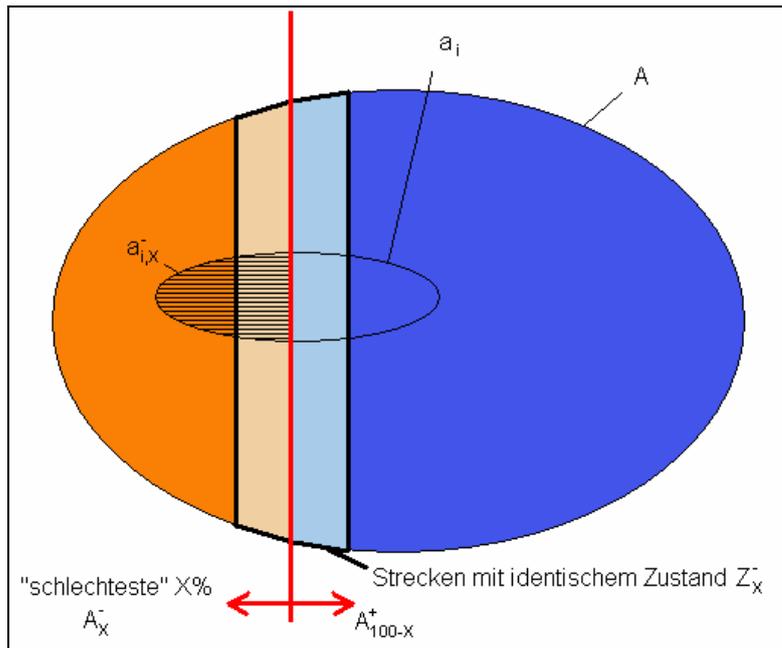
würde demnach eine relativ gute Qualität aufweisen. Für die Betrachtung der „guten“ Abschnitte würde die Differenzbildung in diesem Fall negativ, da mehr „gute“ Abschnitte vorhanden sind als erwartet.

Für die Definition des Qualitätswertes ist es demnach nicht relevant, ob die „guten“ oder „schlechten“ Abschnitte betrachtet werden. Die Ergebnisse dieser beiden Betrachtungsweisen unterscheiden sich nur im Vorzeichen. Da durch die Kennzahl die Qualität ausgedrückt werden soll und es intuitiver erscheint, positive Werte mit guter Qualität gleichzusetzen, wird vorgeschlagen, die Betrachtung der „schlechten“ Abschnitte vorzuziehen.

### **9.2.6 Anwendung des Verfahrens auf Zustandswerte**

Die Ermittlung der quantilenbasierten Qualität für Zustandswerte erfordert einige zusätzliche Überlegungen. Die Betrachtung von Zustandswerten kann unter Umständen das Problem beinhalten, dass größere Teile des Gesamtnetzes mit einem identischen Wert belegt sind. Dieses Phänomen ist eine Folge der begrenzten Werteskala, die in Deutschland beispielsweise dazu führt, dass 47 % aller Griffigkeitswerte der Freien Strecken der Bundesstraßen den Zustandswert 1,0 erhalten. Die obigen Annahmen zur Bildung einer Schnittmenge, allein durch die Überschreitung eines bestimmten Wertes lassen sich somit nicht unverändert übertragen. Es ist zudem zu beachten, dass dieses Phänomen nicht nur bei Zustandswerten, sondern auch bei bestimmten Zustandsgrößen mit Häufungen bestimmter Ausprägungen, z.B. Netzzrisse  $NRI=0$ , auftritt.

Das Problem besteht darin, dass bei einer Häufung eines Wertes  $Z$  nicht eindeutig bestimmt werden kann, welche Abschnitte welchem Quantilbereich zugeordnet werden können. Diese Zuordnung ist aber für die Bildung der Schnittmengen mit den administrativen Teilnetzen von Bedeutung. Dieser Sachverhalt wird in der Abbildung 86 dargestellt.



**Abbildung 86: Schematische Darstellung des Problems einer Häufung identischer Zustände**

Die rote Linie soll die Menge  $A_X^-$ , d.h. ein bestimmtes  $X\%$ -Quantil von „schlechten“ Strecken abgrenzen. Dies ist aber nicht exakt möglich, da zu dieser Menge eine Anzahl von Strecken mit identischem Zustand gehört, die zum Teil auch der Menge  $A_{100-X}^+$  zuzuordnen sind. Die Aufteilung dieser Strecken mit identischem Zustand  $Z$  auf die Mengen  $A_X^-$  und  $A_{100-X}^+$  kann nur willkürlich geschehen. Für die Ermittlung der Qualität ist es aber von Bedeutung die Schnittmenge der Mengen  $A_X^-$  und  $a_{i,X}^-$  abgrenzen zu können, was nur durch eine zusätzliche Annahme erfolgen kann.

Die Lösung kann darin bestehen, dass angenommen wird, dass die Strecken mit identischem Zustand  $Z$  sich im Teilnetz  $a_i$  im gleichen Verhältnis auf  $a_{i,X}^-$  und  $a_{i,100-X}^+$  aufteilen, wie sie sich im Gesamtnetz  $A$  auf  $A_X^-$  und  $A_{100-X}^+$  aufteilen. Rechnerisch bedeutet dies, dass bei der Bestimmung der Mächtigkeit  $|a_{i,X}^-|$  das nachfolgend beschriebene Verfahren angewendet werden muss.

Wie bereits zuvor ist für ein gewähltes  $X\%$ -Quantil die höchstmögliche Größe  $Z_X^-$  zu bestimmen, bei der gilt, dass  $|A| \cdot X$  Abschnitte in  $A$  einen Wert größer oder gleich  $Z_X^-$  aufweisen („größer gleich“ gilt für den Regelfall, falls „schlechte“ Zustände durch hohe Werte ausgedrückt werden). Zu dieser Größe müssen bestimmte Kennzahlen bestimmt werden.

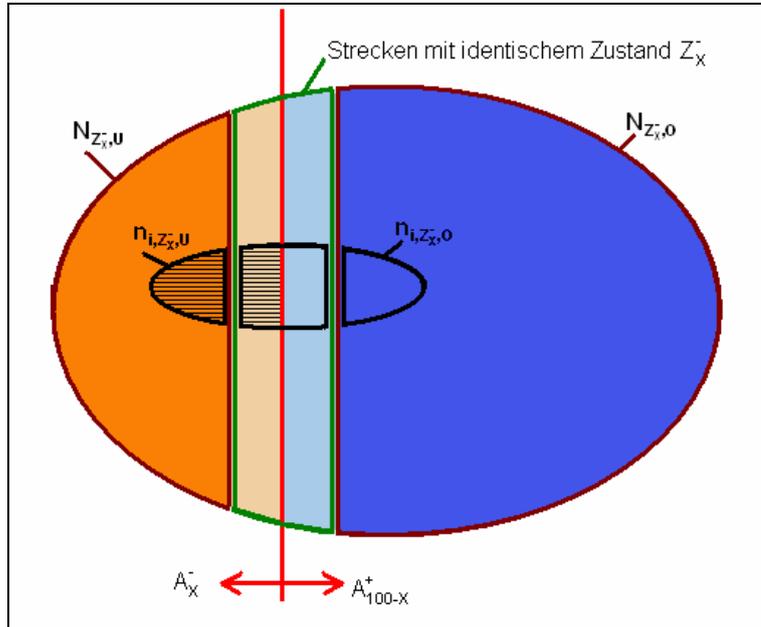
$$N_{Z_X^-,U} : \text{Anzahl aller Abschnitte mit } Z > Z_X^- \text{ in } A \quad (9.26)$$

$$N_{Z_X^-,O} : \text{Anzahl aller Abschnitte mit } Z < Z_X^- \text{ in } A \quad (9.27)$$

$$n_{i,Z_x^-,u} : \text{Anzahl aller Abschnitte mit } Z > Z_x^- \text{ in } a_i \quad (9.28)$$

$$n_{i,Z_x^-,o} : \text{Anzahl aller Abschnitte mit } Z < Z_x^- \text{ in } a_i \quad (9.29)$$

Die mit den Kennzahlen korrespondierenden Mengen sind zur Verdeutlichung in der Abbildung 87 abgegrenzt.



**Abbildung 87: Abgrenzung der relevanten Mengen in Bezug auf den Zustand  $Z_x^-$**

Um die schraffierte Menge  $a_{i,X}^-$  zu bestimmen, muss ein Bezug zum Gesamtnetz  $A$  und zum Teilnetz  $a_i$  hergestellt werden. Die Anzahl der Abschnitte in  $A$ , welche genau den Zustand  $Z_x^-$  aufweisen beträgt:

$$N_{Z_x^-} = |A| - (N_{Z_x^-,u} + N_{Z_x^-,o}) : \text{Anzahl der Abschnitte mit } Z = Z_x^- \text{ in } A \quad (9.30)$$

Entsprechend kann auch die Anzahl der Abschnitte in  $a_i$  mit  $Z = Z_x^-$  bestimmt werden.

$$n_{i,Z_x^-} = |a_i| - (n_{i,Z_x^-,u} + n_{i,Z_x^-,o}) : \text{Anzahl der Abschnitte mit } Z = Z_x^- \text{ in } a_i \quad (9.31)$$

Da der Zustand  $Z_x^-$  sehr häufig vorkommt, würde die Summe aus  $N_{Z_x^-}$  und  $N_{Z_x^-,u}$  höher sein, als die Mächtigkeit der durch den Prozentwert  $X$  abzugrenzende Menge.

$$N_{Z_x^-} + N_{Z_x^-,u} > |A| \cdot \frac{X}{100} \quad \text{ist möglich falls } N_{Z_x^-} \text{ häufig vorkommt} \quad (9.32)$$

Es gilt somit, dass nur ein Teil von  $N_{Z_x^-}$  berücksichtigt werden darf. Dieser Anteil beträgt:

$$p_{Z_x^-} = \frac{|A| \cdot \frac{X}{100} - N_{Z_x^-,U}}{N_{Z_x^-}} : \text{Anteil von } N_{Z_x^-} \text{ der zu } A_x^- \text{ zugeordnet werden soll} \quad (9.33)$$

Dieser Anteil soll auf alle Teilnetze übertragen werden, d.h. dass in jedem Teilnetz  $a_i$  nur ein Anteil von  $p_{Z_x^-}$  der Abschnitte mit  $Z=Z_x^-$  zur Menge  $a_{i,X}^-$  zugeordnet werden dürfen. Hieraus ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung der Mächtigkeit von  $a_{i,X}^-$ .

$$|a_{i,X}^-| = n_{i,Z_x^-,U} + n_{i,Z_x^-} \cdot p_{Z_x^-} \quad (9.34)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (9.33) entsteht:

$$|a_{i,X}^-| = n_{i,Z_x^-,U} + n_{i,Z_x^-} \cdot \frac{|A| \cdot \frac{X}{100} - N_{Z_x^-,U}}{N_{Z_x^-}} \quad (9.35)$$

Falls die Mächtigkeit  $|a_{i,X}^-|$  nur durch den Bezug der Werte (9.26) bis (9.29) auf das Gesamt- und Teilnetz ermittelt werden soll, kann durch Einsetzen der Gleichungen (9.30) und (9.31) auch die folgende Gleichung verwendet werden.

$$|a_{i,X}^-| = n_{i,Z_x^-,U} + \left[ |a_i| - (n_{i,Z_x^-,U} + n_{i,Z_x^-,O}) \right] \cdot \frac{|A| \cdot \frac{X}{100} - N_{Z_x^-,U}}{\left[ |A| - (N_{Z_x^-,U} + N_{Z_x^-,O}) \right]} \quad (9.36)$$

Die Ermittlung der Mächtigkeit  $|a_{i,X}^-|$  nach diesem Verfahren ist, wie eingangs dargestellt, immer dann notwendig, wenn die entsprechende Menge  $a_{i,X}^-$  aufgrund einer Häufung von Abschnitten mit identischem Zustand nicht exakt bestimmt werden kann. Dieser Sachverhalt tritt aufgrund des begrenzten Wertebereichs insbesondere bei Zustandswerten auf, kann aber auch bei Zustandsgrößen vorkommen.

Das weitere Verfahren zur Ermittlung des quantilenbasierten Qualitätswertes bleibt entsprechend Gleichung (9.5) bestehen und muss nicht weiter verändert werden. Es genügt die Mächtigkeit  $|a_{i,X}^-|$  nach dem hier vorgestellten Verfahren zu ermitteln und einzusetzen.

### 9.2.7 Gewichtung des Qualitätswertes $Q$ anhand von Streckenlängen bzw. Flächen

In den bisherigen Betrachtungen wurde zur Bestimmung des Qualitätswertes  $Q_i$  die Anzahl der Abschnitte in den entsprechenden Mengen herangezogen. Diese Vorgehensweise entspricht den mathematischen Definitionen zur Mengenlehre, muss aber aus ingenieurtechnischer Sicht erweitert werden. In der Praxis sind Streckenabschnitte nicht gleich zu gewichten, sondern haben aufgrund ihrer unterschiedlichen Länge und Fläche eine unterschiedliche Bedeutung für das Erhaltungswesen.

Um diese unterschiedliche Bedeutung zu berücksichtigen, ist es zunächst notwendig, einen Gewichtungsfaktor zu definieren. Dies kann je nach Aufgabenstellung unterschiedlich sein. Für Analysen des Erhaltungsbedarfs wäre eine Gewichtung anhand der Fläche sinnvoll, während bei der Betrachtung von Nutzerkosten auch die Verkehrsstärke berücksichtigt werden sollte.

Unabhängig von der Wahl des Gewichtungsfaktors ist zur Bestimmung der Qualitätszahl  $Q_i$  die Vorgehensweise nach dem folgenden Schema zu ändern: Es muss eine Entscheidungsvariable  $b_{j,M}$  eingeführt werden, welche ausdrückt, ob ein Abschnitt  $j$  in einer bestimmten Menge  $M$  enthalten ist.

$$b_{j,M} = \{0;1\} \quad \text{Entscheidungsvariable zum Abschnitt } j \text{ und Menge } M \quad (9.37)$$

Mit:  $b_{j,M} = 0$  falls der Abschnitt  $j$  nicht in der Menge  $M$  enthalten ist

$b_{j,M} = 1$  falls der Abschnitt  $j$  in der Menge  $M$  enthalten ist

Zusätzlich muss der Gewichtungsfaktor  $\beta_j$  für jeden Abschnitt  $j$  bekannt sein.

$$\beta_j \quad \text{Gewichtungsfaktor zum Abschnitt } j \quad (9.38)$$

Für die bisherige Vorgehensweise wurde der Sonderfall angenommen, dass für jeden Abschnitt  $\beta_j = 1$  galt. Durch die notwendige Gewichtung müssen nun die „Mächtigkeiten“<sup>21</sup> folgendermaßen bestimmt werden:

$$|M| = \sum_{j=1}^N b_{j,M} \cdot \beta_j$$

Mit:  $N$  : Anzahl der Abschnitte im Gesamtnetz  $A$  (9.39)

---

<sup>21</sup> Durch die Verwendung der Gewichtungsfunktionen handelt es sich nicht mehr um „Mächtigkeiten“ im mathematischen Sinn. Aus Verständnisgründen wird dieser Begriff aber beibehalten.

Dies bedeutet für die relevanten Mengen:

$$|A| = \sum_{j=1}^N b_{j,A} \cdot \beta_j$$

$$|A_X^-| = \sum_{j=1}^n b_{j,A_X^-} \cdot \beta_j$$

$$|a_i| = \sum_{j=1}^N b_{j,a_i} \cdot \beta_j \tag{9.40}$$

$$|a_{i,X}^-| = \sum_{j=1}^N b_{j,a_{i,X}^-} \cdot \beta_j \tag{9.41}$$

Für die Ermittlung der Kennzahlen  $N_{Z_X^-,U}$ ,  $N_{Z_X^-,O}$ ,  $n_{i,Z_X^-,U}$ ,  $n_{i,Z_X^-,O}$  gemäß Kapitel 9.2.6 ist entsprechend vorzugehen.

### 9.3 Exemplarische Modellrechnungen

Im Gegensatz zum Mittelwert oder anderen absoluten Kennzahlen einer Stichprobe quantifiziert der Qualitätswert  $Q_i$  stets die Qualität eines Teilnetzes in Bezug auf das Gesamtnetz. Es handelt sich somit um eine relative Bewertung eines Teilnetzes.

Dies hat zur Folge, dass der Qualitätswert  $Q_i$  für die strategische Erhaltungsplanung, insbesondere für die Beurteilung von Erhaltungsstrategien, verwendet werden kann. Hierbei stellt sich im Rahmen der Budgetfestlegungen oft die Frage danach, welche Teilnetze besonders erhaltungsbedürftig sind. Hierfür werden bisher absolute Kennzahlen, wie z.B. der Mittelwert des Gesamtwerts für einzelne Teilnetze ermittelt und in Bezug zur gleichen Kennzahl des betrachteten Teilnetzes gebracht. Die alleinige absolute Kenngröße des Teilnetzes ist in diesen Fall nicht ausreichend, da bisher kein als allgemeingültig akzeptiertes Fundament dafür existieren, ab welchen Zustandsgrößen ein Netz objektiv als „schlecht“ eingestuft werden kann (siehe [45]).

Die Relativität des Qualitätswertes  $Q_i$  hat gewisse Konsequenzen, welche bei der Verwendung der Kennzahl beachtet werden müssen. Es ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Veränderung von Abschnitten außerhalb eines Teilnetzes zu einer Veränderung der Qualitätszahl innerhalb des Teilnetzes führen kann. Dies resultiert daraus, dass das Gesamtnetz verändert wird, und die Relationen zwischen Teil- und Gesamtnetz beeinflusst werden. Die Veränderung der Qualitätszahl hängt zudem nicht nur von dem Ausmaß der Veränderung des Gesamtnetzes, sondern auch von der relativen Größe des betrachteten Teilnetzes ab. Die relative Bewertung kleinerer Netze ist in der Regel empfindlicher in Hinblick auf Veränderungen im Gesamtnetz. Diese Eigenschaften sollen nachfolgend anhand von Modellrechnungen verdeutlicht werden.

### 9.3.1 Modellnetze

Das Verhalten des Qualitätswertes  $Q_i$  soll anhand eines vereinfachten Modellnetzes verdeutlicht werden. Es soll ein kleines Gesamtnetz mit 100 Abschnitten und einer uniformen Zustandsverteilung verwendet werden. Jedem Abschnitt wird eine ganzzahlige Zustandsgröße mit den Werten zwischen 1 und 10 vergeben. Aufgrund der Uniformität ergibt sich, dass jeweils 10 Abschnitte eine identische Zustandsgröße aufweisen. Das Modell-Gesamtnetz wird in der Abbildung 88 skizziert wiedergegeben.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Abbildung 88: Schematische Darstellung der Zustandsverteilung des Gesamt-Modellnetzes

Es soll gelten, dass die Zustandsgröße 1 den bestmöglichen Zustand und die Zustandsgröße 10 den schlechtestmöglichen Zustand anzeigt. Um das unterschiedliche Verhalten darzustellen, sollen verschiedene Teilnetze definiert werden. Diese werden in der Abbildung 89 wiedergegeben.

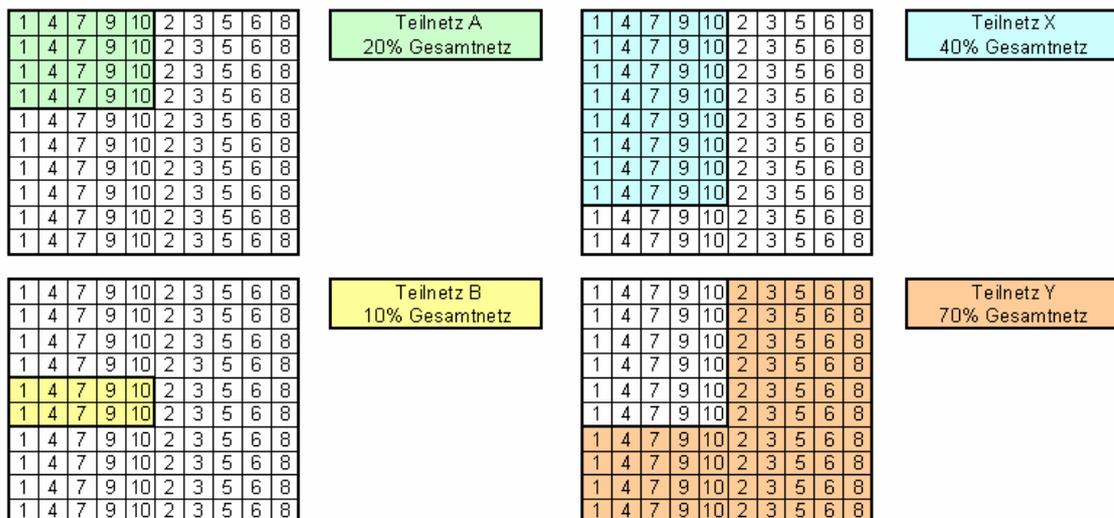


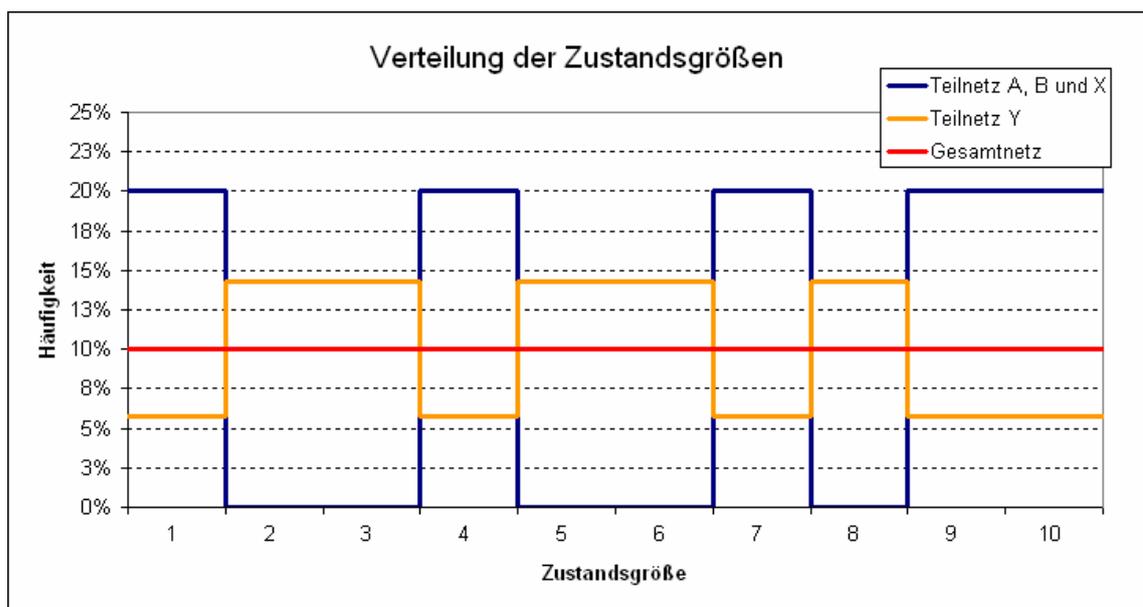
Abbildung 89: Schematische Abgrenzung der vier Modell-Teilnetze A, B, X und Y

Um die Teilnetze als verbundene Flächen darstellen zu können, wurde die Reihenfolge der Spalten verändert. Dies ist legitim, da die Reihenfolge keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat.

Die Teilnetze A und B sollen zu je 20% aus Auswerteabschnitten mit den Zustandsgrößen 1, 4, 7, 9 und 10 bestehen. Hierbei soll gelten, dass das Teilnetz A mit 20 Abschnitten doppelt so groß ist, wie das Teilnetz B mit 10 Abschnitten. Diese Teilnetze können beispielsweise als ein großes und ein normales Bundesland interpretiert werden.

Darüber hinaus soll ein Teilnetz X definiert werden, welches mit 40 Abschnitten doppelt so groß ist, wie das Teilnetz A und viermal so groß ist, wie das Teilnetz B. Es hat eine identische Zustandsverteilung und beinhaltet die Teilnetze A und B vollständig. Dies kann beispielsweise als die Teilmenge der neuen Bundesländer interpretiert werden. Das Teilnetz Y beinhaltet alle Abschnitte des Gesamtnetzes außerhalb der Teilnetze A und B.

Aus diesen Definitionen ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung der Zustandsgrößen entsprechend Abbildung 90.



**Abbildung 90: Häufigkeitsverteilung der Zustandsgrößen der jeweiligen Teilnetze und des Gesamtnetzes**

Die Teilnetze A, B und X weisen entsprechend den Vorgaben eine identische Häufigkeitsverteilung auf. Das Gesamtnetz weist aufgrund der uniformen Zustandsverteilung eine blockartige Verteilung auf. Diese Zustandsverteilungen bildet das Ausgangsszenario.

### 9.3.2 Szenarien

Zusätzlich zum Ausgangsszenario sollen weitere fünf Szenarien definiert werden, bei denen unterschiedliche Teile des Gesamtnetzes mit Erhaltungsmaßnahmen belegt (quasi: repariert) werden. Für diese Szenarien sollen anschließend die Kennzahlen ermittelt und verglichen werden. Es werden die Szenarien aus Abbildung 91 gebildet.

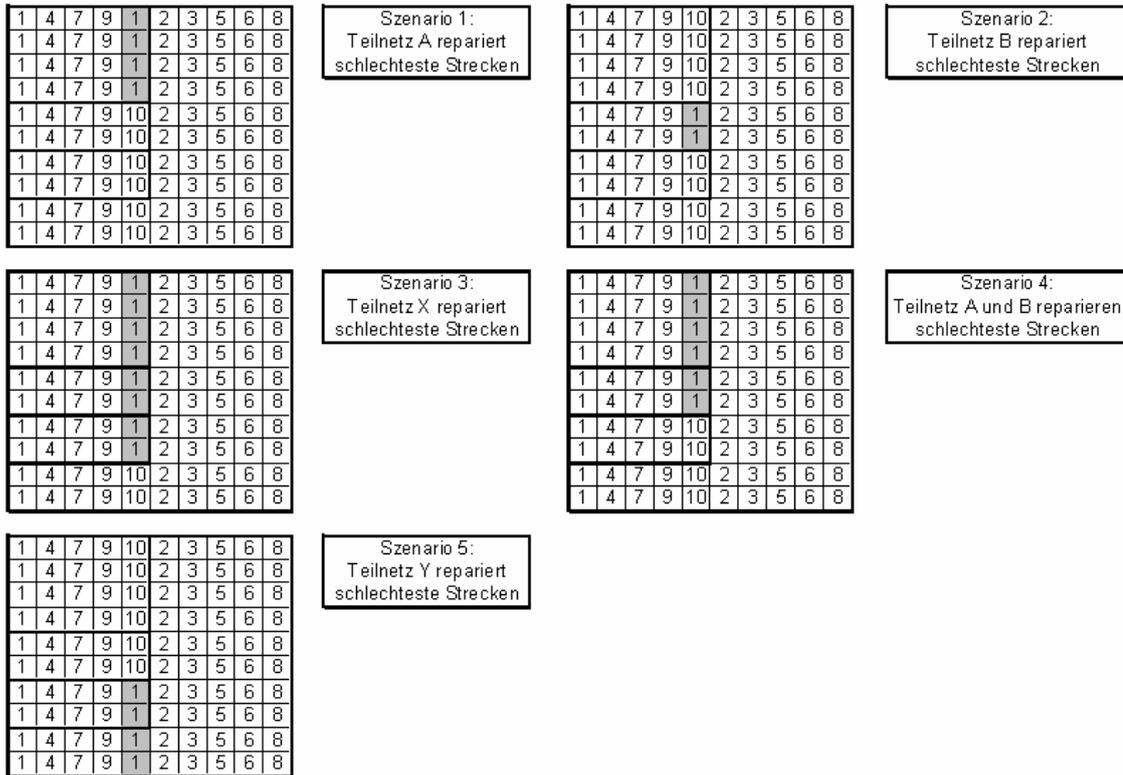


Abbildung 91: Schematische Darstellung der fünf Modellszenarien

- **Szenario 1:** Im Teilnetz A werden die Strecken mit dem schlechtesten Zustand, d.h. alle Strecken mit ZG=10 repariert. Diese Strecken erhalten nach der Maßnahmendurchführung pauschal die Zustandsgröße 1 (ZG=1). In diesem Szenario werden somit 20% des Teilnetzes A bzw. 4% des Gesamtnetzes behandelt.
- **Szenario 2:** Im Teilnetz B werden die Strecken mit dem schlechtesten Zustand, d.h. alle Strecken mit ZG=10 repariert. Diese Strecken erhalten nach der Maßnahmendurchführung pauschal die Zustandsgröße 1 (ZG=1). In diesem Szenario werden somit 20% des Teilnetzes B bzw. 2% des Gesamtnetzes behandelt.
- **Szenario 3:** Im Teilnetz X werden die Strecken mit dem schlechtesten Zustand, d.h. alle Strecken mit ZG=10 repariert. Diese Strecken erhalten nach der Maßnahmendurchführung pauschal die Zustandsgröße 1 (ZG=1). In diesem Szenario werden somit 40% des Teilnetzes X bzw. 8% des Gesamtnetzes behandelt. Da die Teilnetze A und B Bestandteil des Teilnetzes X sind, werden diese wie im Szenario 1 bzw. Szenario 2 verändert.

- **Szenario 4:** Im Teilnetz A und im Teilnetz B werden die Strecken mit dem schlechtesten Zustand, d.h. alle Strecken mit ZG=10 repariert. Diese Strecken erhalten nach der Maßnahmendurchführung pauschal die Zustandsgröße 1 (ZG=1). In diesem Szenario werden somit 6% des Gesamtnetzes behandelt. Da die Teilnetze A und B Bestandteil des Teilnetzes X sind, wird dieses ebenfalls verändert, allerdings nicht so sehr, wie im vorhergehenden Szenario 3.
- **Szenario 5:** Außerhalb der Teilnetze A und B (im Teilnetz Y) werden die Strecken mit dem schlechtesten Zustand, d.h. alle Strecken mit ZG=10 repariert. Diese Strecken erhalten nach der Maßnahmendurchführung pauschal die Zustandsgröße 1 (ZG=1). In diesem Szenario werden 5,71% des Teilnetzes Y bzw. 4% des Gesamtnetzes behandelt. Da ein Teil des Teilnetzes X sich auch im Teilnetz Y befindet, wird auch ersteres teilweise repariert.

Für diese fünf Szenarien wurden für die vier Teilnetze sowie für das Gesamtnetz eine Bestimmung des Qualitätswertes  $Q_i$  durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse wiedergegeben.

### 9.3.3 Ergebnisse

Es wurden zu allen Szenarien die  $Q_x$ -Werte aller einhundert Quantilenbereiche ermittelt. Der Verlauf der  $Q_x$ -Werte wurde in der Abbildung 92 bis Abbildung 97 wiedergegeben.

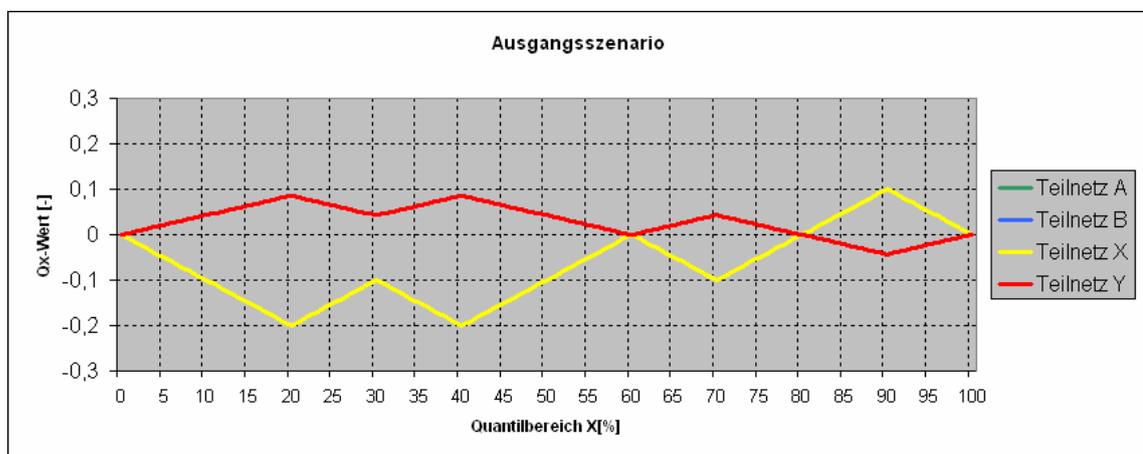
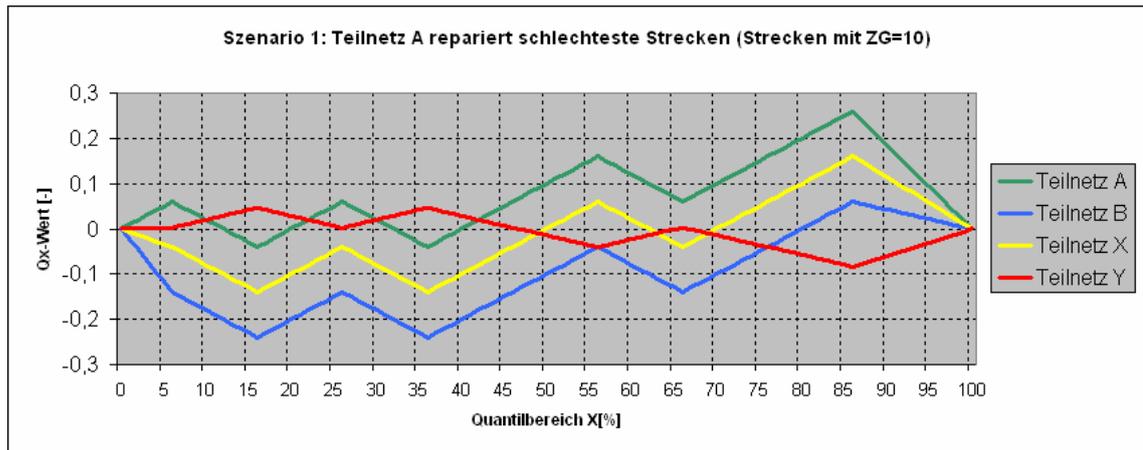


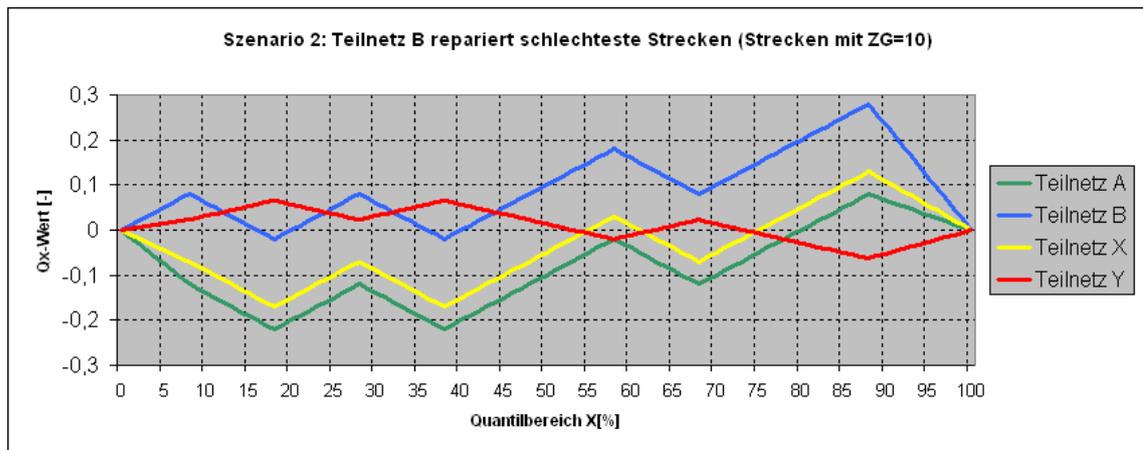
Abbildung 92: Verlauf der  $Q_x$ -Werte im Ausgangsszenario

Im Ausgangsszenario haben die Teilnetze A, B und X einen identischen Verlauf. Aufgrund der relativ hohen Anteile im schlechten Zustandsbereich, zeigt sich bereits optisch eine vorwiegend negative Gesamtfläche.



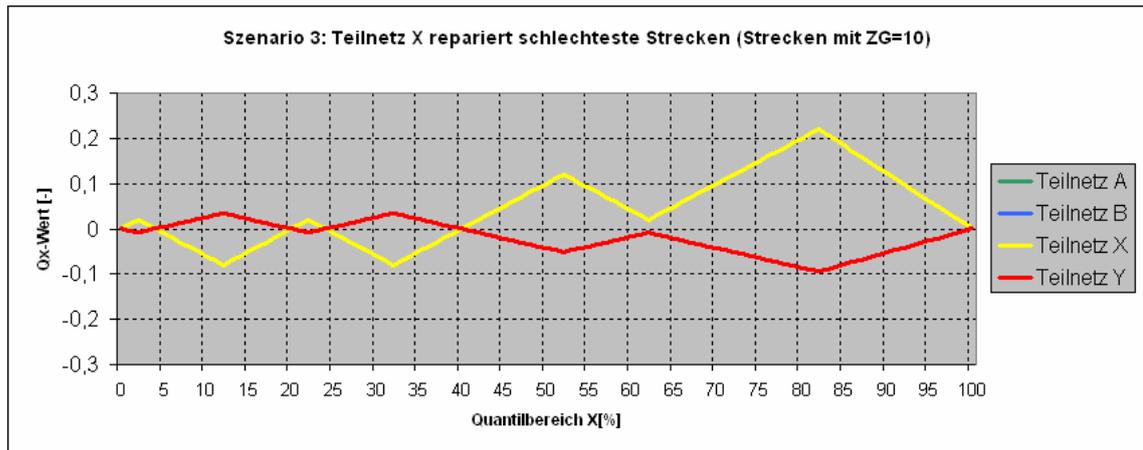
**Abbildung 93: Verlauf der  $Q_x$ -Werte im Szenario 1**

Im Szenario 1, bei dem das Teilnetz A auf 20% seiner Abschnitte eine Maßnahme durchführt, zeigt sich, dass sich dessen  $Q_x$ -Verlauf wesentlich in den positiven Bereich verschiebt. Gleichzeitig verschieben sich die anderen  $Q_x$ -Verläufe in den negativen Bereich, da sie im Vergleich zum nunmehr verbesserten Gesamtnetz als verhältnismäßig schlechter eingestuft werden müssen. Ausnahme hiervon bildet das Teilnetz X, welches auch zum Teil verbessert wird, da das Teilnetz A eine Untermenge von X ist.



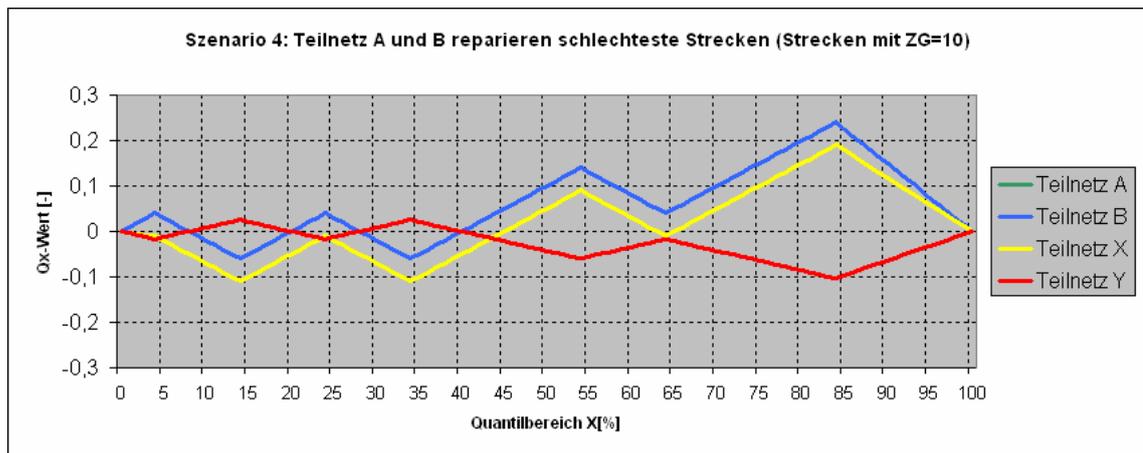
**Abbildung 94: Verlauf der  $Q_x$ -Werte im Szenario 2**

Das Szenario 2 entspricht im Wesentlichen dem Szenario 1, wobei nun 20% des kleineren Teilnetzes B mit Erhaltungsmaßnahmen belegt werden. Die Ausprägung der Veränderungen unterscheidet sich vom Vorszenario, da nur ein kleinerer Teil des Gesamtnetzes verändert wurde. Die genauen Differenzen sollen weiter unten behandelt werden.



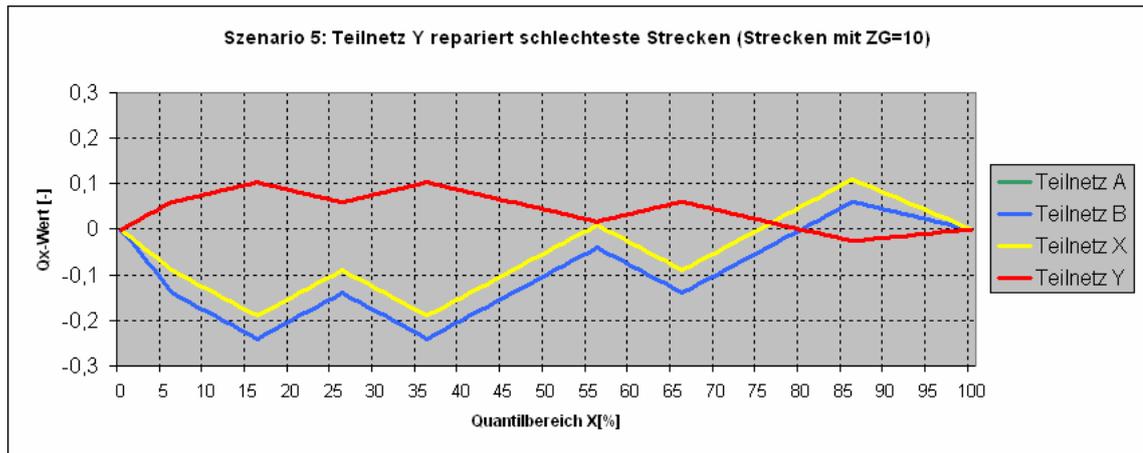
**Abbildung 95. Verlauf der  $Q_x$ -Werte im Szenario 3**

Im Szenario 3 werden die schlechtesten Strecken des Teilnetzes X behandelt. Da die Teilnetze A und B vollständig in X enthalten sind, verändert sich die Zustandsverteilung in identischer Weise.



**Abbildung 96: Verlauf der  $Q_x$ -Werte im Szenario 4**

Im Szenario 4 werden nur die schlechten Strecken in A und B mit Erhaltungsmaßnahmen behandelt. Aus diesem Grund überlappen sich auch die  $Q_x$ -Verläufe dieser beiden Teilnetze. Das Teilnetz X beinhaltet zwar die Teilnetze A und B vollständig, geht aber geringfügig darüber hinaus. Da der hinausgehende Teil nicht erhalten wird, fällt es in der Qualitätsbetrachtung gegenüber A und B leicht zurück.



**Abbildung 97: Verlauf der  $Q_x$ -Werte im Szenario 5**

Im Szenario 5 werden alle Strecken außerhalb von A und B mit Erhaltungsmaßnahmen belegt. Da diese Teilnetze dadurch im Vergleich zum Gesamtnetz eine schlechtere Bewertung erhalten müssen, wird der jeweilige  $Q_x$ -Verlauf stärker in den negativen Bereich gedrückt.

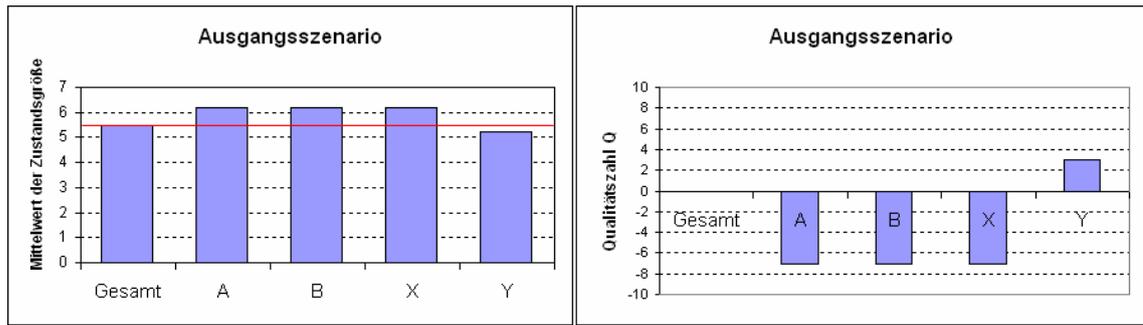
Aus diesen Verläufen ergeben sich die jeweiligen Qualitätswerte  $Q_i$ , welche gemeinsam mit den Mittelwerten in der Tabelle 23 zusammengestellt wurden.

Szenario		Mittelwert					Qualitätswert $Q_i$				
Nr	Bedeutung	Gesamt-netz	A	B	X	Y	Gesamt-netz	A	B	X	Y
	Ausgangsszenario	5,5	6,2	6,2	6,2	5,2	0	-7,0	-7,0	-7,0	3,0
1	Land A repariert 20%	5,14	4,4	6,2	5,3	5,2	0	7,8	-10,2	-1,2	-1,0
2	Land B repariert 20%	5,32	6,2	4,4	5,75	5,2	0	-9,0	9,4	-4,1	1,1
3	Teilnetz X repariert 20%	4,78	4,4	4,4	4,4	4,9	0	4,6	4,6	4,6	-2,0
4	Land A und Land B reparieren 20%	4,96	4,4	4,4	4,85	5,2	0	6,2	6,2	1,7	-3,0
5	Alle außer A und B reparieren die schlechten Strecken	5,14	6,2	6,2	5,75	4,7	0	-10	-10,2	-5,7	4,4

**Tabelle 23: Mittelwert und Qualitätswert aller Teilnetze in den jeweiligen Szenarien**

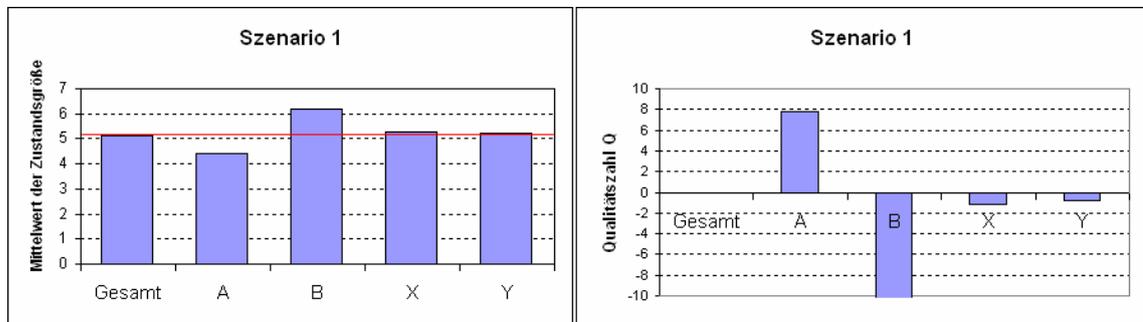
Die Resultate entsprechen den Erwartungen. Die Teilnetze A, B und X beginnen im Ausgangsszenario mit einem Qualitätswert von -7,0, was einen schlechteren Zustand gegenüber dem Gesamtnetz impliziert. Dies ist auf die überproportionale Dominanz von Abschnitten im „schlechten“ Zustand (Zustandsgrößen 9 und 10) zurückzuführen. Demgegenüber hat das Teilnetz Y einen positiven Qualitätswert.

Diese Verhältnisse verändern sich in den jeweiligen Szenarien. In der Abbildung 98 bis Abbildung 103 werden die Kennzahlen graphisch aufgetragen und anschließend diskutiert.



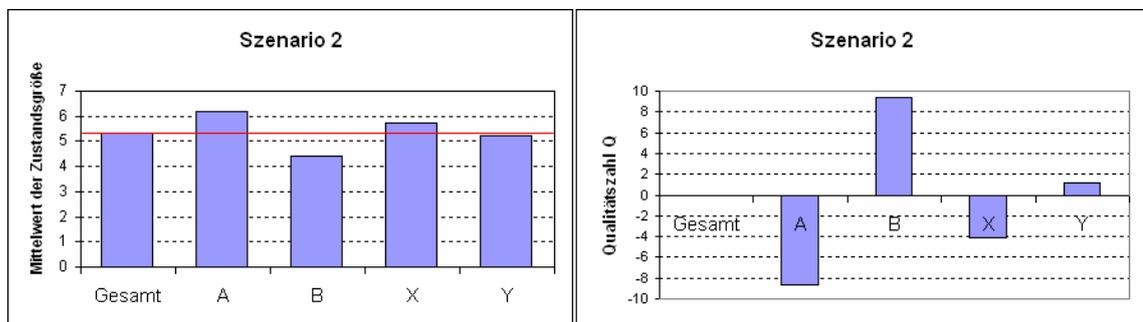
**Abbildung 98: Vergleich der Mittelwert (links) und Qualitätszahlen (rechts) im Ausgangsszenario**

Der Mittelwert des Gesamtnetzes wurde durch eine durchgehende rote Linie markiert. Bereits im Ausgangsszenario zeigt sich, dass eine Überschreitung des Mittelwertes mit einem negativen  $Q_x$ -Wert korrespondiert. Dies erscheint plausibel.



**Abbildung 99: Vergleich der Mittelwert und Qualitätszahlen im Szenario 1**

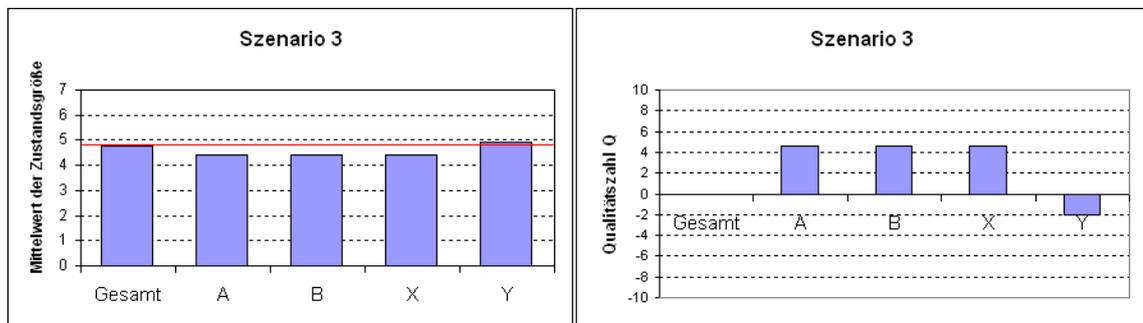
Im Szenario 1 wurde der Zustand des Teilnetzes A verbessert. Da dieses Teilnetz sowohl Bestandteil des Gesamtnetzes als auch des Teilnetzes X ist, wird deren Mittelwert ebenfalls verbessert, während die Mittelwerte von B und Y gleich bleiben. Im Vergleich zum Gesamtnetz fallen die letztgenannten somit zurück, so dass sogar für Y ein negativer  $Q_x$ -Wert resultiert. Wieder sind die Verhältnisse der Mittelwerte der Teilnetze zum Mittelwert des Gesamtnetzes vergleichbar zu den  $Q_x$ -Werten des Gesamtnetzes.



**Abbildung 100: Vergleich der Mittelwert und Qualitätszahlen im Szenario 2**

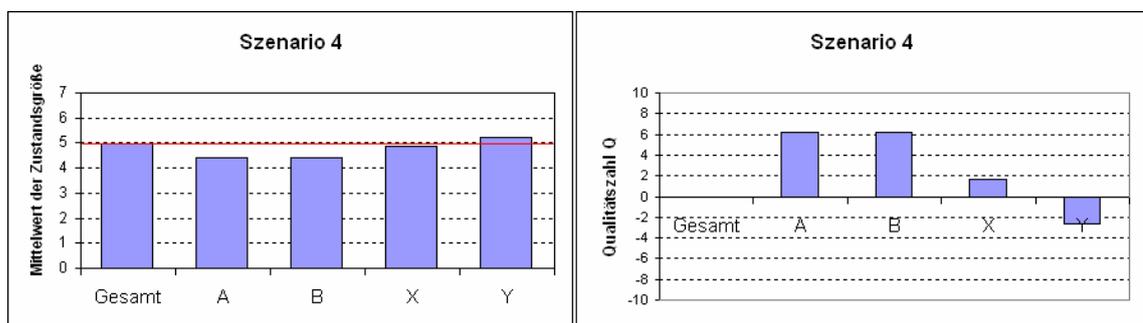
Das Szenario 2 (Reparaturen im Teilnetz B) ist ähnlich dem Szenario 1. Im Unterschied dazu werden jedoch im Szenario 2 Erhaltungsmaßnahmen im kleineren Umfang durchgeführt, da das Teilnetz B kleiner ist. Da somit das Gesamtniveau in diesem

Szenario nicht so stark gehoben wurde, wie im Szenario 1, fallen auch die Veränderungen der relativen Beurteilungen in den unveränderten Teilnetzen (A und Y) nicht so stark aus. Demgegenüber kann sich das „kleine“ Teilnetz B durch diese Maßnahmen stärker gegenüber dem Gesamtnetz verbessern, als es das größere Teilnetz A im Szenario 1 vermochte.



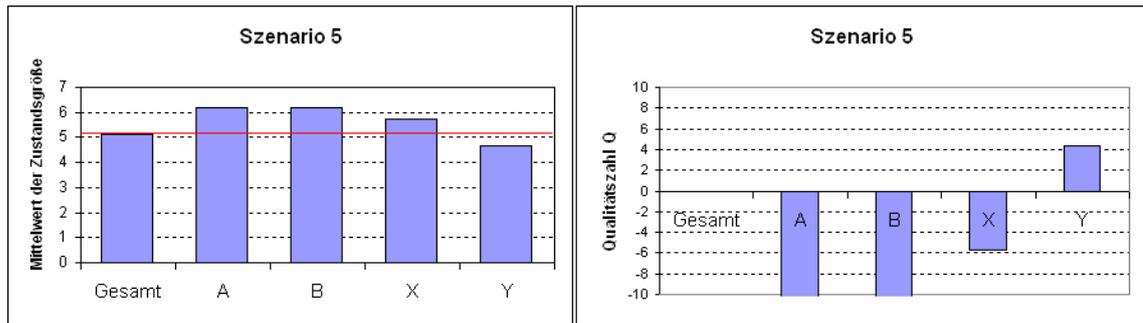
**Abbildung 101: Vergleich der Mittelwert und Qualitätszahlen im Szenario 3**

Das Szenario 3 beinhaltet Erhaltungsmaßnahmen im Teilnetz X, welches die Teilnetze A und B als Untermenge beinhaltet. Aufgrund dessen ändern sich die Kennzahlen der Teilnetze A, B und X gleichartig. Demgegenüber bleibt der Mittelwert des Teilnetzes Y unverändert, die relative Qualitätsbeurteilung von Y gegenüber dem nunmehr verbesserten Gesamtnetz fällt dagegen negativ aus.



**Abbildung 102: Vergleich der Mittelwert und Qualitätszahlen im Szenario 4**

Im Szenario 4 werden die „schlechten“ Abschnitte der Teilnetze A und B behandelt. Das Teilnetz X, welches noch einen Bestandteil über A und B hinaus enthält, profitiert von dieser Maßnahme nicht so sehr, wie im vorhergehenden Szenario 3. Wie zuvor zeigt sich auch hier, dass die sich anhand der Mittelwertvergleiche ergebende Reihung durch die Qualitätswerte wiedergegeben wird.



**Abbildung 103: Vergleich der Mittelwert und Qualitätszahlen im Szenario 5**

Im letzten Szenario 5 werden alle „schlechten“ Abschnitte außerhalb der Teilnetze A und B behandelt. Hier wird wieder verdeutlicht, dass der Qualitätswert  $Q_i$  der beiden Teilnetze wesentlich von den Ereignissen außerhalb beeinflusst werden kann, auch dann, wenn der Mittelwert gleich bleibt.

Anhand der Modellrechnungen wurde verdeutlicht, wie sich der im Rahmen der vorliegenden Arbeit konzipierte Qualitätswert in verschiedenen Szenarien verhält. Es wurde insbesondere verdeutlicht, dass der Qualitätswert  $Q_i$  als relative Größe stets die Relation des Zustands im Vergleich zum Gesamtnetz wiedergibt.

#### 9.4 Quantilenbasierte Analyse der Zustandshomogenität

Die hier aufgeführten Überlegungen zur Ermittlung einer Qualitätskenngröße anhand einer quantilenbasierten Analyse der Zustandsdaten können dahingehend fortgesetzt werden, auch eine geeignete Kenngröße für die Homogenität des Zustands zu ermitteln. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Quantifizierung der Homogenität in der Praxis dadurch erschwert ist, dass Zustandsdaten häufig aufgrund von mess- und auswertetechnischen Ursachen einer „untypischen“ Verteilung folgen. In den vorherigen Kapiteln wurden hierzu bereits einige Beispiele erwähnt:

- Die einzelnen Zustandsgrößen werden durch unterschiedliche Messtechniken erfasst und anhand sehr verschiedener Verfahren ausgewertet. Dies führt dazu, dass die jeweiligen Werteverteilungen nicht miteinander übereinstimmen. Einige Zustandsgrößen sind Normalverteilt (z.B. Griffigkeit), einige sind binomialverteilt (z.B. Flickstellen) und andere folgen keiner bekannten Verteilungsfunktion. Zudem folgen gleichartige Verteilungen zum Teil auch unterschiedlichen Verteilungsparametern.
- Beim Berechnen der Zustandswerte erfolgt insbesondere durch die Unstetigkeiten in den Normierungsfunktionen (siehe beispielsweise Kapitel 6.1.1) eine weitere Veränderung der ursprünglichen Zustandsverteilung.
- Aus den Zustandswerten werden durch Gewichtung die Teilwerte ermittelt (siehe 6.2.2 und 6.2.3), was für diese zu einer weiteren Veränderung der Wertever-

teilung führt. Hierbei ist auch der Effekt der Durchschlagsregel und der Logarithmenbildung von Bedeutung.

- Schließlich wird der Gesamtwert als Maximum aus den beiden Teilwerten gebildet.

Diese Gründe führen zusammengefasst dazu, dass die zu untersuchenden Zustandsdaten keiner gewöhnlichen Verteilungsfamilie zugeordnet werden können.

Bei statistischen Zustandsanalysen wird häufig zur Quantifizierung der Inhomogenität einer Stichprobe eines der Streumaße verwendet, welche im Kapitel 8.1.3.2 vorgestellt worden sind. Aus den oben genannten Gründen sind diese Standardkenngrößen aber zur Quantifizierung der Zustandshomogenität nicht sinnvoll, da sie grundsätzlich die Streuung der Stichprobe um ein Lagemaß behandeln, nicht aber die Streuung um eine inhomogene Verteilung.

Demgegenüber sind in der Statistik verschiedene Verfahren bekannt, welche die Abweichung bzw. Übereinstimmung einer Verteilung von bzw. mit einer theoretischen Verteilungsfunktion quantifizieren können. Solche Verfahren werden vor allem im Zusammenhang mit statistischen Tests angewendet. Im Kapitel 8.4.4 wurde beispielsweise die Testgröße  $T$  ermittelt, mit der die Übereinstimmung der gemessenen Zustandsveränderung zu einer prognostizierten Zustandsverteilung im Rahmen des Chi-Quadrat-Tests bestimmt werden konnte. Die Gleichung (8.50) zur Ermittlung der Testgröße ist nachfolgend wiedergegeben.

$$T = \sum_{j=1}^m \frac{(S^{(j)} - n\pi_0^{(j)})^2}{n\pi_0^{(j)}}$$

Mit:  $T$  = Testgröße des Chi-Quadrat-Tests

$m$  = Anzahl der möglichen Klassen, die in der Verteilung vorkommen

$n$  = Anzahl der Werte in der Stichprobe

$S^{(j)}$  = Anzahl der Elemente, die in die Klasse  $j$  fallen

$\pi_0^{(j)}$  = prognostizierte Wahrscheinlichkeit (0..1), dass ein Wert in die Klasse  $j$  fällt

Es wird somit für jede Werteklasse die Abweichung zwischen (gemessenem) IST-Wert und (aus der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung erwartetem) SOLL-Wert gebildet, quadriert und durch den Erwartungswert dividiert. Dies ist ähnlich der Vorgehensweise zur Bestimmung der Varianz (siehe Gleichung (8.6)), bei der die Differenz eines Stichpro-

benwertes zum arithmetischen Mittelwert quadriert und durch Division durch die Gesamtgröße der Stichprobe harmonisiert wird.

Dieser Ansatz kann auch auf die Quantilenanalyse übertragen werden, um ein geeignetes Streumaß  $S_i$  für ein Teilnetz  $a_i$  zu berechnen. Es gilt somit, die Differenz zwischen einem IST-Wert und einem SOLL-Wert zu ermitteln. In Analogie zur Vorgehensweise bei Residuenanalysen soll diese Differenz quadriert werden. Dies hat zur Folge, dass größere Differenzen stärker in das Streumaß eingehen. Es muss also zunächst eine geeignete Vergleichsgröße im Teilnetz  $a_i$  gefunden werden.

Eine erste Betrachtung zeigt, dass die bisher verwendeten Qualitätskenngrößen  $Q_{i,X}$  nicht direkt zur Residuenbildung für die Homogenitätsanalyse verwendet werden sollten. Dies liegt daran, dass einzelne Auswerteabschnitte Bestandteil verschiedener  $Q_{i,X}$ -Mengen sein können (die „schlechtesten“ 1 % sind auch Bestandteil der schlechtesten 2 %, der schlechtesten 3 %, usw.), was zu einer überproportionalen Berücksichtigung der „schlechtesten“ Abschnitte beim Streumaß führen würde. Demgegenüber kann für jedes Quantil der Zuwachs  $W_{i,X}$  bestimmt werden, um den die Menge  $a_{i,X}^-$  der „schlechtesten“ Abschnitte im Vergleich zum davor liegenden Quantil gewachsen ist.

$$W_{i,X} = |a_{i,X}^-| - |a_{i,X-1}^-| \quad \text{für } X \geq 2 \quad (9.42)$$

$$W_{i,X} = |a_{i,X}^-| \quad \text{für } X = 1 \quad (9.43)$$

Die Summe aller Zuwächse ist gleich der Mächtigkeit des Teilnetzes  $a_i$ .

$$\sum_{X=1}^{100} W_{i,X} = |a_{i,1}^-| + \sum_{X=2}^{100} |a_{i,X}^-| - |a_{i,X-1}^-| = |a_i| \quad (9.44)$$

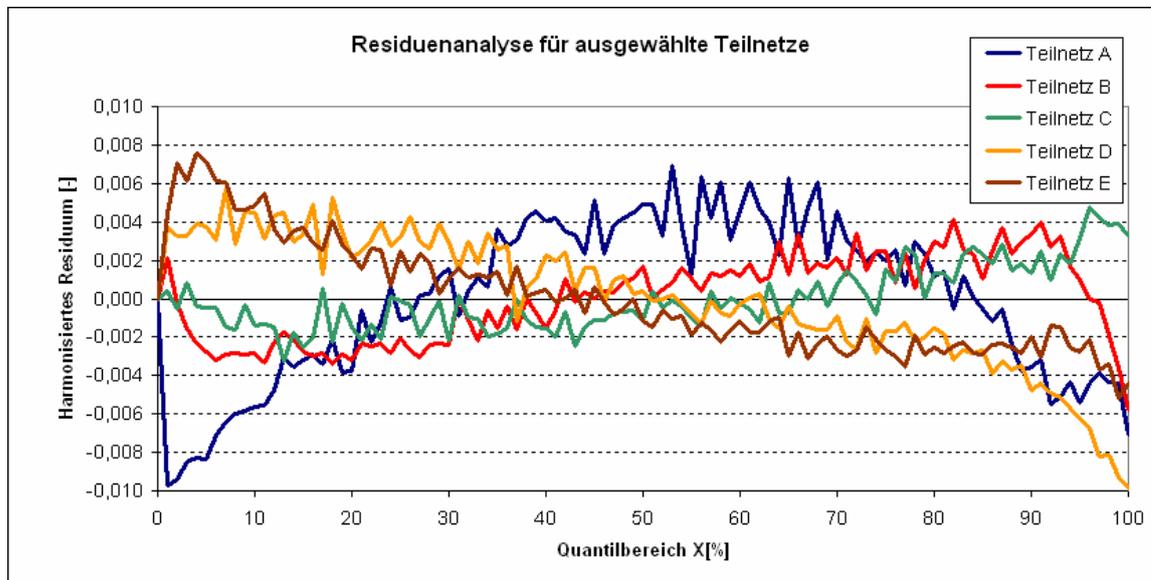
Unter der Annahme einer identischen Verteilung der Zustandsdaten im Teilnetz  $a_i$  und im Gesamtnetz  $A$  kann ein erwarteter Zuwachs  $W'_{i,X}$  bestimmt werden. In diesem Fall kann erwartet werden, dass der Zuwachs für jedes Quantil genau ein Prozent des Teilnetzes  $a_i$  beträgt.

$$W'_{i,X} = \frac{1}{100} \cdot |a_i| \quad \text{für alle } X \quad (9.45)$$

Es kann das Residuum als Differenz zwischen erwartetem Zuwachs und gemessenen Zuwachs definiert werden. Da diese Differenz von der Gesamtgröße des betrachteten Teilnetzes  $a_i$  abhängt, soll sie zudem durch Division durch die Mächtigkeit  $|a_i|$  standardisiert werden.

$$R_{i,X} = \frac{W'_{i,X} - W_{i,X}}{|a_i|} \quad (9.46)$$

Zur optischen Veranschaulichung wurden die Residuen der anonymisierten Teilnetze aus Abbildung 81 ermittelt und in der Abbildung 104 dargestellt.



**Abbildung 104: Darstellung aller Residuen für ausgewählte Teilnetze**

Es kann gezeigt werden, dass die Summe dieser Residuen, d.h. das Integral der oberen Kurven jeweils über alle Quantile gleich null sein muss. Dies ist darauf zurückzuführen, dass positive Differenzen, welche bei den einen Quantilen auftreten (größerer Zuwachs als erwartet) durch negative Differenzen bei anderen Quantilen ausgeglichen werden.

$$\sum_{X=1}^{100} R_{i,X} = 0 \quad (9.47)$$

Die Ermittlung eines Streumaßes wird in der Statistik in der Regel als Summe der Residuenquadrate definiert, wobei diese Summe gegebenenfalls durch Division durch einen Gewichtungsfaktor (z.B. Anzahl aller Datensätze) standardisiert wird. Für den hier betrachteten Fall wurde die Harmonisierung bereits bei der Residuenbildung durchgeführt, so dass eine weitere Division nicht notwendig ist. Es kann somit ein Streumaß  $S_i$  direkt als Summe der Residuenquadrate definiert werden.

$$S_i = \sum_{X=1}^{100} (R_{i,X})^2 = \left( |a_{i,1}^-| - \frac{1}{100} \cdot |a_i| \right)^2 + \sum_{X=2}^{100} \left( |a_{i,X}^-| - |a_{i,X-1}^-| - \frac{1}{100} \cdot |a_i| \right)^2 \quad (9.48)$$

Für die obigen fünf Teilnetze ergeben sich dadurch die Streumaße aus Tabelle 24.

Streumaß $S_i [10^{-3}]$				
Teilnetz A	Teilnetz B	Teilnetz C	Teilnetz D	Teilnetz E
1,74061	4,9302	0,27676	1,13604	0,83555

**Tabelle 24: Exemplarische Berechnung von Streumaßen gemäß Gleichung (9.48)**

Das Streumaß  $S_i$  ist somit eine quantilenbasierte Kennzahl für die Streuung bzw. Inhomogenität der Zustandsverteilung eines Teilnetzes  $a_i$  in Bezug auf die Zustandsverteilung des Gesamtnetzes **A**. Es quantifiziert somit nicht die Abweichungen zu einem Mittelwert sondern zu einer durch das Gesamtnetz vorgegebene Zustandsverteilung, die ihrerseits beliebig sein kann.

## 9.5 Anwendung der quantilenbasierten Analyse auf die Zustandsdynamik

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Verfahren vorgestellt, mit denen zu einem administrativ oder geographisch abgegrenzten Teilnetz Kennzahlen zur Qualität des Zustands und der Inhomogenität der Zustandsverteilung in Bezug auf das Gesamtnetz ermittelt werden können. Diese Kennzahlen können statisch für eine Betrachtungsperiode berechnet und dargestellt werden. Falls die Kennzahlen für mehrere zeitlich versetzte Zustandsverteilungen ermittelt werden, liegt eine Analyse der Zustandsdynamik vor.

Die Quantilenanalyse kann aber auch auf eine alternative Weise zur Analyse der Zustandsdynamik genutzt werden. Bei der Anwendung von Pavement Management Systemen wird häufig nicht die Frage nach der Veränderung einzelner Teilnetze in Bezug auf das Gesamtnetz, sondern nach der Veränderung der Gesamtqualität gestellt. Als Resultat der Berechnungen liegen hierfür die prognostizierten Zustandswerte (in Österreich auch die Zustandsgrößen) und die Gesamtwerte aller PMS-Abschnitte vor. Für die allgemeine, merkmalsübergreifende Betrachtung ist es sinnvoll, eine Qualitätszahl anhand der Gesamtwerte zu ermitteln. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass diese auf einer Ordinalskala liegen und somit einige einfache Rechenoperationen, insbesondere die Bildung des arithmetischen Mittelwertes, mathematisch nicht zulässig sind.

Ein Lösungsansatz hierfür wäre, die prognostizierten Zustandsdaten aller Jahre zusammengefasst als „Gesamtmenge“ zu betrachten. Die Zustandsdaten eines Analysejahres wären dadurch eine der „Teilmengen“. Es würde somit die folgende Definition erforderlich sein:

- A Menge aller Zustandswerte in allen Prognosejahren
- $a_i$  Menge aller Zustandswerte im Prognosejahr  $i$

In Analogie zu der bisherigen Vorgehensweise müssen alle PMS-Abschnitte nach dem Gesamtwert sortiert werden und es wird ermittelt, wie viele Auswerteabschnitte, welche

zu den „schlechtesten“ X % zugehören, in die jeweiligen Auswertejahre fallen. Das restliche Berechnungsverfahren bleibt wie in den vorangegangenen Kapiteln bestehen.

Im Kapitel 10.2 wird eine Berechnung zu diesem Lösungsansatz durchgeführt und die Ergebnisse visualisiert. Es sollte hierbei nochmals darauf hingewiesen werden, dass der Qualitätswert  $Q_i$  eine relative Größe ist. Bei einer dynamischen Betrachtung würde somit nur ausgesagt werden können, wie sich ein bestimmter zeitlicher Zustand (z.B. die Zustandsverteilung eines bestimmten Jahres) im Vergleich zu der Gesamtheit aller betrachteten Zustände verhält.

## 9.6 Zusammenfassung

Anhand der systematischen Zusammenstellung der derzeit angewendeten Verfahren zur Ermittlung und Darstellung netzweiter Zustandskenngößen in Kapitel 7 wurde festgestellt, dass ausschließlich statistische Standardkenngößen berechnet werden. Anhand der statistischen Überlegungen aus Kapitel 8 stellte sich zudem heraus, dass die Zulässigkeit einiger der angewandten Kenngößen-Berechnungsverfahren zu hinterfragen ist. Es wurde daher angestrebt, eine Qualitätskenngöße anhand eines alternativen Ansatzes zu definieren.

Es sollten mehrere Anforderungen durch den neuen Ansatz erfüllt werden:

- Das Verfahren sollte auf Werte einer Ordinalskala (siehe Kapitel 8.1.2) angewendet werden können, da die Zustandswerte nach aktueller Ansicht diesem Skalenniveau zugeordnet werden müssen.
- Das Verfahren sollte weitestgehend frei von subjektiven Festlegungen sein.
- Das Verfahren sollte numerisch umsetzbar sein und anhand der existierenden Datengrundlage angewendet werden können.
- Das Verfahren sollte die Möglichkeit bieten, die abschnittsbezogenen Zustandsdaten individuell, z.B. anhand der Abschnittslänge oder der Abschnittsfläche gewichtet einbringen zu können.
- Das Verfahren sollte eine relative Beurteilung eines Teilnetzes in Bezug auf das Gesamtnetz in den Vordergrund stellen.

Durch den hier vorgestellten Ansatz einer quantilenbasierten Qualitätszahl wurden die obigen Anforderungen erfüllt. Das Ergebnis ist ein in der Gleichung (9.5) definiertes Verfahren zur Bestimmung einer Qualitätszahl, durch welche ausgedrückt werden kann, wie stark das untersuchte Teilnetz an den „schlechtesten“ Strecken des übergeordneten Gesamtnetzes beteiligt ist. Durch weitergehende Überlegungen wurde die Erweiterung des Verfahrens zur Berücksichtigung einer Gewichtung sowie zur Übertragung auf eine Analyse der Zustandsdynamik vorgestellt. Die Umsetzbarkeit des Ver-

fahrens wird im nachfolgenden Kapitel durch eine Beispielrechnung, anhand von realen Daten nachgewiesen.

Darüber hinaus wurde gezeigt, wie die Quantilenanalyse zur Ermittlung der Zustandshomogenität bzw. zur Streuung einer Verteilung um eine Grundverteilung genutzt werden kann. Hierdurch war es möglich, in der Gleichung (9.48) ein Streumaß zu definieren, welches ausdrückt, wie sehr die Zustandsverteilung in einem Teilnetz gegenüber der Zustandsverteilung des Gesamtnetzes streut.

Es ist zu diskutieren, inwiefern das hier vorgestellte Verfahren eine wertvolle Ergänzung des jetzigen Auswertumfangs der Zustandsdaten darstellt. Bei verschiedenen praktischen Tests mit realen Daten wurden im Rahmen der Arbeit festgestellt, dass die aus den Berechnungen resultierenden Reihungen der Teilnetze denen sehr ähnlich wird, welche durch die arithmetischen Mittelwerte der betrachteten Zustandswerte und Zustandsgrößen definiert wird. In den Fällen, in denen bei der Reihung unterschiedliche Wertefolgen auftreten, kann wahrscheinlich unterschiedlich und kontrovers argumentiert werden, welche der ermittelten Reihenfolgen die realen Netzqualitäten realistischer wiedergeben. Ähnlich ist auch für die quantitative Beurteilung der Teilnetze anhand dieser Qualitätszahl zu argumentieren. Anhand dieser Überlegungen ist zu hinterfragen, welcher Mehrwert die hier vorgestellten Verfahren zu beitragen können.

Der wesentliche Vorteil, welcher durch die Quantilenanalyse erreicht wird, ist, dass das Verfahren im Gegensatz zur Mittelwertbildung mathematisch vollständig zulässig ist und das Skalenniveau der Zustandsdaten berücksichtigt. Es erlaubt eine gute Abschätzung, inwiefern die Verteilung eines Teilnetzes von einer (durch eine übergeordnete Gesamtdatenmenge definierte) „normalen“ Verteilung abweicht. Dies gilt insbesondere bei sehr unregelmäßigen Verteilungen, wie sie beispielsweise durch unetige Normierungskurven verursacht werden. Dem gegenüber steht aber der Nachteil, dass die Ermittlung der Quantilenbasierten Qualitätskenngrößen vergleichsweise aufwändig ist und als auch die Interpretation der Ergebnisse einen gewissen Einarbeitungsaufwand erfordert.

Eine abschließende Empfehlung für ein bestimmtes Verfahren lässt sich somit anhand dieser Arbeiten nicht geben. Es ist vielmehr zu betonen, dass auch mit der bisher praktizierten Methode der Mittelwertbildung Qualitätswerte ermittelt werden, die zwar nicht dem Skalenniveau der Zustandsdaten entsprechen, jedoch zu vergleichbaren Aussagen führen, wie das hier vorgestellte, mathematisch legitime Verfahren auf Basis von Quantilenanalysen.

## 10. Visualisierungsverfahren für Zustandsdynamiken

Das Erhaltungsmanagement im Straßenwesen ist eine interdisziplinäre Aufgabe, an der Personen aus sehr unterschiedlichen Fachdisziplinen beteiligt sind. In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, dass von der Messung des Straßenzustands über die Erstellung aussagefähiger Zustandsauswertungen bis zur Durchführung der Erhaltungsmaßnahmen eine Vielzahl von Bearbeitungsschritten unter Einbezug mehrerer Entscheidungsebenen durchgeführt wird.

Bis zur Entscheidungsfindung werden somit Personen unterschiedlicher Fachrichtungen, wie z.B. der Messtechnik, der elektronischen Datenverarbeitung, des Straßenwesens, der Ökonomie und der Politik direkt oder indirekt einbezogen. Diese Personen müssen Informationen, vor allem Entscheidungsergebnisse, untereinander austauschen, was aufgrund des fachbezogenen unterschiedlichen Hintergrundwissens eine besondere Herausforderung ist. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Nutzung geeigneter Informationsdarstellungen die Kommunikation zwischen den Beteiligten verbessert und somit ein höherer Nutzen erzielt und die Akzeptanz der Straßenzustandsdaten gesteigert werden kann. Falls ein Nutzer aus vorhandenen Daten die gewünschten nicht zeitnah gewinnen kann, werden Entscheidungen auf anderen Grundlagen (z.B. Erfahrungswerten) getroffen und die Bedeutung der Daten geht zurück.

Diese Erfahrungen haben vor allem in Deutschland dazu geführt, dass Visualisierungstechniken intensiv entwickelt und weitestgehend standardisiert worden sind. Im Kapitel 7 wurden die gängigen Visualisierungsformen vorgestellt. Hierbei wurde der Schwerpunkt vor allem auf die Darstellung des statischen Ist-Zustands gelegt. Aus diesen Erfahrungen lässt sich schließen, dass durch geeignete Visualisierungsverfahren auch die Nutzbarkeit und Akzeptanz von Daten zum veränderlichen Straßenzustand erhöht werden könnte.

Bereits bei der Untersuchung der Prognosemodelle im Kapitel 8.4 wurde deutlich, dass durch Visualisierungsverfahren Informationen deutlich besser nutzbar gemacht werden können, als durch eine tabellarische Zusammenstellung. Dies ist im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückzuführen.

- Durch visuelle Verfahren können deutlich mehr Inhalte dargestellt und optisch unterschieden werden.
- Durch die Fähigkeit des Menschen, Strukturen und Muster optisch zu erkennen, ist es durch die visuellen Verfahren einfacher, mögliche Zusammenhänge in den Daten zu erkennen und verständlich zu machen. Das Hervortreten von bestimmten Strukturen ist jedoch davon abhängig, inwiefern die gewählte Darstellungsform diese ausreichend hervorhebt.

Die bekannten und allgemein akzeptierten Vorteile von visuellen Datendarstellungen haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass verschiedene Visualisierungsverfahren für die erhobenen, auf einen bestimmten Erfassungszeitpunkt bezogenen Zustandsdaten intensiv erarbeitet und weitestgehend standardisiert worden sind (siehe Kapitel 7.2). Demgegenüber sind für die Zustandsdynamik bisher nur sehr wenige Ansätze für geeignete Visualisierungen zu finden, obwohl gerade die Kenntnis der tatsächlichen oder unter bestimmten Umständen zu erwartenden Veränderungen des Zustands eine wichtige Informationsgrundlage für die Entscheidungen des Erhaltungsmanagements sein kann.

Die Veränderung des Straßenzustands über die Zeit kann als „Zustandsdynamik“ bezeichnet werden. Eine Analyse dieser Veränderung wäre demnach eine Analyse der Zustandsdynamik. In einigen Quellen wird der Vergleich verschiedener, zeitlich versetzter Zustände als „dynamische Zustandsanalyse“ bezeichnet. Bei einer strengen Begriffsauslegung ist aber festzustellen, dass nicht die Analysen selbst dynamisch (im Sinne der Systemtheorie: zeitlich veränderbar) sind, sondern dass vielmehr die Dynamik der Zustände untersucht wird. Im Folgenden wird daher der Begriff „Analyse der Zustandsdynamik“ verwendet.

Wie bereits erläutert worden ist, liegen in der Praxis zwei unterschiedliche Datenquellen vor, welche Daten zur Zustandsdynamik liefern können. Zum einen können Zustandsdaten über einen längeren Zeitraum hinweg, wiederholt erfasst werden, so dass eine reale Zustandsentwicklung kontinuierlich ermittelt werden kann. Zum anderen können Zustandsentwicklungen anhand von Prognosemodellen berechnet bzw. abgeschätzt werden. In beiden Fällen liegen ähnliche Datenbestände vor, welche nach ähnlichen Gesichtspunkten ausgewertet und dargestellt werden können.

Die in diesem Kapitel erarbeiteten Vorschläge zur Darstellung der Zustandsdynamik bauen auf den vorhandenen Visualisierungsstandards der Zustandsanalyse statischer Zustände auf, welche im Kapitel 7.2 vorgestellt worden sind. Dies sind im Einzelnen:

- Statistische Standardanalysen (Säulendiagramme und Summenlinien)
- Streckenbänder
- Karten

Die dortigen Visualisierungsformen werden systematisch durchgegangen und auf ihre Erweiterbarkeit zur Abbildung der Zustandsdynamik untersucht. Zusätzlich soll auch für die im Kapitel 9 vorgestellten Quantilenanalyse eine geeignete Darstellungsform erarbeitet werden.

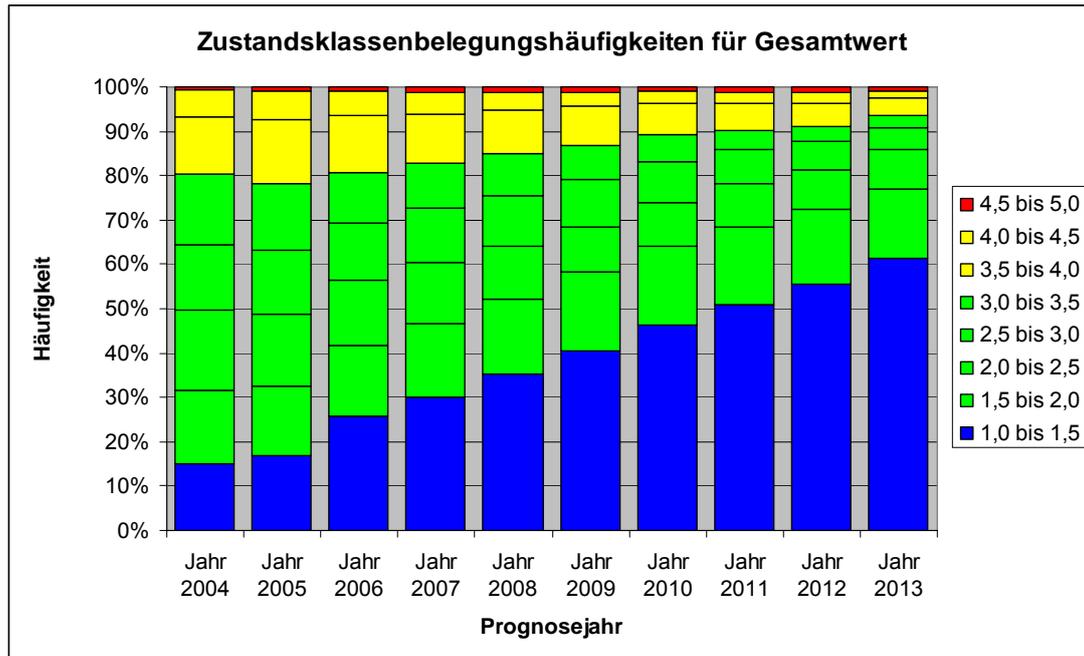
## **10.1 Statistische Standardauswertungen**

Zu den statistischen Standardauswertungen der Zustandsdaten sind vor allem die Säulendiagramme mit Klassenbelegungshäufigkeiten und die Summenlinien zu zählen. Zusätzlich soll hier auch die Darstellung von statistischen Kenngrößen erwähnt werden.

### **10.1.1 Klassenbelegungshäufigkeiten (Säulendiagramme)**

Bei der Darstellung der Zustandsdynamik ergibt sich gegenüber der Visualisierung statischer Zustände grundsätzlich die Problematik, dass eine zusätzliche Dimension und somit ein größerer Informationsumfang berücksichtigt und übersichtlich abgebildet werden muss. Durch das Hinzufügen zusätzlicher Informationsinhalte auf eine Abbildung erhöht sich die Gefahr, diese zu „überladen“ und unter Umständen die Aussagefähigkeit der Darstellung negativ zu beeinflussen. Die Konzeption einer geeigneten Darstellungsform für die Zustandsdynamik ist somit eine besondere Herausforderung.

Für die Quantifizierung der Klassenbelegungshäufigkeiten wurde diese Aufgabe bereits in der Vergangenheit in Deutschland angegangen und es wurde eine Lösung erarbeitet. Das Ziel war es, die Ergebnisse der Zustandsprognose-Berechnungen darzustellen, welche durch Pavement-Management-Systeme bei der Erstellung von Erhaltungsprogrammen intern ermittelt werden. Die prognostizierten Zustände werden dabei jahresweise in vordefinierte Zustandsklassen eingeteilt und die Häufigkeiten werden in einem gestapelten Säulendiagramm abgebildet. In der Abbildung 105 ist ein (anonymisiertes) Beispiel für den Verlauf eines Gesamtwertes abgebildet.



**Abbildung 105: Beispiel Visualisierung der Zustandsdynamik durch Säulendiagramme, (anonymisierte Daten)**

Eine Besonderheit der Darstellungsform besteht darin, dass zwar acht Klassen unterschieden und auf dem Diagramm abgegrenzt werden, die farbliche Unterscheidung aber in die vier Zustandsklassen (Unterbrochen durch 1,5-Wert, Warnwert und Schwellenwert – siehe Kapitel 6.1) erfolgt. Dies resultiert daraus, dass die Unterscheidung in acht Zustandsklassen nur noch aus formellen Gründen erfolgt, in der Praxis aber keine Bedeutung mehr hat.

Die Darstellung des Zustands im Verlauf mehrerer Jahre auf einem Diagramm führt dazu, dass es ohne Verlust an Übersichtlichkeit nicht mehr möglich ist, mehrere Zustandsmerkmale gleichzeitig abzubilden. Es wurden daher komplette Übersichtsblätter entworfen, auf denen die Zustandsverläufe mehrerer Merkmale gleichzeitig dargestellt werden. Diese Übersichtsblätter sind derzeit eine Standard-Auswerteform für die Berechnungen des Pavement-Management-Systems in Deutschland und können in verschiedenen Forschungsarbeiten zum PMS (z.B. [55], und in [65]) vorgefunden werden. In der Abbildung 106 ist ein Beispiel eines solchen Übersichtsblattes wiedergegeben.

**Zusammenfassung der PMS-Ergebnisse**

Analysegruppe: AlleBAB

Budget-Szenario: RealBMV

0,00

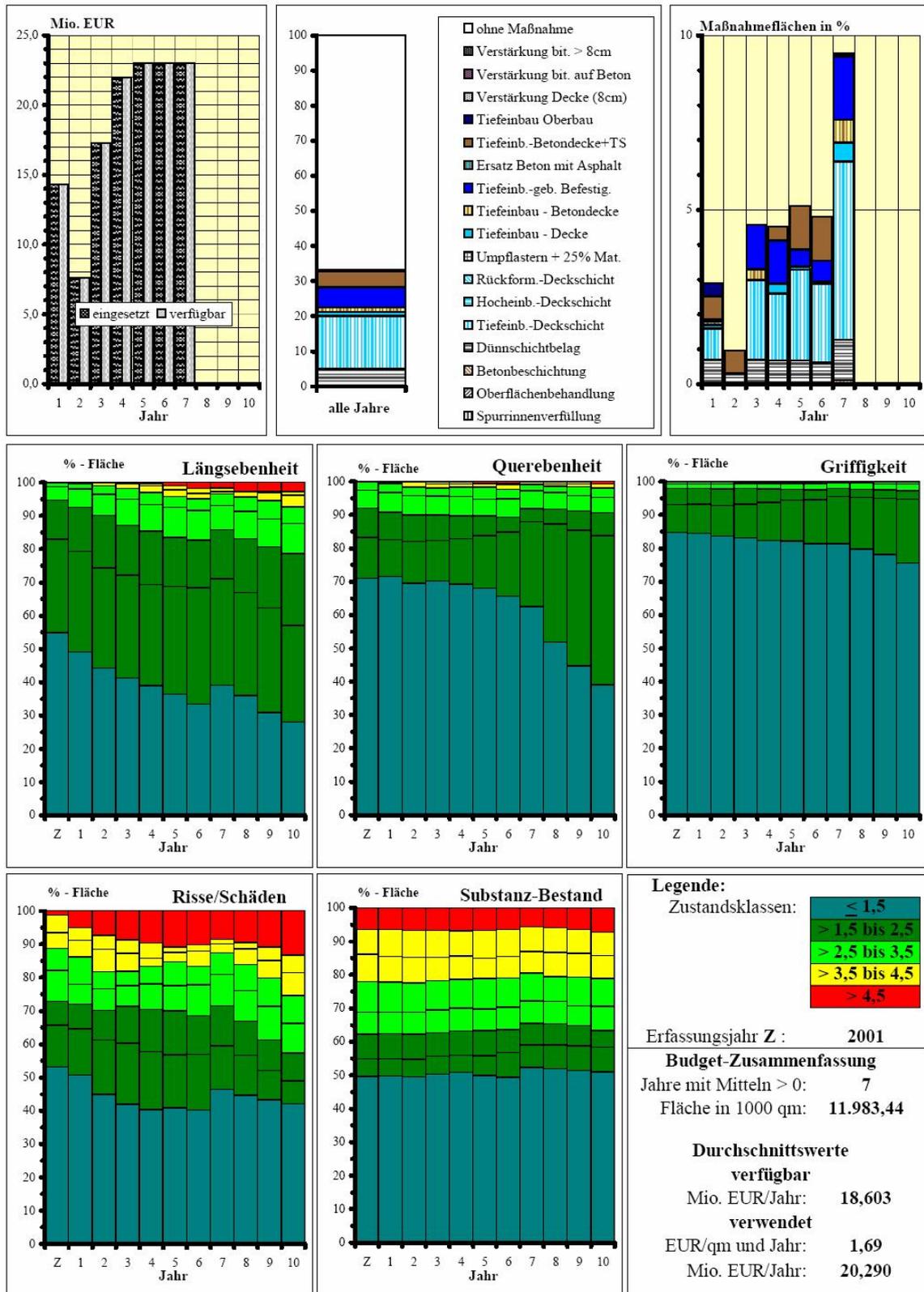
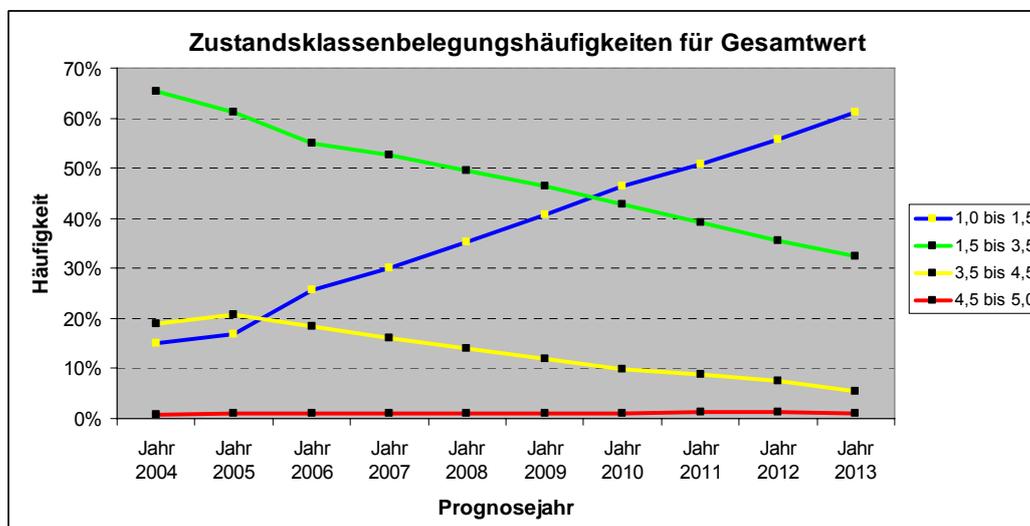


Abbildung 106: Übersichtsblatt des deutschen PMS (anonymisierte Daten)

Die Übersichtsblätter beinhalten die Ergebnisse eines einzigen PMS-Rechenlaufes, d.h. sie enthalten die Zustandsverläufe, welche anhand eines bestimmten Erhaltungsprogramms prognostiziert werden, das wiederum aus einem festgelegten Budget resultiert. Zusätzlich sind auf diesen Übersichtsblättern Kennzahlen zum PMS-Szenario aufgetragen. Durch solche Übersichtsblätter werden somit finanzielle und sonstige Vorgaben und die daraus resultierenden Folgen charakterisiert, so dass sie ein wertvolles Mittel zur Beurteilung, zum Vergleich und zur Kommunikation von Erhaltungsstrategien sind.

Es ist zu erwähnen, dass eine angepasste Form der Übersichtsblätter auch für die Darstellung von Berechnungen eines Bauwerks-Management-Systems (BMS) erarbeitet worden ist. Diese Darstellungsform wurde in die *Richtlinie zur Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken* [66] aufgenommen und wird nach Einführung dieser Richtlinie eine vorgeschriebene Standardvisualisierungsform des BMS sein.

Obwohl die oben abgebildete Darstellungsform der Klassenbelegungshäufigkeiten als etabliert gelten kann, wird in der Praxis häufig kritisiert, dass die Belegungshäufigkeiten der mittleren Zustandsklassen, d.h. der Zustandsklassen außerhalb des Randbereiches nicht exakt abgelesen werden können und somit ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Szenarien erschwert wird. In der Abbildung 107 wird ein Vorschlag für eine alternative Darstellungsform der Klassenbelegungshäufigkeiten aufgeführt.



**Abbildung 107: Vorschlag einer alternativen Darstellungsform für Klassenbelegungshäufigkeiten (anonymisierte Daten)**

Durch die alternative Darstellung würden die interessanten Inhalte ohne Informationsverlust gegenüber der bisherigen Darstellungsform deutlicher abgelesen werden können.

### 10.1.2 Summenlinien

Im Gegensatz zu Säulendiagrammen mit Klassenbelegungshäufigkeiten sind für die Summenlinien bisher noch keine geeigneten Verfahren bekannt, um Zustandsdynamiken mehrerer Jahre abzubilden. Es existieren aber bereits so genannte „Vergleichssummenlinien“, bei denen die Zustandsverteilungen zweier Messkampagnen auf einem Diagramm abgebildet werden und somit direkt verglichen werden können. In der Abbildung 108 ist ein Beispiel einer Vergleichssummenlinie dargestellt.

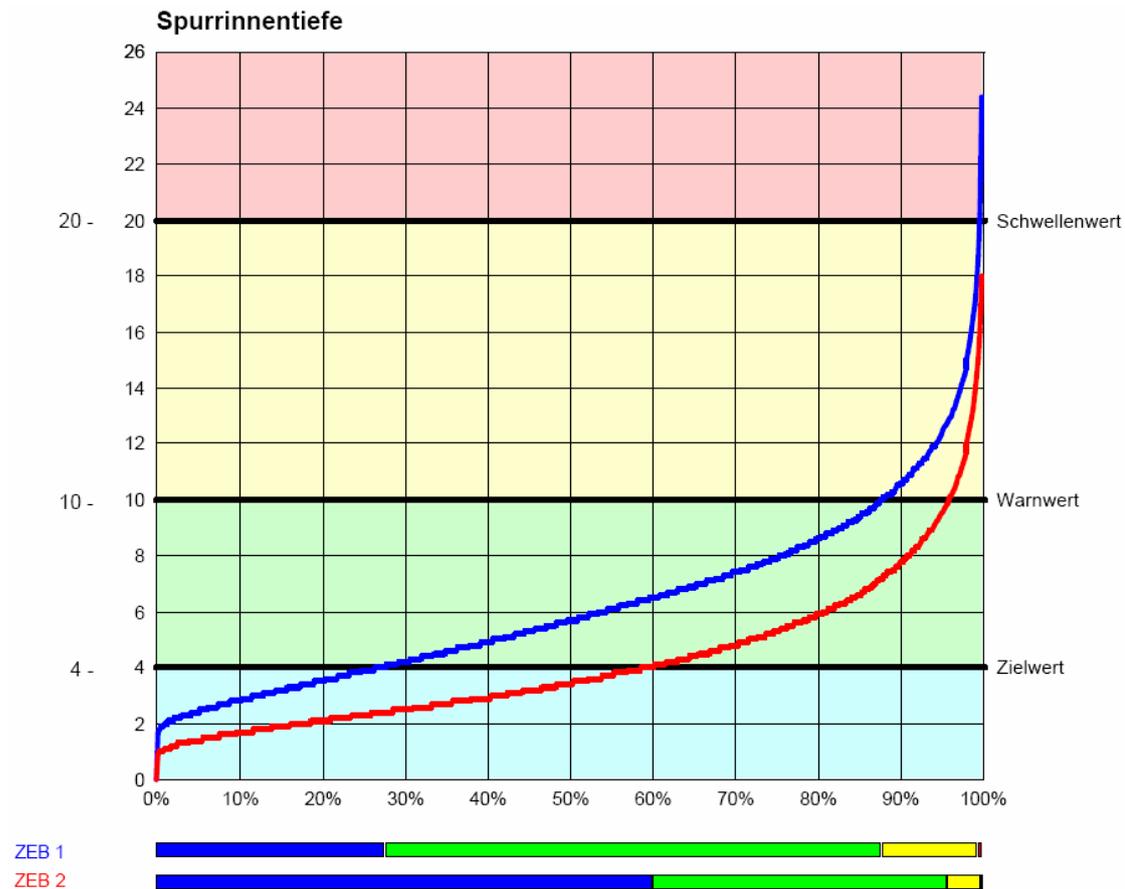


Abbildung 108: Beispiel einer Vergleichssummenlinie für Spurrinntiefe [57]

Die mit der Farbe rot eingetragene Summenlinie entspricht den zuletzt erfassten Zustandsdaten, so dass eine deutliche Verbesserung ersichtlich ist. Die Fläche zwischen den Summenlinien kann als Gesamtverbesserung interpretiert werden.

Dieser Ansatz kann dahingehend weiterentwickelt werden, dass die Zustandsverteilung mehrerer Jahre auf einem Diagramm abgebildet werden. Sofern hierbei ein geeignetes Unterscheidungsmerkmal für die einzelnen Linien (Strichmuster, Farbe) gefunden werden kann, ist eine entsprechende Auswertung ohne weiteres herstellbar. In der Abbildung 109 ist eine entsprechende Darstellung wiedergegeben.

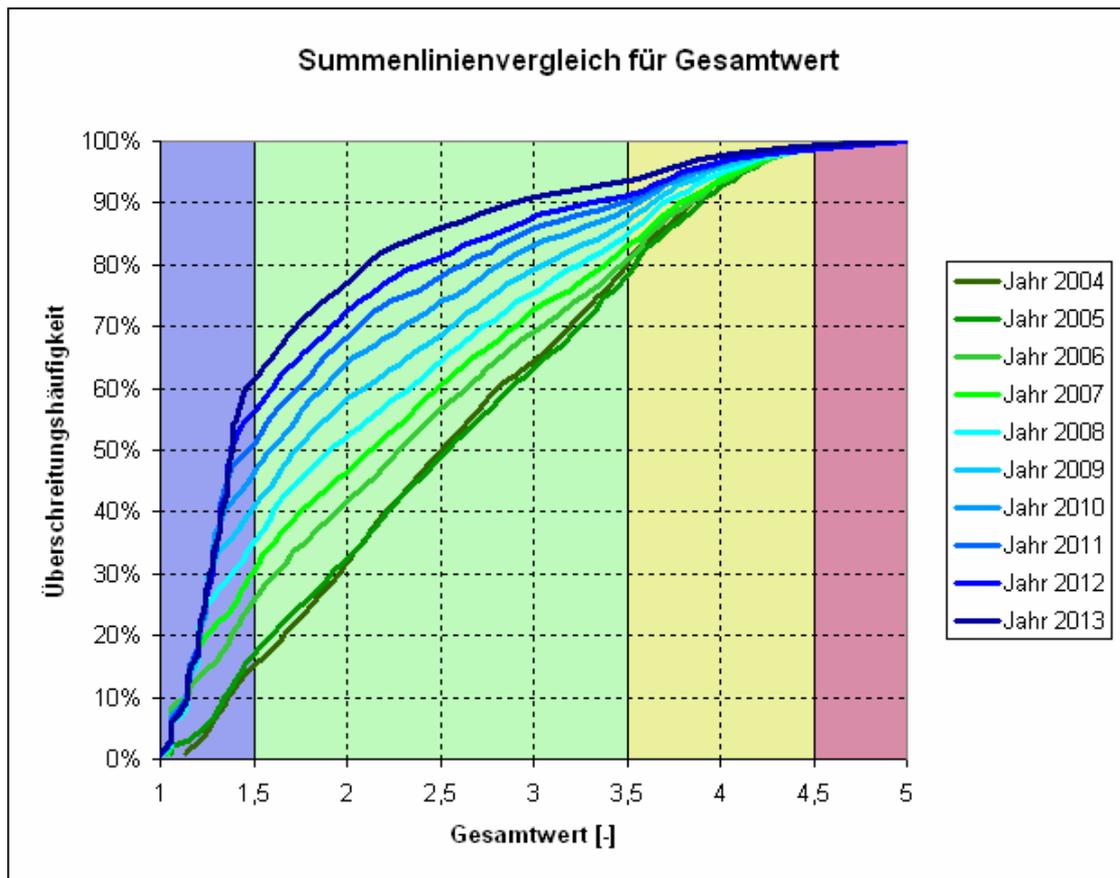


Abbildung 109: Beispiele für Summenlinien für Zustandsdynamiken

Da diese Darstellungsform Linien verwendet, kann der zusätzliche Informationsinhalt der Zustandsdynamik sehr gut abgebildet werden, ohne vorherige Informationen zu überdecken. Dies gilt insbesondere bei sehr starken Zustandsveränderungen. Bei geringen Veränderungen sind exakte Ablesungen aufgrund der Überdeckung problematisch, die generelle Vergleichbarkeit der Jahre bleibt aber weitestgehend erhalten.

### 10.1.3 Kenngrößen

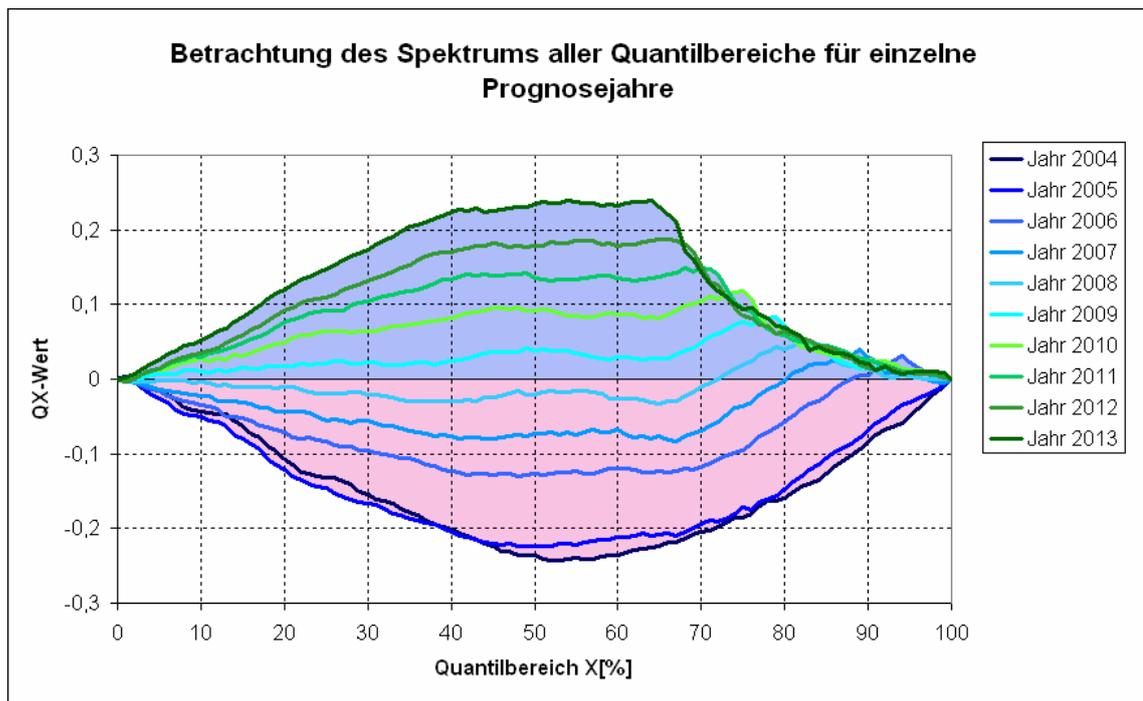
Aus Vollständigkeitsgründen soll an dieser Stelle auch auf die Darstellung des Verlaufs einzelner Kenngrößen, wie z.B. dem Mittelwert von Zustandsgrößen oder auch der im Kapitel 9 vorgestellten quantilenbasierten Qualität und Homogenität des Netzes eingegangen werden. Sofern diese Kenngrößen nicht im gegenseitigen Zusammenhang gebracht werden sollen, können sie anhand gewöhnlicher Verlaufsdiagramme oder Säulendiagramme dargestellt werden. Da diese Darstellungsform sowohl hinsichtlich der Gestaltung als auch der Verständlichkeit unproblematisch ist, soll hierauf nicht vertieft eingegangen werden.

## 10.2 Quantilenanalysen

Im Kapitel 9 wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Angebotsqualität des Netzes anhand eines quantilenbasierten Ansatzes bestimmt werden kann. Die Übertragung

der dortigen Überlegungen auf die Zustandsdynamik wurde im Kapitel 9.5 erarbeitet. Der Ansatz besteht darin, die Gesamtheit der Prognosewerte aller Jahre als Gesamtnetz zu betrachten und die Prognosewerte einzelner Jahre jeweils als Teilnetz zu definieren. Hierdurch wird die Qualität des Netzes in einem Jahr gegenüber der Gesamtqualität über alle Jahre dargestellt.

Falls nicht nur die Gesamtqualität eines Teilnetzes, sondern dessen Zusammensetzung aus den einzelnen Quantilen von Interesse ist, können diese zu allen Teilnetzen in eine Kurve aufgetragen werden. Durch eine gemeinsame Darstellung aller Kurven entsteht ein  $Q_x$ -Verteilungsdiagramm entsprechend Abbildung 110



**Abbildung 110: Beispiel für ein  $Q_x$ -Verteilungsdiagramm für die Zustandsdynamik; fiktive Musterdaten**

Durch entsprechende Einfärbung der Fläche zwischen Kurve und Abszisse kann sichtbar gemacht werden, ob zu einem bestimmten X%-Quantil überproportional viele oder überproportional wenige „schlechte Strecken“ im Teilnetz enthalten sind.

Bei der Betrachtung des Diagramms muss beachtet werden, dass die abgebildete Qualität stets den Bezug zu einer Gesamtdatenmenge aufweist, also stets relativ zu einer Ausgangsdatenlage ist. Im obigen Fall bildet die Datenmenge aller Jahre die Bezugsdatenmenge. Unter diesem Gesichtspunkt lässt sich ablesen, dass die blauen Linien, welche den anfänglichen Zustand wiedergeben einen weitestgehend negativen Verlauf aufweisen, während die grünen Linien der späteren Prognosejahre eher positive Werte anzeigen. Insgesamt stellt sich somit eine Verbesserung des Netzes über die Prognosejahre dar.

Bei einer genaueren Betrachtung ist zudem abzulesen, dass die Veränderung der Kurve insbesondere im linken und mittleren Bereich über den gesamten Zeitraum stattfindet, während im rechten Bereich die Kurven allmählich einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Da im rechten Bereich wiedergegeben wird, wie sehr die „guten“ Abschnitte in der jahresübergreifenden Gesamtdatenmenge repräsentiert werden, bedeutet dies, dass bereits nach wenigen Prognosejahren eine Überrepräsentierung der „guten“ Abschnitte vorherrscht und diese Überrepräsentierung beibehalten wird. Da diese Überrepräsentierung stets in Bezug auf die Gesamtdaten aller Jahre des identischen Netzes zu verstehen ist, bedeutet dies, dass in den späteren Jahren eine vergleichsweise gleich bleibende Anzahl von Abschnitten als die besten 10%, die besten 11% usw. festgestellt wird.

Beispielsweise weisen die Kurven der Jahre 2011 und 2012 ab dem Quantilbereich 70% einen ähnlichen Verlauf. Dies bedeutet, dass sie eine ähnliche Anzahl von Werten im 70%-Quantil, im 71%-Quantil usw. aufweisen. Werden also die besten 30 % der Gesamtdatenmenge betrachtet, finden sich darin genauso viele Elemente des Jahres 2011 wie des Jahres 2012. Das gleiche gilt für die besten 29 % des Gesamtnetzes, den besten 28 % und so weiter. Aus fachlichen Gründen liegt es nahe, zu vermuten, dass die besten 30 %, 29 %, 28 % usw. der jahresübergreifenden Gesamtdatenmenge einen Idealzustand nach Maßnahmedurchführung aufweisen.

Aus diesem Beispiel wird wiederholt deutlich, dass die Quantilenanalyse zwar die Möglichkeit gibt, neue Aussagen zur Netzqualität abzuleiten, die Interpretation der Zahlen und Kurven allerdings mit einem gewissen Einarbeitungsaufwand verbunden ist.

### **10.3 Streckenbänder**

Die Verfahren zur Erstellung von Zustandsprofilen werden in einigen, seltenen Fällen auch zur Darstellung von Zustandsveränderungen, d.h. zum projektbezogenen Zustandsvergleich verwendet. In der Abbildung 111 ist exemplarisch ein anonymisiertes Veränderungs-Zustandsprofil abgebildet.

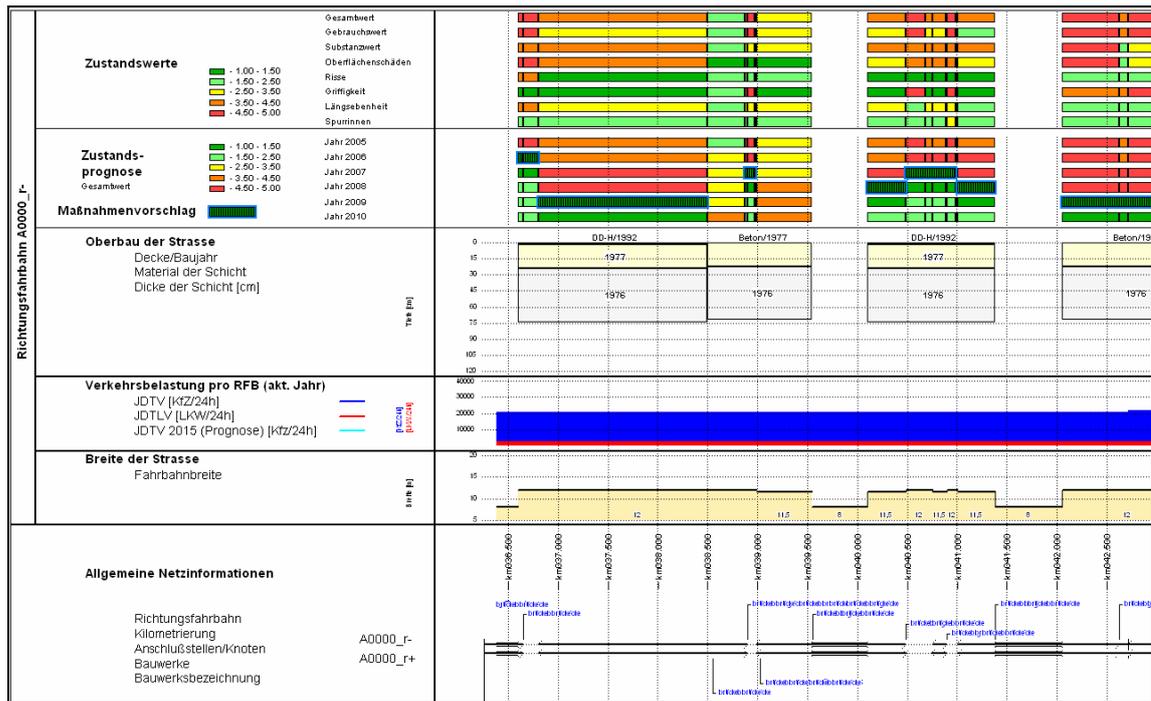


**Abbildung 111: Beispiel eines Veränderungs-Zustandsprofils [57]**

Die Zustandsdaten der beiden zu vergleichenden Messungen (im Beispiel sind es ZEB 1 und ZEB 2) werden mit unterschiedlichen Farben dargestellt. Um die Veränderungen deutlicher hervorzuheben, werden zudem die Zwischenräume bei Verbesserung blau und bei Verschlechterung rot eingefärbt. Solche Darstellungen sind gut dafür geeignet, die Plausibilität von Messdaten z.B. im Rahmen von Kontrollprüfungen oder Eignungsprüfungen zu vergleichen. In einigen Fällen wurde diese Darstellung auch dazu verwendet, um Maßnahmen, die zwischen zwei Erfassungen stattgefunden haben und nicht digital gespeichert wurden, nachträglich zu identifizieren.

Die Einschränkung bei dieser Darstellungsform ist, dass stets nur zwei Messungen gleichzeitig verglichen werden können. Sobald mehrere Jahresmessungen oder Prognosedaten mehrerer Jahre abgebildet werden sollen, wird diese Visualisierung schnell unübersichtlich.

Eine geeignete Möglichkeit zur Visualisierung von Zustandsdaten mehrerer Jahre, beispielsweise von PMS-Ergebnissen, kann beispielsweise darin bestehen, auf dem Streckenband einen zusätzlichen Block für die prognostizierten Zustände vorzusehen und darin die Zustände einzelner Prognosejahre anhand der Klassenzuordnung farblich zu unterscheiden. In der Abbildung 112 ist exemplarisch ein Ausschnitt aus der Darstellungsform der PMS-Berechnungsergebnisse in Österreich mit fiktiven Musterdaten wiedergegeben.



**Abbildung 112: Ausschnitt aus einem Streckenband mit Darstellung der Zustandsprognose 2005-2010 mit fiktiven Musterdaten**

Anhand solcher Streckenbanddarstellungen kann für jeden Abschnitt abgelesen werden, in welchem Jahr eine bestimmte Zustandsklasse erreicht wird. Darüber hinaus können wie in dem Beispiel in Abbildung 112 auch Zustandsprognosen für bestimmte Erhaltungsprogramme durchgeführt werden, wobei die jeweiligen Maßnahmevorschläge und die damit verbundenen Zustandsverbesserungen deutlich hervorgehoben werden können.

### 10.4 Karten

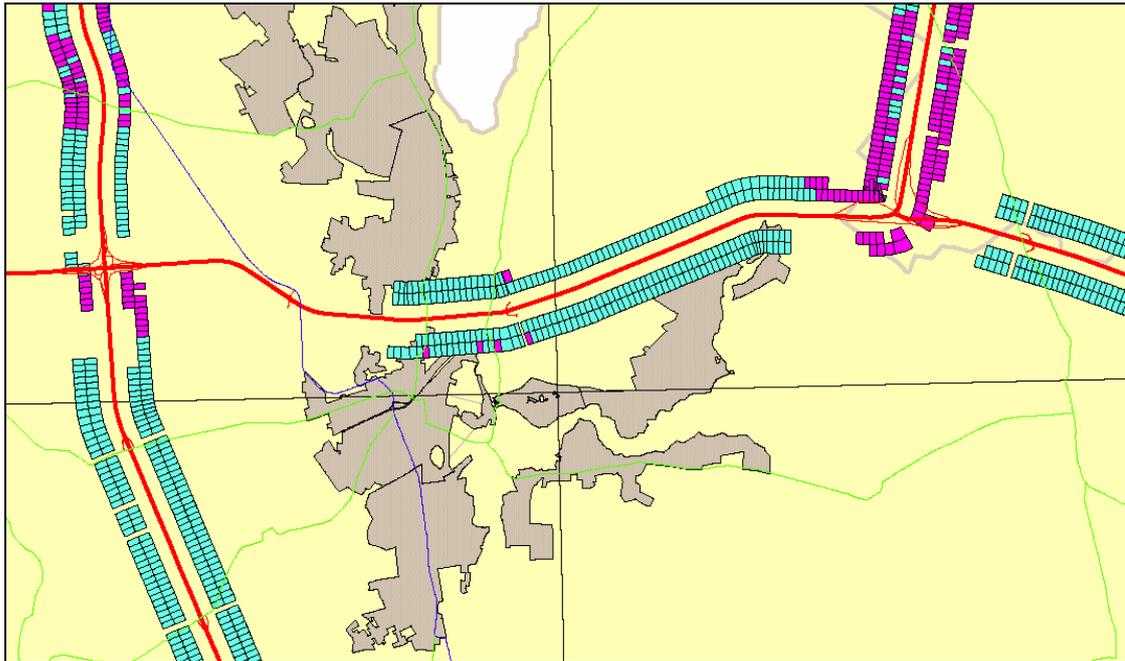
Die Abbildung der Zustandsdynamik auf Karten ist eine besondere Herausforderung, da bei dieser Auswerteform der darstellbare Inhalt sehr begrenzt ist. Die Position einzelner Elemente auf der Karte erfolgt weitestgehend aufgrund der geographischen Lage, so dass nur noch durch Form und Farbe Informationen vermittelt werden können. Bereits bei der Vorstellung der Darstellungsformen für die statischen Zustände wurde deutlich, dass auf Karten stets weniger zustandsbezogene Informationsinhalte vorhanden sind, als bei anderen Darstellungsformen. Unabhängig davon können aber auch bei Karten einige Verfahren gefunden werden, um aussagefähige Visualisierungen der Zustandsdynamik zu erstellen. Nachfolgend werden verschiedene Darstellungsvorschläge vorgestellt:

- Karten mit Zustandsdifferenzen
- Karten mit Zustandsstreifen zeitlich versetzter Zustände
- Geostatistiken

Die einzelnen Darstellungsformen werden nachfolgend vorgestellt.

#### 10.4.1 Karten mit Zustandsdifferenzen

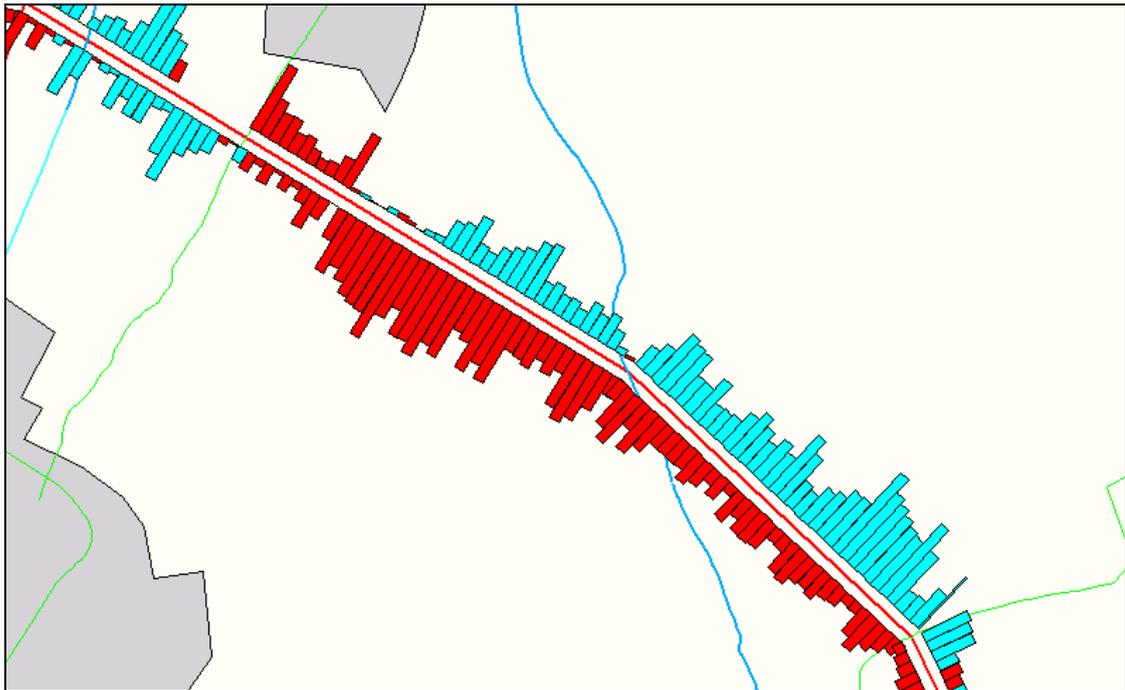
Ein bisher bereits praktiziertes Verfahren zur Darstellung der Zustandsdynamik ist die Ermittlung und Abbildung von Zustandsdifferenzen. In der Abbildung 113 ist ein Ausschnitt einer Karte wiedergegeben, auf der Zustandsveränderungen qualitativ durch zwei Farben (blau für Verbesserung / rot für Verschlechterung) eingetragen wurden.



**Abbildung 113: Karte mit qualitativen Zustandsverbesserungen (blau) und Zustandsverschlechterungen (rot) eines ausgewählten Merkmals [57]**

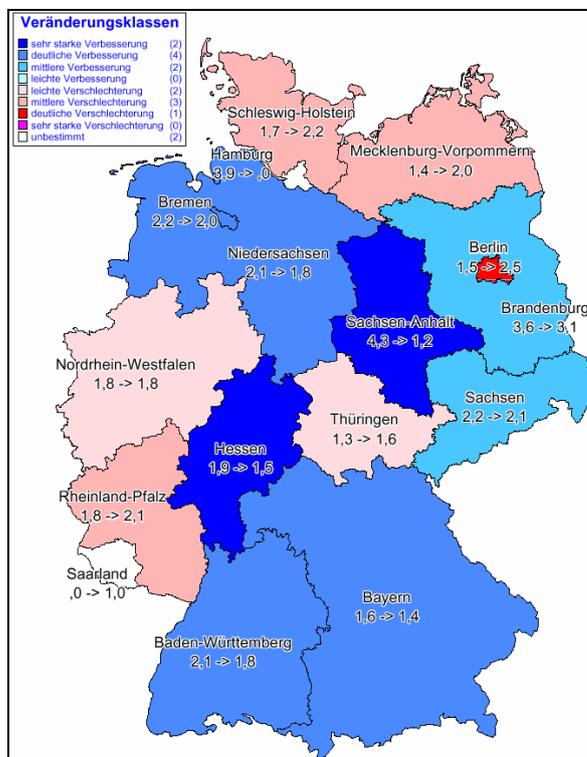
Die Einzeichnung der Auswerteabschnitte mit konstanter Breite erlaubt die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Fahrstreifen. Durch eine Abstufung der Farben können auch starke Zustandsveränderungen von schwächeren Veränderungen unterschieden werden. Allerdings ist die Möglichkeit, die Änderungen zu quantifizieren durch diese Darstellungsform nur eingeschränkt möglich.

Demgegenüber kann durch die Einzeichnung von Auswerteabschnitten mit variabler Breite eine quantitative Veränderung exakt visualisiert werden. In der Abbildung 114 ist ein Ausschnitt einer solchen Karte wiedergegeben.



**Abbildung 114: Karte mit quantitativen Zustandsverbesserungen (blau) und Zustandsverschlechterungen (rot) eines ausgewählten Merkmals [57]**

In der Abbildung 115 ist ein weiteres Beispiel einer Darstellung von Zustandsveränderungen wiedergegeben, in dem Regionen aufgrund der darin gemessenen Zustandsveränderungen unterschiedlich eingefärbt worden sind.

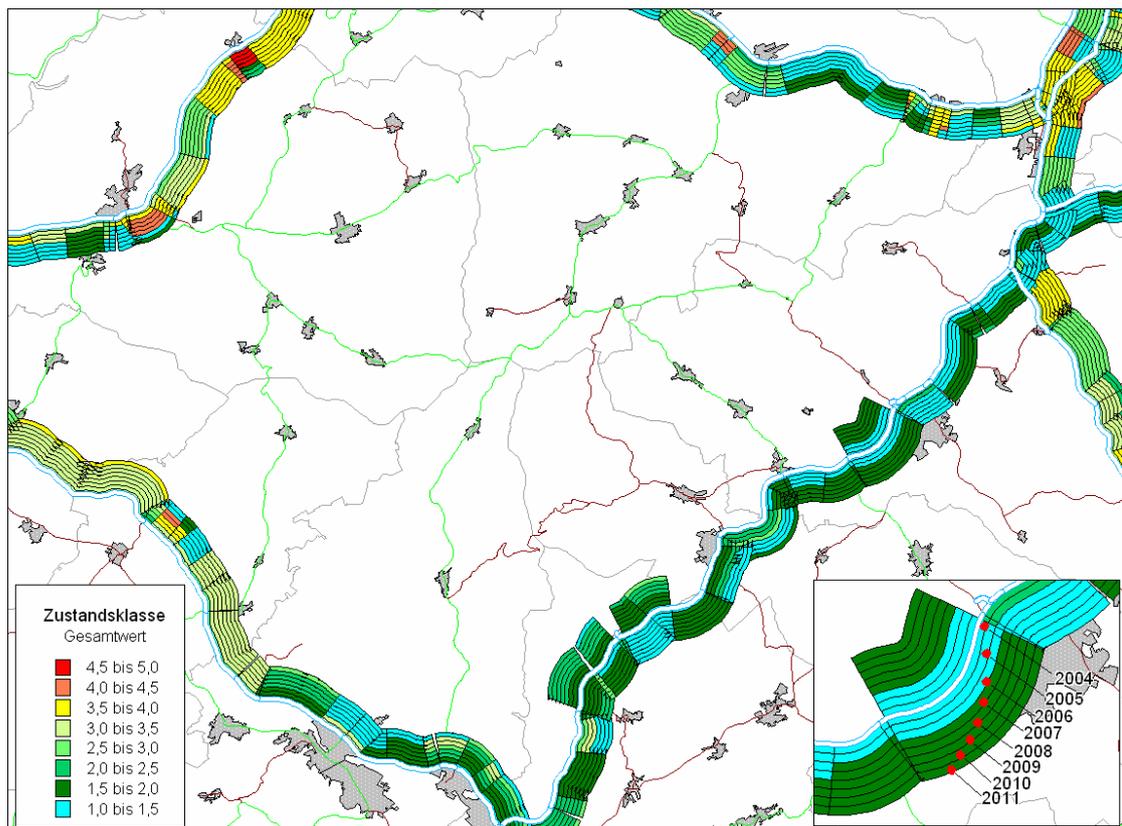


**Abbildung 115: Thematische Karte mit Zustandsveränderungen der Bundesländer (fiktive Musterdaten) [57]**

Durch diese Formen der Darstellung können genau zwei Zustandsverteilungen miteinander verglichen werden. Für die obigen Beispiele waren dies reale, aufeinander folgend durchgeführte Zustandserfassungen. Prinzipiell können die Darstellungsverfahren aber auch auf prognostizierte Zustandsverteilungen aus PMS-Berechnungen angewendet werden. Hierbei wäre es beispielsweise sinnvoll, den Ausgangszustand zu Berechnungsbeginn mit einem Zustand zum Ende des Planungszeitraums oder des Analysezeitraums zu vergleichen. Nachteilig bei dieser Darstellungsform ist, dass die dazwischen liegenden Zustandsentwicklungen nicht im Einzelnen dargestellt werden und somit nicht die gesamte Zustandsdynamik abgebildet werden kann. Hierfür sollen andere Verfahren erarbeitet werden.

#### 10.4.2 Karten mit Zustandsstreifen

Für eine detaillierte Betrachtung ist die Darstellung des Zustandes mit Auswerteabschnitten bzw. PMS-Abschnitten in einheitlicher Breite geeignet. Durch mehrere nebeneinander liegende Streifen können zeitlich aufeinander folgende Zustände dargestellt werden. In der Abbildung 116 ist ein Ausschnitt einer solchen Karte exemplarisch wiedergegeben



**Abbildung 116: Beispiel einer Zustandsdynamik durch Zustandsstreifen (anonymisierte Daten)**

Die Darstellung der Zustandsdynamik anhand von Zustandsstreifen ist besonders geeignet, um eine Detailbetrachtung an Strecken durchzuführen, die von besonderem

Interesse sind. Für eine allgemeine Übersichtsbetrachtung führen die sich teilweise stark überlappenden Inhalte zu einer Verfälschung des Gesamteindrucks und die Zustände bestimmter Zeitperioden sind nicht intuitiv ablesbar. Um eine allgemeine Übersicht zu erhalten, sind die geostatistischen Verfahren aus den Kapiteln 10.4.3 besser geeignet.

### **10.4.3 Geostatistiken**

Neben der Detailbetrachtung durch Streifenkarten und Streckenbänder kann es für den Entscheidungsträger von Bedeutung sein, eine flächendeckende Übersicht über die Zustandsentwicklung zu erhalten. Eine solche Auswertung wäre nicht nur eine Unterstützung der Entscheidungsfindung, sondern auch ein wertvolles Darstellungswerkzeug zur Präsentation der Auswirkung von Entscheidungen zur Öffentlichkeitsarbeit.

Es sollte somit eine Darstellungsform gefunden werden, welche sowohl übersichtlich als auch einfach und intuitiv verständlich erscheint. Der hier erarbeitete Entwurf ist eine Weiterentwicklung von geostatistischen Darstellungen. Der Ansatz des Entwurfs besteht darin, das Gesamtnetz nach geographischen oder administrativen Gesichtspunkten in Teilnetze einzuteilen, den Verlauf einzelner Zustandskenngrößen der Teilnetze zu ermitteln und gebietsweise darzustellen. Die Darstellung der Kenngrößen kann durch eines der Diagramme aus den Kapiteln 10.1 oder 10.2 erfolgen. In der Abbildung 117 ist das Beispiel einer geostatistischen Darstellung mit  $Q_x$ -Verteilungsdiagrammen gemäß Kapitel 10.2 abgebildet.

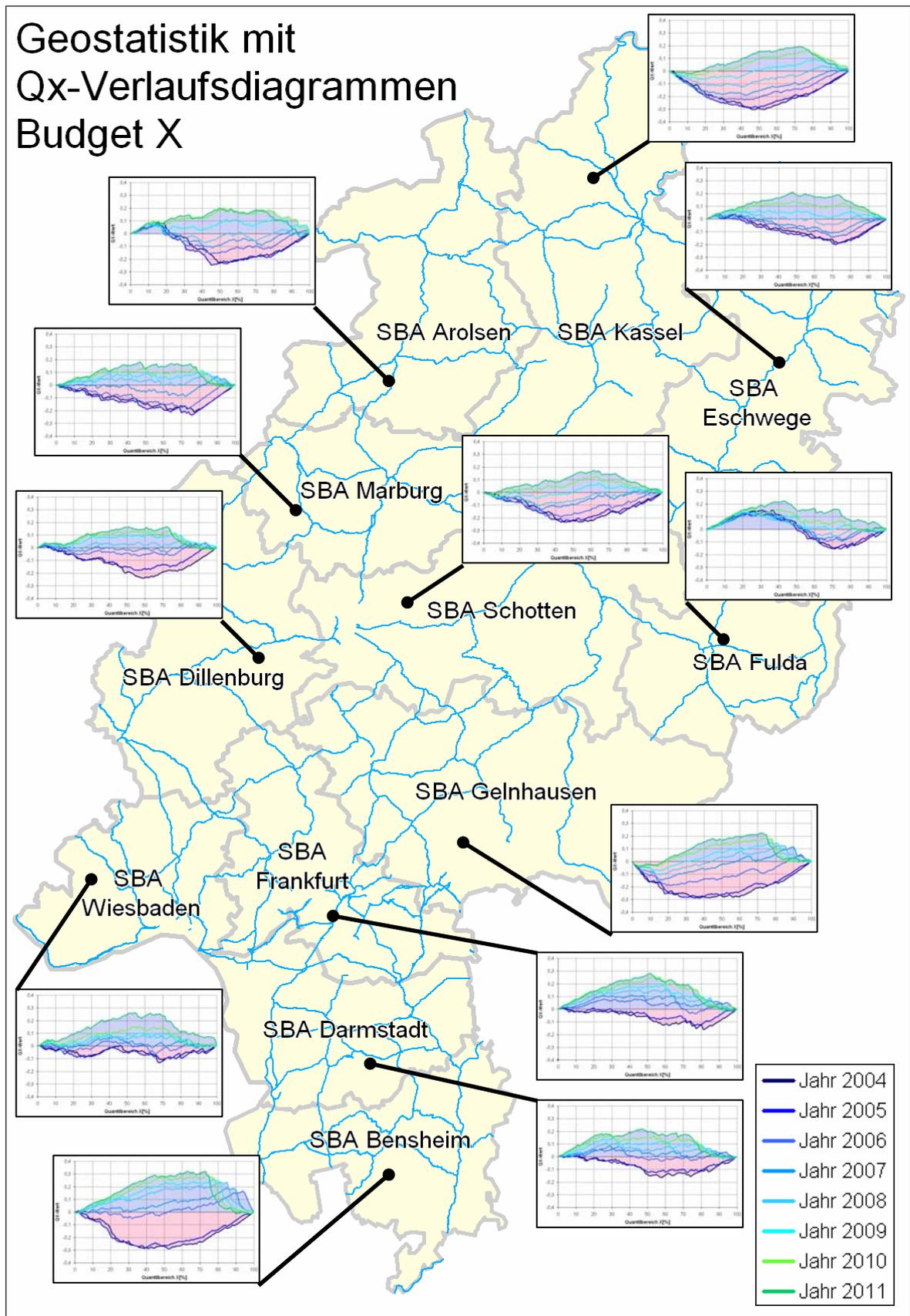
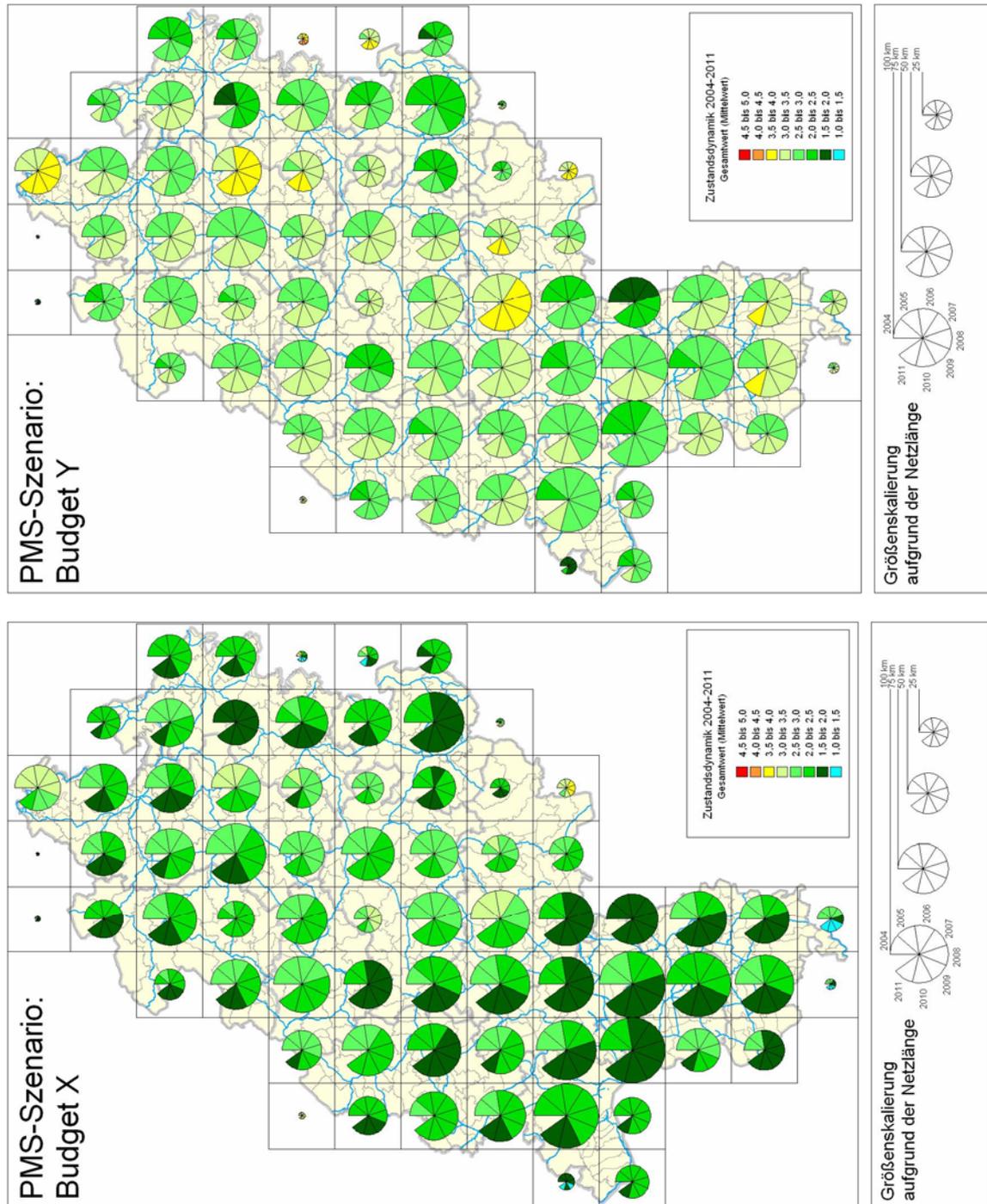


Abbildung 117: Beispiel einer Geostatistik mit  $Q_x$ -Verteilungsdiagrammen; fiktive Musterdaten

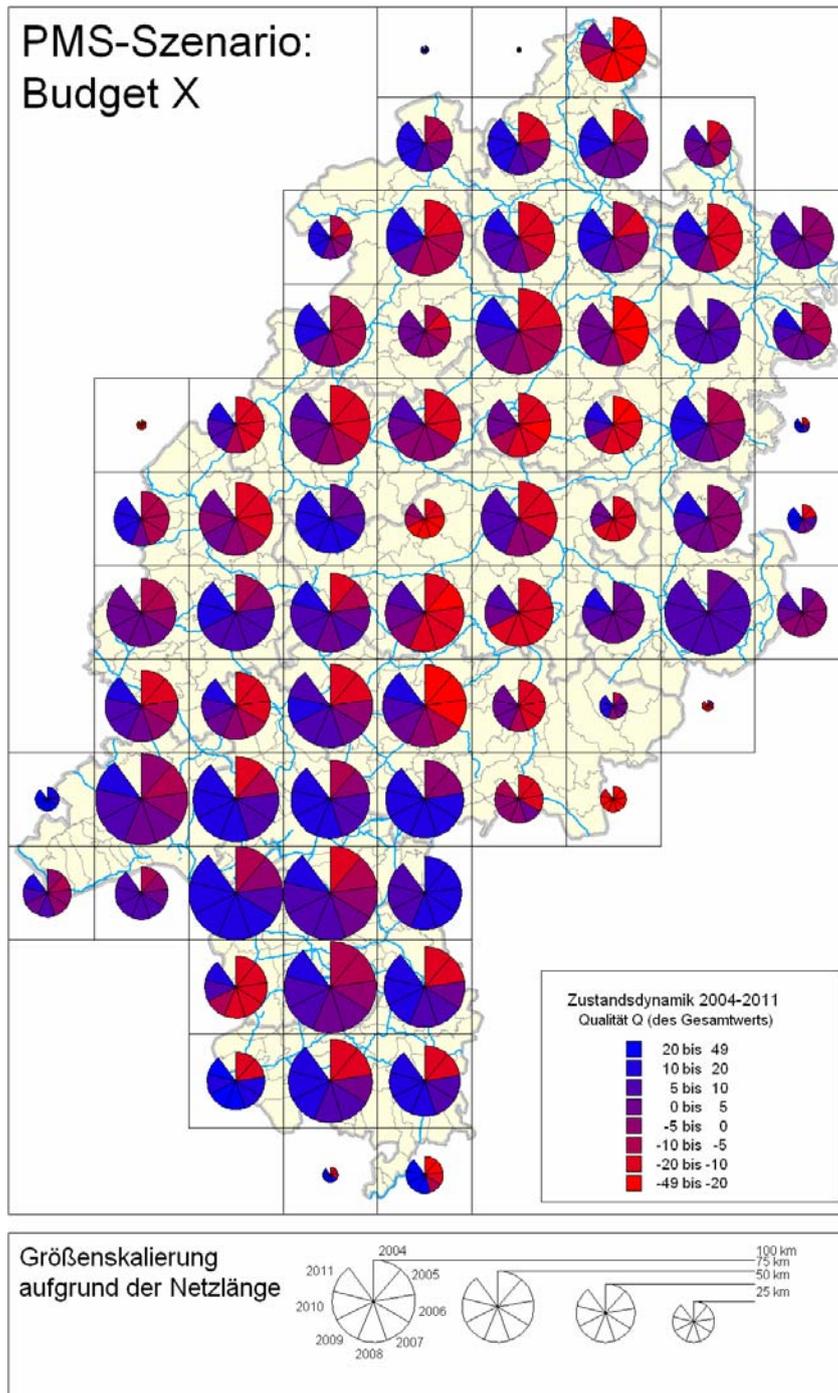
Die Einteilung des Netzes kann entweder nach administrativen oder nach geographischen Kriterien durchgeführt werden. In der Abbildung 117 wurde das Netz aufgrund der administrativen Zuständigkeit der Straßenbauämter aufgeteilt. Aufgrund des zum Verständnis notwendigen, mathematischen Hintergrundes ist Darstellung von  $Q_x$ -Verteilungsdiagrammen nur eingeschränkt für die Öffentlichkeitsarbeit einsetzbar. Für die Präsentation von Zustandsentwicklungen für eine breitere Anwenderbasis sollte eine intuitivere Darstellung gefunden werden.

In der Abbildung 118 ist ein alternativer Vorschlag aufgeführt, der im Weiteren als „Sektorendiagramm“ der Zustandsdynamik bezeichnet werden soll. Dort werden teilnetzbezogenen Zustandsklassen ermittelt, denen unterschiedliche Farben zugeordnet werden. Aufgrund der ermittelten Zustandsklassen werden im Uhrzeigersinn einzelne Kreissektoren eingefärbt, deren Größe durch das jeweils repräsentierte Teilnetz bestimmt wird. Zu Vergleichszwecken wurden die Ergebnisse zweier unterschiedlicher, anonymisierter Rechenläufe abgebildet. Das fiktive Budget X verfügt über ausreichende Mittel zur kontinuierlichen Zustandsverbesserung, während die Mittel aus dem Budget Y nicht zur Aufrechterhaltung des Zustandsniveaus ausreichen. Die Auswirkungen werden gebietsweise abgebildet.



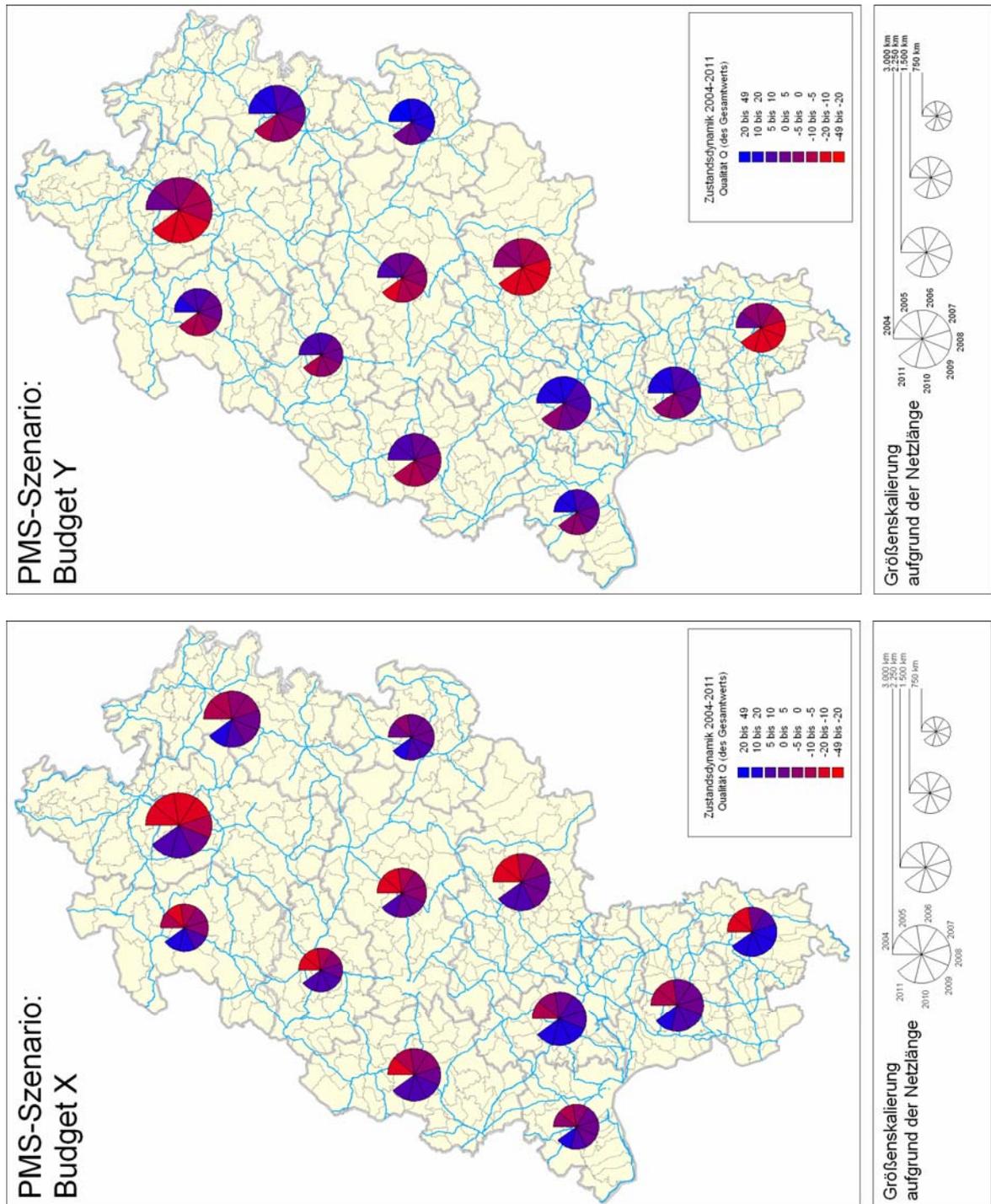
**Abbildung 118: Vorschlag einer neuen Darstellungsform der Zustandsdynamik als Sektorendiagramm; fiktive Musterdaten für Hessen**

In der obigen Abbildung wurde exemplarisch keine administrative, sondern eine rein geographische Einteilung des Netzes in Teilnetze vorgenommen. Die Zustandsklassen wurden aufgrund der (statistisch bedenklichen) arithmetischen Mittelwerte des Gesamtwertes gebildet. Als Alternative können auch Sektorendiagramme aufgrund des quantilenbasierten Q-Wertes erzeugt werden.



**Abbildung 119: Vorschlag für ein Raster-Sektorendiagramm der -zustandsdynamik anhand von Quantilenanalysen; fiktive Musterdaten für Hessen**

Für die administrative Bewertung unterschiedlicher Szenarien kann es von Vorteil sein, nicht die geographischen, sondern die verwaltungstechnischen Grenzen für die Darstellung zu verwenden. In der Abbildung 120 wurden die Sektorendiagramme der Zustandsdynamik für die Straßenbauämter in Hessen anhand der Quantilenanalyse für zwei unterschiedliche Szenarien erstellt.



**Abbildung 120: Vorschlag für SBA-Sektorendiagramme der Zustandsdynamik anhand von Quantilenanalysen, fiktive Musterdaten**

Die hier vorgestellten Verfahren lassen sich hinsichtlich der Aufteilung der Daten und des dargestellten Inhaltes beliebig variieren und kombinieren. Es ist aber bereits an den wenigen Beispiel zu erkennen, dass durch geeignete Auswerteformen die derzeit bereits im Rahmen der regulären PMS-Anwendung entstehenden Daten mit relativ geringem Aufwand auch für die Entscheidungsträger aufgabengerecht aufbereitet werden können. Solche Darstellungen können insbesondere auch verstärkt für eine geziel-

te Informationspolitik und Öffentlichkeitsarbeit zur Erhöhung der Akzeptanz für das Erhaltungsmanagement eingesetzt werden.

## 11. Zusammenfassung und Ausblick

Das Fernstraßennetz ist als wesentlicher Teil der Verkehrsinfrastruktur eine der bedeutendsten Voraussetzungen für die nachhaltige, erfolgreiche Wirtschaftsentwicklung einer Gesellschaft. Die Erhaltung einer anforderungsgerechten Qualität und Nutzbarkeit des Straßennetzes ist Aufgabe des Erhaltungsmanagements. Hierbei stellt sich die Herausforderung, dass das bestehende Straßennetz durch kontinuierliche Investitionen in Neu- und Ausbau ein immer wertvoller werdendes Anlagevermögen darstellt, dessen Angebotsqualität durch den rationalen Einsatz der verfügbaren Mittel zu erhalten ist.

Zum effektiven Einsatz der verfügbaren Mittel müssen die Entscheidungen zur Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen anhand objektiver Kriterien getroffen werden. Damit ist die Erfassung des Straßenzustands und die anschließende Bewertung und Auswertung der Zustandsdaten eine Grundvoraussetzung zur systematischen, rationalen Erhaltungsplanung. In Österreich und Deutschland wird der Zustand regelmäßig für das gesamte Fernstraßennetz erfasst und ausgewertet. Die bisherige Nutzung der Zustandsdaten erfolgte dabei vor allem durch den Einsatz von Pavement Management Systemen (PMS), mit denen anhand von softwaregestützten Modellrechnungen die Auswirkungen unterschiedlicher Erhaltungs- und Budgetvorgaben berechnet werden können, sowie durch Visualisierung von der Zustandsdaten anhand von Standardverfahren.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die vorhandenen Verfahren zur Nutzung von Zustandsdaten systematisch zusammenzustellen und dahingehend zu prüfen, ob sie die vom Erhaltungsmanagement zu bearbeitenden Aufgaben in erschöpfendem Maße unterstützen oder ein Potential besteht, welches eine weitergehende Nutzung von Zustandsdaten auf Netzebene erlaubt. Hierzu wurden zunächst die Prozesse zur Ermittlung von Zustandsdaten detailliert zusammengestellt und beschrieben. Anschließend wurden die existierenden Verfahren zur Nutzung dieser Daten systematisiert und kritisch betrachtet.

Das Ergebnis der Systematisierung ist, dass die wesentlichen Aufgaben des Erhaltungsmanagements, insbesondere auf der Politik- und Netzebene, durch die bestehenden Verfahren weitestgehend bedient werden. Es zeigte sich aber auch, dass bezüglich bestimmter Fragestellungen neue, weitergehende Auswertungsmöglichkeiten für Zustandsdaten bestehen.

Aufgrund der Vielseitigkeit der Fragestellungen im Erhaltungsmanagement sind prinzipiell mehrere, unterschiedliche Ansätze zur weitergehenden Nutzung von Zustandsdaten denkbar. Da diese nicht alle in der vorliegenden Arbeit erschöpfend behandelt werden konnten, wurde die Aufgabe darauf beschränkt, drei der wesentlichsten Fragestellungen exemplarisch aufzugreifen und geeignete Verfahren zu erarbeiten und anzuwenden.

Eine wichtige, bisher nur in eingeschränktem Umfang praktizierte Anwendung ist die Überprüfung der heutigen Zustands-Prognosemodelle des PMS anhand realer Daten. Die Zustandsprognose, welche ein Kernbestandteil des PMS und somit der systematischen Erhaltung ist, beruht zwar originär auf der Analyse von Zustandsdaten, in den Ländern Deutschland und Österreich liegen jedoch erstmalig nach Erarbeitung der Prognosemodelle neuere, aktuelle Zustandsdaten vor, die in einer entsprechenden Analyse früheren Prognoseergebnissen gegenübergestellt werden konnten. Aufgrund der fachlichen Randbedingungen der Zustandsdaten konnten zur Prüfung der Signifikanz der Chi-Quadrat-Test, nicht erfolgreich angewendet werden, und es konnte begründet werden, dass auch die Anwendung weiterer statistischer Standardtestverfahren nicht zielführend sei. Aus diesem Grund wurden alternative, geeignete Verfahren erarbeitet. Hierbei erwies sich eine Visualisierung von relativen Übergangshäufigkeiten als wertvolle Vergleichsbasis, anhand der für das österreichische und das deutsche Prognosemodell neue Aussagen getroffen werden konnten. Die erweiterte Nutzung von Zustandsdaten zur Überprüfung der Prognosemodelle wurde in **Kapitel 8** behandelt.

Ein weiterer, aufgegriffener Aspekt besteht darin, dass die Quantifizierung der Angebotsqualität eines Straßennetzes bisher nur durch statistische Standardkenngrößen der Zustandsdaten erfolgte, insbesondere den arithmetischen Mittelwert. Diese Vorgehensweise wird zum einen den sehr unterschiedlichen Verteilungen der Zustandsdaten nicht gerecht und ist zum anderen für die Zustandswerte aus statistischen Gründen nicht zulässig. In einer entsprechenden Diskussion wurde dieser Aspekt im Kapitel 8 erläutert. Im **Kapitel 9** wurde daher ein alternatives Verfahren zur Quantifizierung der Lage und der Streuung einer Zustandsverteilung erarbeitet, welches auf einer erweiterten Quantilenanalyse basiert.

Als letzte Nutzungserweiterung wurde in **Kapitel 10** die Visualisierung der Zustandsdynamik, d.h. der Veränderung des Straßenzustandes über die Zeit, behandelt. Das PMS ist in der Lage, die Veränderung des Zustands unter verschiedenen Bedingungen, z.B. bei unterschiedlichen Erhaltungsbudgets, zu prognostizieren. Diese Prognosedaten werden aber bisher nicht in einer Form aufbereitet, die es den Entscheidungsträgern auf der Politik- und zum Teil auch auf der Netzebene erlaubt, bei Bedarf, zeitnah und aufgabengerecht Informationen abzurufen. Die im Kapitel 10 vorgestellten Ansätze zeigen verschiedene, neue Verfahren zur Visualisierung der Zustandsdynamik auf. Die Verfügbarkeit von geeigneten Visualisierungsverfahren trägt erfahrungsgemäß enorm zur Steigerung der Akzeptanz der abgebildeten Daten bei und ist daher für ein erfolgreiches Erhaltungsmanagement unabdingbar.

Alle vorgestellten Ansätze wurden nicht nur theoretisch konzipiert, sondern auch anhand von praktischen Beispielen umgesetzt. Hierbei wurden verschiedene **Softwareanwendungen entwickelt** und für Beispielrechnungen, anhand von realen Zustandsdaten des kompletten Bundesstraßennetzes im Bundesland Hessen sowie aller Strecken der Straßenkategorien A und S in Österreich **angewendet**. Durch die praktischen

Anwendungen wurde der Nachweis erbracht, dass die erarbeiteten Verfahren praktikabel und vollständig kompatibel zu den existierenden Datenbeständen beider Länder sind. Hierdurch können zukünftig die Zustandsdaten, welche mit einem hohen Aufwand erhoben werden und flächendeckend zur Verfügung stehen, ohne zusätzlichen Datenerhebungsaufwand einer weitergehenden Nutzung auf Politik- und Netzebene zugeführt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Straßenbaubericht 2001**  
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bundesanzeiger  
Verlagsgesellschaft mbH  
Bonn 2002
- [2] **Bundshaushaltsgesetz 2004**  
Bundesfinanzministerium  
Berlin 2005
- [3] **Beckers T., Brenck A., von Hirschhausen C. und Klatt P.:**  
Die ASFINAG und das österreichische Modell der Fernstraßenfinanzierung;  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik  
Berlin 2005
- [4] **BFG:**  
Bundesfinanzgesetz 2006; Anlage I: Bundesvoranschlag; Bundesministerium  
für Finanzen  
Wien 2006
- [5] **Weninger-Vycudil A.**  
Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches Pavement Mana-  
gement System, Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhal-  
tung der Technischen Universität Wien, Heft 14  
Wien 2003
- [6] **Schmuck A.**  
Straßenerhaltung mit System, Kirschbaum Verlag  
Bonn 1987
- [7] **Oertelt S.:**  
Empirische Absicherung der Verhaltensfunktionen; Forschungsprogramm Stra-  
ßenwesen FE 09.128, Bundesanstalt für Straßenwesen  
in Bearbeitung (2006)
- [8] **Rübensam J. und Schulze F.**  
Entwicklung einer Methodik zur zweckmäßigen Zusammenfassung maßnah-  
mebedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zu-  
stands- und Bestandsdaten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstech-  
nik, Heft 736  
Bonn 1996

- [9] **Thomas F., Weninger-Vycudil A. und Simanek P.**  
Automated Segmentation of Pavement Measurements Based on Bayesian Ideas: Experiences from Austria. Proceedings der 6th International Conference on Managing Pavements  
Brisbane, Australien 2004
- [10] **Litzka J., Vycudil A. und Streckel C.**  
Österreichischer Schadenskatalog für Asphalt- und Betonstraßen, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien im Auftrag der ASFINAG, unveröffentlicht  
Wien 2000
- [11] **Litzka J., Vycudil A. und Streckel C.**  
Arbeitsanweisung zur Durchführung der visuellen Straßenzustandserfassung 2000 auf den österreichischen Bundesstraßen, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien im Auftrag des BMVIT, unveröffentlicht  
Wien 2000
- [12] **Oertelt S.**  
„Katalog typischer Zustands- und Schadensbilder auf Bundesautobahnen“ im Forschungsbericht „Typisierung von Schadensbilder im Kontext mit den Ergebnissen der Zustandserfassung und –bewertung auf Bundesfernstraßen“, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 801  
Bonn 2002
- [13] **Merkblatt für Ebenheitsprüfungen**  
Merkblatt für Ebenheitsprüfungen, FG Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, FGSV Verlag  
Köln 1976
- [14] **TP Griff-StB (SRT)**  
Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT, FGSV Verlag  
Köln 2004
- [X4] **Schniering Ingenieurgesellschaft mbH**  
Werbematerial aus der Homepage der Firma Schniering Ingenieurgesellschaft mbH <http://www.schniering.com>  
Dezember 2005
- [15] **arsenal research:**  
Werbematerial aus der Homepage der Firma Arsenal Ges.m.b.H zum System „Roadstar“ <http://www.arsenal.ac.at/roadstar>  
Dezember 2005

- [16] **Kummer H.W.**  
Unified Theory of Rubber and Tire Friction. Pennsylvania University, Eng. Res. Bull. B-94, College of Eng. Pennsylvania State Univ.  
Pennsylvania, U.S.A, 1966
- [17] **Moore D.F.**  
The sinkage of flat plates on smooth and rough surfaces; Dissertation Pennsylvania State University  
Pennsylvania, U.S.A, 1963
- [18] **Schulze K.-H.**  
Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft103  
Bonn 1970
- [19] **Schulze, K.-H.**  
Griffigkeit und Rauheit. Im Handbuch des Straßenbaus, Bd.1 Hrsg. Wehner, Schulze, Siedek im Springer-Verlag  
Berlin 1979
- [20] **Eichhörn U.**  
Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn – Einflussgrößen und Erkennung, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr.222,VDI Verlag GmbH  
Düsseldorf, 1994
- [21] **Kummer, H.W.**  
Versuch der Festlegung von Anforderungen an die Griffigkeit von Hauptverkehrsstraßen außerhalb von Ortschaften, Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Heft 2, Hrsg. v. B. Wehner und K.-H. Schulze, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn  
Berlin, 1968
- [22] **TP Griff-StB, BMV ARS 24/01**  
Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil: Messverfahren SCRIM, BMVBW  
Bonn 2001
- [23] **Mechatronic AG**  
Werbematerial aus der Homepage der Firma Mechatronic  
<http://www.mechatronic.de>  
Dezember 2005

**[24] Technische Universität Berlin**

Selbstvorstellung der Forschungsbereiche der Technischen Universität Berlin auf der Homepage [http://www.tu-berlin.de/fb9/strassenbau/vorstellung\\_dt.html](http://www.tu-berlin.de/fb9/strassenbau/vorstellung_dt.html)

Dezember 2005

**[25] ZTV Asphalt-StB 01**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, Ausgabe 2001, BMVBW

FGSV Verlag, Köln 2001

**[26] ZTV Beton-StB 01**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2001, BMVBW

FGSV Verlag, Köln 2001

**[27] ZTV ZEB-StB**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und –bewertung, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen

Derzeit nur als Entwurf verfügbar (2006)

**[28] Offrell P. und Sjögren L.:**

Crack Measures and Reference Systems for a Harmonised Crack data Collection Using Automatic Systems –Proceedings zu 2<sup>nd</sup> European Pavement and Asset Management Conference

Berlin 2004

**[29] Wang K.C.P., Elliott R.P., Meadors A. und Evans M.:**

Application and Validation of an Automated Cracking Survey System – Proceedings zu 6<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements

Brisbane, Australien 2004

**[30] Loranca R.L.Á. und de Diego J.A.V.:**

Automatic Cracking Data Collection – Beitrag zur 2<sup>nd</sup> European Pavement and Asset Management Conference

Berlin 2004

**[31] Pratt D.N. und Ferguson R.A.:**

Simultaneous Collection of Pavement Condition Parameters By Automated Means For Road Asset Management – 6<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements

Brisbane, Australien 2004

- [32] **Molzer C., Felsenstein K., Viertl R., Litzka J. und Vycudil A.**  
Statistische Methoden zur Auswertung von Straßenzustandsdaten, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 499, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Wien 2000
- [33] **Schulze, K-H.**  
Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 103, BMV  
Bonn 1970
- [34] **ISO 13473-2:2002**  
Characterization of pavement texture by use of surface profiles; Part 1: Determination of Mean Profile Depth (1997); Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis (2002)  
International Organisation for Standardization, 1997 and 2002
- [35] **Beckedahl H., Hürtgen H., Straube E., Horz H.W., Wolf A., Klaas O. und Lengnick M.**  
Begleitende Forschung zur Einführung des Falling Weight Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 733, BMVBW  
Bonn 1996
- [36] **FAA Advisory Circular 150/5370-11**  
Advisory Circular: Use of Nondestructive Testing Devices in the Evaluation of Airport Pavements, Department of Transportation, Federal Aviation Administration  
U.S.A. 1976
- [37] **Grogg M.G. und Hall J.W**  
Measuring Pavement Deflection at 55 MPH; Public Roads, Vol. 67, No. 4, United States Department of Transportation – Federal Highway Administration  
U.S.A. 2004
- [38] **Gregers H. und Rasmussen S.**  
Developments of a High Speed Deflectograph, Nordic Road & Transport Research 2002/03, Swedish National Road and Transport Institute  
Linköping, Sweden 2002
- [39] **Steinauer B. und Ueckermann A.**  
Verbesserung des Verfahrens zu Längsebenheitsauswertung – Der Längsebenheitswirkindex LWI, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 839, BMVBW  
Bonn 2001

- [40] **Socina M:**  
ZEB-Rohdatenformat auf XML-Basis, Formatversion 2.0 vom 30.03.2005  
[http://www.bast.de/htdocs/fachthemen/zeb\\_rohdatenschema/index.htm](http://www.bast.de/htdocs/fachthemen/zeb_rohdatenschema/index.htm)  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch-Gladbach 2005
- [41] **Heller S., Socina M. und Rübensam S.**  
Umsetzung des Längsebenheitswirkindex (LWI) in ein praxisnahes, Erhaltungsmaßnahmen auslösendes Verfahren im Rahmen der systematischen Straßenerhaltung, Forschungsprogramm Straßenwesen Nr. FE 04.200/2004/DRB, BMVBW  
in Bearbeitung (2006)
- [42] **Socina M und Rafal L.:**  
Algorithmen zur Ermittlung von Zustandsgrößen aus Rohdaten, Version 1.2, Heller Ingenieurgesellschaft im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen  
Darmstadt 2005
- [43] **Gillespie T.D., Sayers M.W. und Queiroz, C.A.V.**  
The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and Calibration Standard for Measurement, The World Bank, Technical Report No.45  
Washington D.C. 1986
- [44] **IRI Definition:**  
<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/index.html>  
Homepage of University of Michigan Transportation Research Institute (UMTI)
- [45] **Krause G., Maerschalk G. und Oertelt S.**  
Verbesserung der praxisnahen Bewertung des Straßenzustandes, 1.Zwischenbericht, 2004, Forschungsprogramm Straßenwesen Nr. FE 09.132/2003/MGB, Bundesanstalt für Straßenwesen  
in Bearbeitung (2006)
- [46] **Bühler B., Klinghammer S., Maerschalk G. und Oertelt S.**  
Leitfaden für die Erfassung und Bewertung des Zustandes von Straßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 832, BMVBW  
Bonn 2002

**[47] Ortsdurchfahrtenrichtlinien ODR**

Richtlinien für die rechtliche Behandlung von Ortsdurchfahrten der Bundesstraßen, Bundesministerium für Verkehr

Bonn 1976

**[48] Durth W.**

Planung und Gestaltung von Ortsdurchfahrten, Leitfaden der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung, Teil I: Methodische und inhaltliche Grundlagen, Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen

Wiesbaden 1997

**[49] Heller S., Köhler M. und Schniering Ant.**

Ergänzung der Bewertung des Straßenzustandes freier Strecken um eine gleichwertige Bewertung von Ortsdurchfahrten von Bundesstraßen, Forschungsprogramm Straßenwesen, Heft 909, BMVBW

Bonn 2005

**[50] Molzer C. und Litzka J.:**

Auswertung und Analyse der Zustandserfassung 1995 – österreichisches Bundesstraßennetz. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Heft 8

Wien 1997

**[51] Litzka J. und Vycudil A.:**

Aufbereitung und Implementierung der Zustandsdaten der Messkampagne 1999 in die VIABASE-Datenbank der ASFINAG. Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien im Auftrag der ASFINAG, Technischer Bericht, unveröffentlicht

Wien 2000

**[52] Weninger-Vycudil A. :**

Bewertung des Straßenzustandes auf den österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen; Überarbeitung 2005; Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, unveröffentlicht

Wien 2005

**[53] Heller S.:**

Implementing Standardised Visualisation to Communicate Information in Asset Management; Proceedings zu 6<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements

Brisbane, Australien 2004

- [54] **Gordon R.:**  
Conference Summary – Theme Summations; Proceedings zu 6<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements  
Brisbane, Australien 2004
- [55] **Maerschalk G.**  
Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 751, BMVBW  
Bonn 1997
- [56] **Maerschalk G. und Socina M.**  
Weiterentwicklung der Bewertung des Pavement Management System (PMS) um ein Verfahren für die Umsetzung von Qualitätszielen“, Forschungsprogramm Straßenwesen Nr. FE 09.136/2004/MRB, BMVBW  
in Bearbeitung (2006)
- [57] **Heller Ingenieurgesellschaft mbH**  
Anonymisierte Auswertungen der Firma Heller Ingenieurgesellschaft mbH  
Dezember 2005
- [58] **Straßenbaubericht 2000**  
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH  
Bonn 2001
- [59] **Socina M.**  
Entwicklung eines Verfahrens zur Darstellung des Erhaltungsprogramms auf Netzebene, Forschungsprogramm Straßenwesen FE 15.347/2001/HRB, Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht  
Bergisch-Gladbach 2003
- [60] **Heller S., Komma Ch., Maerschalk G., Nagel M. und Schniering A.:**  
Zustandserfassung und Bewertung der Fahrbahnoberflächen der Bundesfernstraßen 1999-2005: Dokumentation und bundesstatistische Analyse FE 29.0147/2005, BMVBW  
in Bearbeitung (2006)
- [61] **Stahel W.A.:**  
Statistische Datenanalyse, eine Einführung für Naturwissenschaftler, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, ISBN 3-528-36653-2  
Braunschweig/Wiesbaden 2002

**[62] Hinsch K., Krause G. und Maerschalk G.:**

Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 915, BMVBW

Bonn 2005

**[63] RVS 3.63**

RVS 3.63, Bautechnische Details, Oberbaubemessung. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr

Wien 1998

**[64] RVS 3.63**

RVS 3.63, Bautechnische Details, Oberbaubemessung. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr

Wien 2005

**[65] Maerschalk G. und Krause G.:**

Erstanwendung der vorliegenden Algorithmen für die Erhaltungsplanung in ausgewählten Bauämtern; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 878, BMVBW

Bonn 2004

**[66] RPE-ING**

Richtlinie zur Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken, BMVBW, bisher unveröffentlicht

Bonn 2005

**[67] Pichler W.**

Betriebswirtschaftliche Komponente beim Management der Straßenerhaltung; Habilitationsschrift aus dem Fachgebiet der Straßenerhaltung

Spital-Drau

**[68] RVS 2.2**

RVS 2.2, Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr

Wien 1983