

# Räumliche Linienführung von Autobahnen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 332

**bast**

# Räumliche Linienführung von Autobahnen

von

Christian Lippold  
Janette Zösch

Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List"  
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr  
Technische Universität Dresden

Matthias Zimmermann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE)

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 332

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 18.0023/2013**  
Räumliche Linienführung von Autobahnen

**Fachbetreuung**  
Kerstin Lemke

**Referat**  
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-524-8

Bergisch Gladbach, Juli 2020

## Kurzfassung – Abstract

### Räumliche Linienführung von Autobahnen

Der räumliche Verlauf einer Straße hat einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit. Vor allem für Landstraßen wurden die räumliche Linienführung und Defizite in der räumlichen Linienführung bereits mehrfach untersucht. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse ließen sich allerdings nicht ohne weiteres auf Autobahnen übertragen, da diese Straßen größere Entwurfs Elemente und Querschnitte aufweisen. Daher konnte bei der Erarbeitung des Kapitels 5.4 "Räumliche Linienführung" der Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 2008) vorrangig nur auf Erfahrungswerte und Festlegungen zurückgegriffen werden. Weiterhin war ein Verfahren zum Entwurf, zur Bewertung und zur Kontrolle der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf der Grundlage qualitativer und quantitativer Parameter noch nicht bekannt. Für Landstraßen wurde ein derartiges Verfahren bereits entwickelt. Es ist in den "Hinweisen zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt)" enthalten, eine direkte Übertragung auf den Entwurf von Autobahnen war jedoch nicht möglich.

Ziel des vorliegenden Projektes war es, auf der Grundlage von Kenntnissen über die räumliche Linienführung von Autobahnen Empfehlungen für die Inhalte der RAA und der H ViSt zur räumlichen Linienführung zu erarbeiten.

Es wurde geprüft, in welchem Umfang und unter welchen Randbedingungen Defizite in der räumlichen Linienführung auf Autobahnen auftreten und ob diese sicherheitsrelevant sind. Dazu wurden Bestandsstrecken auf Defizite in ihrer räumlichen Linienführung untersucht und deren Unfallgeschehen analysiert.

Weiterhin wurden virtuelle Untersuchungsstrecken erstellt. Durch diese wurden iterativ Grenzwerte ermittelt, ab wann gestalterische Defizite in der räumlichen Linienführung von Autobahnen auftreten.

Aus den Ergebnissen wurde deutlich, dass gestalterische Defizite in der räumlichen Linienführung von Autobahnen trotz richtliniengerechter Trassierung nach RAA auftreten können. Diese haben jedoch keine Sicherheitsrelevanz.

Weiterhin hat sich ein Änderungs- und Ergänzungspotential für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA ergeben. In der Ziffer 5.4 kann die Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung von Autobahnen ausreichend beschrieben werden, sodass in der Ziffer 5 „Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung“ der H ViSt keine Änderungen erforderlich sind. Für das H ViSt (Ziffer 5) wären ausschließlich ergänzende Kommentare notwendig, ob die jeweiligen Hinweise für Autobahnen maßgebend sind oder nicht. Daher wurde ausschließlich ein Textvorschlag für Ziffer 5.4 der RAA erarbeitet. Ein Verweis auf die H ViSt ist nur insofern nötig, dass die dort enthaltenen Hinweise zur Visualisierung (Ziffer 2, Ziffer 3, Ziffer 4) und zur Nutzung des Sichtschattenbandes (Ziffer 5.3.2) uneingeschränkt auch für Autobahnen gelten.

Der Textvorschlag soll als Diskussionsgrundlage für die Fortschreibung der RAA im zuständigen Arbeitsausschuss 2.1 „Autobahnen“ dienen.

### Three-dimensional alignment of motorways

Proper road alignment has a positive effect on driver behavior and road safety. There have been many researches about the combination of horizontal and vertical alignment, especially for rural highways. Unfortunately, the results are not transferable to motorways for the reason that motorways are characterized by larger elements of the alignment and wider cross-sections.

Consequently the preparation of Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the Guidelines for the Design of Motorways (RAA 2008) is based primarily on experiences and agreements. Furthermore, there was no method for design, evaluation and verification of the three-dimensional alignment of motorways based on qualitative and quantitative parameters. Such a method exists for rural roads. It is cited in "References on the Visualization of the Design of Rural Roads (H ViSt)". However, it is not transferable to motorways, too.

The aim of the project was a comprehensive investigation of the three-dimensional alignment of motorways. Moreover, the RAA and the H ViSt

content requirements should be given on the base of the results.

Therefore, measurable values, concerning safety-relevant and optical deficits of three-dimensional alignment, were analyzed. Limit values, based on accident occurrence on selected routes and virtual routes, were derived.

The results showed that optical deficits of motorways three-dimensional alignment exists, even when the horizontal and vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. However the deficits are not safety-relevant.

Furthermore, Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA must be revised. In Chapter 5.4, the verification method of motorways three-dimensional alignment can be adequately described. So there must be no revision of Chapter 5 "Method for verification of three-dimensional alignment" of the H ViSt. Only supplementary comments are necessary, if the instructions are relevant for motorways or not.

A text proposal for Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA was prepared. It contains references to the instructions on visualization (Chapter 2, Chapter 3, Chapter 4) and on how to use the sight shade band (Chapter 5.3.2) of the H ViSt. These Chapters can also be applied to the motorways.

The text proposal shall be the base for discussion to update the RAA in the relevant Working Committee 2.1 "Motorways".

## Summary

### Three-dimensional alignment of motorways

#### Objective

Proper road alignment has a positive effect on driver behavior and road safety. There have been many researches about the three-dimensional alignment, especially for rural highways. Unfortunately, the results are not transferable to motorways for the reason that motorways are characterized by larger elements of the alignment and wider cross-sections.

Consequently the preparation of Chapter 5.4 “Three-dimensional alignment” of the Guidelines for the Design of Motorways (RAA 2008) is based primarily on experiences and agreements. Furthermore, there was no method for design, evaluation and verification of the three-dimensional alignment of motorways based on qualitative and quantitative parameters. Such a method exists for rural roads. It is cited in “References on the Visualization of the Design of Rural Roads (H ViSt)”. However, it is not transferable to Motorways, too.

The aim of the project was a comprehensive investigation of the three-dimensional alignment of motorways. Moreover, the RAA and the H ViSt content requirements should be given on the base of the results.

#### Approach

In the project, measurable values, concerning safety-relevant and optical deficits of three-dimensional alignment, were analyzed. Limit values were derived based on accident occurrence on selected routes and virtual routes.

The following deficits were analysed:

- area of obstructed vision (plunge, spring und spring with staggered),
- lengthening and shortening,
- covered beginning of the curve,
- apparent sharp bend in the horizontal alignment,
- apparent sharp bend in the vertical alignment,

- apparent sharp bend in the horizontal and the vertical alignment,
- apparent flat, straight board,
- short horizontal straight between two rectified curves,
- flutter,
- falsification of the longitudinal gradients,
- apparent hump and flattening as well as
- tail motion.

The routes were sections of motorways in a moved area built before 1940. In these sections, deficits in the three-dimensional alignment were expected (deficit routes). Furthermore, routes were chosen, which are designed according to the guidelines (comparative routes). In these sections were expected no or only few deficits in the three-dimensional alignment. The comparative routes should show that motorways, which are designed according to the guidelines, expect fewer deficits in the three-dimensional alignment and accidents than deficit routes.

The data of the routes of the horizontal and the vertical alignment, as well as the accidents, has been analyzed in a software tool which calculates the “QuaSi-Band” (figure about the sight quality on roads). The routes were analyzed for deficits of three-dimensional alignment based on the quantitative evaluation of individual images. Further researches were inter alia about the extension of the deficits.

The virtual routes were prepared with the CAD system CARD/1 for road design. Limit values about when and under which conditions deficits appear, were derived iterative based on the virtual routes. For each deficit, individual design parameters were varied based on constant other design parameters until deficits appear or disappear. The initial positions were the minimum and the maximum values for the design parameters according to RAA. It was considered that deficits of three-dimensional alignment are based on small design parameters.

The verification of the virtual routes for deficits was quantitative by sight shade bands, and/or qualitative

by perspective views according to deficit. The verification of optical deficits is influenced by subjective factors. However, there were additional interviews of test persons. Firstly, a ranking sequence of the perspective views was determined based on an dominance pair comparison. Therefore, the test persons had to compare and to evaluate each perspective view. Finally, the test persons had to indicate, in which view the deficit is more distinctive. Depending on how often a view was chosen, the ranking of the views was determined. Based on this ranking, interviews of experts were done for the limit values identification. Therefore, the Method of Adjustment was used. The experts chose a view of a selection of views by adjusting a controller. The chosen view should show when the deficit is firstly noticeable.

Based on the results of the quantitative and qualitative researches, the need for changes of Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA and of the method for design, evaluation and verification of the three-dimensional alignment of the H ViSt was identified. A text proposal for Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA was prepared.

### Results and recommendations

In the research about the three-dimensional alignment of motorways the following deficits were analyzed:

- area of obstructed vision (plunge, spring und spring with staggered),
- lengthening and shortening,
- covered beginning of the curve,
- apparent sharp bend in the horizontal alignment,
- apparent sharp bend in the vertical alignment,
- apparent sharp bend in the horizontal and the vertical alignment,
- apparent flat, straight board,
- short horizontal straight between two rectified curves,
- flutter,
- falsification of the longitudinal gradients,
- apparent hump and flattening as well as

- tail motion.

The following instructions are essential for the deficits evaluation:

- The RAA are concerned with Motorways and Motorway-like roads of the EKA 1 until the EKA 3. The calculation of the limiting values, for the design elements of the design classes, is based on speeds. However, there is a very wide spectrum of the minimum and maximum values for the design parameters in vertical and horizontal alignment. Consequently, there can be deficits, which not appear by very wide elements of Motorways, of the EKA 1 and which appear by Motorway-like roads (EKA 2) and urban motorways (EKA 3). In the following text are references about this. For the practical design recommendations for the RAA update is considered that, in practice by urban motorways, the requirements referring to the three-dimensional alignment are less important than the urban planning constraints and restrictions.
- As a result of the accident investigation, the deficits have no effect on accident occurrence. Certainly, the reasons are the wider design elements, in comparison to rural roads. Therefore, in the three-dimensional alignment, the safety-relevant deficits are less important than the optical deficits. So, in the following evaluation, there are no references to deficit safety implications.

### Covered beginning of the curve

Covered beginnings of curves can exist, when the horizontal and vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. Therefore, the prepared table to avoid covered beginnings of curves by displacement of the beginning of the crest behind the beginning of the curves should be included in the RAA. The verification method of the three-dimensional alignment according to Chapter 5.3.2 of H ViSt (sight shade band) is included in design programs. It applies also to motorways, see Chapter 5.2.1. So it is recommended to apply the method to motorways.

### Areas of obstructed vision

Areas of obstructed vision and critical areas of obstructed vision, corresponding to the definition according to RAL, can exist when the horizontal and vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. However, they are not safety-

relevant for motorways. So they are not critical as defined by RAL. Nevertheless, it is recommended that the RAA should point out to avoid areas of obstructed vision. The verification can be done by analogy with the verification method of the three-dimensional alignment according to H ViSt (sight shade band).

### **Lengthening and shortening**

Lengthening was only noted by diameters for sags smaller than the minimum parameter according to RAA. It does not exist by parameters higher than the minimum parameter. Furthermore, shortening was noted, but only few. So the phenomenon lengthening and shortening should not be included in the RAA.

### **Apparent sharp bend in the horizontal alignment**

The apparent sharp bend in the horizontal alignment exists only in right curves. It is noticed by curves  $R \leq$  ca. 600 m. This concerns especially roads of the EKA 2 and the EKA 3. A corresponding note should be included in the RAA.

### **Apparent sharp bend in the vertical alignment:**

Apparent sharp bends do not exist in crests. This phenomenon is not relevant for motorways. However, an apparent sharp bend exist by straights in the horizontal alignment and small sags in the vertical alignment. These apparent sharp bends can be avoided by the following diameters for sags:

- $H_W \geq 3.500$  m by  $\Delta s = 12$  %,
- $H_W \geq 4.750$  m by  $\Delta s = 8$  % and
- $H_W \geq 7.000$  m by  $\Delta s = 4$  %.

This applies roads of the EKA 1 B by small longitudinal gradients as well as roads of the EKA 2 and the EKA 3. It is recommended that the RAA refer to this phenomenon.

### **Apparent hump and apparent sharp bend in the horizontal and the vertical alignment**

Apparent sharp bends do not exist in crests. In sags there were detected apparent humps in addition to apparent sharp bends. These arise inter alia by the relative grade of the edges of the carriageway in the curve. The phenomenons depend on the diameter for sags and the difference of the longitudinal gradients. They can be avoided by the following combinations of parameters:

- $H_W < 2.500$  m by  $\Delta s = 12$  %,
- $H_W < 3.000$  m by  $\Delta s = 8$  % and
- $H_W < 6.000$  m by  $\Delta s = 4$  %.

However, all minimum diameter for sags according to RAA are greater. So, in practice, the phenomenon often exists. If the phenomenons should be reduced, the diameter for sags and the differences of the longitudinal gradients must be reduced. It is recommended that the RAA refer to this.

### **Short horizontal straight between two rectified curves**

Short horizontal straight between two rectified curves do not break the flow line of a continuous curve optically. So the phenomenon is not relevant for motorways and should not be included in the RAA.

### **Flutter and tail motion**

Flutter and tail motion can exist, when the horizontal and the vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. Flutter is more noticed by greater cross sections. Flutter and tail motion can be avoided when the number and the position of the curvature points are approximately the same in the horizontal and the vertical alignment. It is recommended that the RAA refer to this. It is not necessary to describe flutter by the sight shade band (H ViSt).

### **Falsification of the longitudinal gradients**

Falsifications of the longitudinal gradients were noticed by small diameters for sags. The longitudinal gradients are noticed steeper with decreasing diameters for sags. The phenomenon can't be avoid. However, the optical effect is so small that it is insignificant in practice. It is not necessary to describe the phenomenon in the RAA.

### **Apparent hump**

The apparent hump always exists if the sequence of elements sag – longitudinal gradient – sag is completely in the driver vision area. It is recommended that the RAA refer to this.

### **Flattening**

Flattening can't exist, when the horizontal and the vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. It is not relevant for motorways and not necessary to describe the phenomenon in the RAA.

**Apparent flat, straight board**

The apparent flat, straight board can't exist, when the horizontal and the vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. However, bridge constructions can be noticed as a board, when they are not be integrated into the course of the road well done and they are viewed from the side. It is recommended that the RAA refer to this.

**Conclusion**

Results show that deficits of motorways three-dimensional alignment exists, when the horizontal and vertical alignment of motorways are designed according to the RAA. However the deficits are not safety-relevant.

Furthermore, Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA must be revised. In Chapter 5.4, the verification method of motorways three-dimensional alignment can be adequately described. So there must be no revision of Chapter 5 "Method for verification of three-dimensional alignment" of the H ViSt. Only supplementary comments are necessary, if the instructions are relevant for motorways or not. A text proposal for Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA was prepared. It considers the following items:

- actual content of Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAA,
- conclusions of the results and the recommendations according to Chapter 5.4,
- content of Chapter 5 "Method for verification of three-dimensional alignment" of the H ViSt and
- content of Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAL.

The text proposal contains references to the visualization instructions (Chapter 2, Chapter 3, Chapter 4) and on how to use the sight shade band (Chapter 5.3.2) of the H ViSt. These Chapters can also be applied to the motorways.

The text proposal shall be the base for a discussion in order to update the RAA in the relevant Working Committee 2.1 "Motorways". It based on Chapter 5.4 "Three-dimensional alignment" of the RAL for consider the harmonization of the structure and the definitions in the guidelines.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	4.6	Vorgabe, Textvorschlag RAA.....	60
<b>2</b>	<b>Literaturanalyse</b> .....	11	4.7	Schlussbericht .....	61
2.1	Stand der Forschung.....	11	<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	61
2.1.1	Räumliche Linienführung.....	11	5.1	Streckenkollektiv.....	61
2.1.2	Gestaltung des Fahrbahnbandes.....	12	5.2	Qualitative und quantitative Untersu- chungen anhand von Beispielentwürfen.....	61
2.1.3	Defizite in der räumlichen Linienführung.....	12	5.2.1	Sicherheitsrelevante Defizite.....	61
2.1.4	Bewertung der räumlichen Linienführung... ..	13	5.2.2	Gestalterische Defizite.....	70
2.1.5	Wahrnehmung .....	27	5.2.3	Vergleich virtuell erstelltes Perspektivbild und reales Bild .....	93
2.1.6	Grundlagen zu Probandenbefragungen .....	29	5.2.4	Fehleranalyse .....	94
2.2	Stand des Regelwerkes .....	31	5.3	Quantitative Untersuchungen anhand des QuaSi-Bandes .....	94
2.2.1	Querschnitte .....	33	5.3.1	Überprüfung der Untersuchungsstrecken auf Defizite in der räumlichen Linienführung.....	94
2.2.2	Lageplan .....	33	5.3.2	Unfallanalyse auf den Autobahnabschnitten unter dem Aspekt der räumlichen Linienführung .....	99
2.2.3	Höhenplan .....	34	5.3.3	Fehleranalyse .....	105
2.2.4	Gestaltung des Fahrbahnbandes.....	34	5.4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen... ..	106
2.2.5	Defizite in der räumlichen Linienführung.....	35	<b>6</b>	<b>Textvorschlag RAA</b> .....	108
2.2.6	Bewertung und Prüfung der räumlichen Linienführung .....	38	<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	114
2.2.7	Sichtweiten.....	41	<b>Literatur</b> .....		118
2.2.8	Auswerten von Straßenverkehrsunfällen....	41	<b>Bilder</b> .....		122
2.3	Zusammenfassung der Literaturanalyse .....	43	<b>Tabellen</b> .....		126
<b>3</b>	<b>Ziel der Untersuchung</b> .....	44			
<b>4</b>	<b>Untersuchungsmethodik</b> .....	45			
4.1	Streckenauswahl .....	45			
4.2	Datenerhebung.....	46			
4.2.1	Streckengeometrie .....	46			
4.2.2	Unfalldaten.....	47			
4.3	Beispielentwürfe .....	47			
4.3.1	Sicherheitsrelevante Defizite.....	48			
4.3.2	Gestalterische Defizite.....	50			
4.3.3	Weitere Modellannahmen .....	53			
4.4	Defizitanalyse und Ermittlung des Änderungsbedarfes .....	54			
4.5	Vorschläge H ViSt.....	60			



## 1 Einleitung

Der räumliche Verlauf einer Straße hat einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit. Demnach soll ein qualitativ hochwertiger Straßenentwurf vor allem auch gewährleisten, dass der Kraftfahrer frühzeitig über den Verlauf der Straße informiert wird. Der Fahrraum wird vom Fahrer über seine Sinnesorgane wahrgenommen. Die größte Bedeutung hat dabei die Optik. Deren Anteil an der Informationsaufnahme beträgt über 90 %.

Von der insgesamt vom Fahrraum zur Verfügung gestellten Informationsmenge wird aber nur ein geringer Teil als maßgebende Information erkannt und für das Fahrverhalten verarbeitet. Eine gute optische Führung der Straße ist Voraussetzung für eine ausreichende Fahrsicherheit.

Die Gestaltung des Fahrbahnbandes erfolgt durch die getrennte, aufeinanderfolgende Bearbeitung der drei Entwurfsebenen Querschnitt, Lageplan und Höhenplan. Der Fahrer nimmt diese jedoch nicht einzelnen wahr, sondern nur das räumliche Ergebnis der Überlagerung. Deshalb genügen Straßen, die im Lage- und Höhenplan geometrisch fehlerfrei entworfen wurden, nicht zwangsläufig den Anforderungen an eine gute räumliche Linienführung.

Defizite in der räumlichen Linienführung wurden vor allem für Landstraßen bereits mehrfach untersucht. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse lassen sich allerdings nicht ohne weiteres auf Autobahnen übertragen, da diese Straßen größere Entwurfselemente und Querschnitte aufweisen. Daher konnte bei der Erarbeitung der „Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 2008)“ (FGSV, 2008b) und des dort enthaltenen Kapitels 5.4 „Räumliche Linienführung“ vorrangig nur auf Erfahrungswerte und Festlegungen zurückgegriffen werden. Weiterhin ist ein Verfahren zum Entwurf, zur Bewertung und zur Kontrolle der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf der Grundlage qualitativer und quantitativer Parameter derzeit noch nicht bekannt. Für Landstraßen wurde ein derartiges Verfahren bereits entwickelt. Es ist in den „Hinweisen zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt)“ (FGSV, 2008a) enthalten, kann jedoch ebenfalls aufgrund der größeren Entwurfselemente und Querschnitte von Autobahnen nicht darauf übertragen werden.

Ziel des Projektes ist es daher, die räumliche Linienführung für Autobahnen umfassend zu untersuchen und die Inhalte der RAA dahingehend zu überprüfen. Weiterhin soll geprüft werden, ob ein Verfahren zum Entwurf, zur Bewertung und zur Kontrolle der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf der Grundlage qualitativer und quantitativer Parameter entwickelt werden kann. Die Grundlage dafür ist die Prüfung von messbaren Größen für die Defizite der räumlichen Linienführung und die Ableitung von Grenzwerten. Außerdem ist anhand des Unfallgeschehens auf ausgewählten Strecken zu prüfen, ob die Defizite sicherheitsrelevant sind oder ob es sich ausschließlich um gestalterische Defizite handelt. Darauf aufbauend ist eine Methodik zu entwickeln, die die planerischen Vorgaben zur Verwendung von Standardraumelementen, die quantitativen Parameter sowie die im Perspektivbild erkennbaren gestalterischen Defizite zusammenführt und dadurch Entwurfsvorgaben für die räumliche Linienführung ermöglicht. Diese Vorgaben sind als Textvorschlag für die Übernahme in die RAA aufzuarbeiten und bzw. oder ist das Prüfverfahren in die H ViSt zu integrieren.

## 2 Literaturanalyse

### 2.1 Stand der Forschung

#### 2.1.1 Räumliche Linienführung

Die räumliche Linienführung einer Straße entsteht, wenn deren Linienführungen in der Lage und in der Höhe überlagert werden. LORENZ (1971) definiert sechs Grundformen der Linienführung im Raum:

Die ebene Gerade, die gerade Kuppe und die gerade Wanne stellen Linienzüge in lotrechten Ebenen dar. Die gekrümmte Neigung, die gekrümmte Kuppe und die gekrümmte Wanne sind Raumkurven.

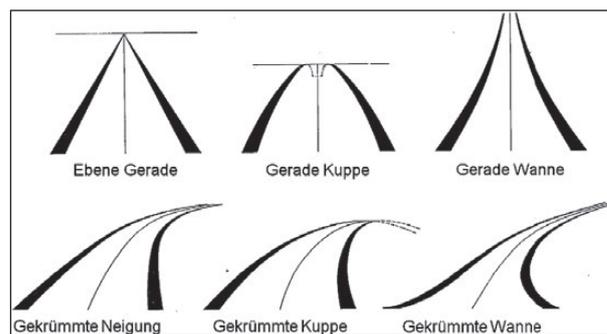


Bild 1: Grundformen der Linienführung im Raum (LORENZ, 1971)

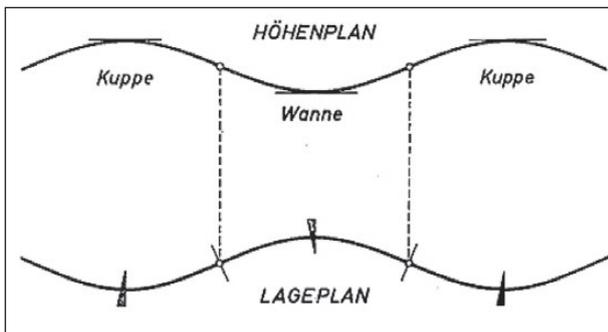


Bild 2: Abstimmung von Achse und Gradienten (LORENZ, 1971)

### 2.1.2 Gestaltung des Fahrbahnbandes

Nach LORENZ (1971) ist die einfachste Form der gegenseitigen Abstimmung von Achse und Gradienten die Aneinanderreihung von einzelnen Raumkurven. Infolgedessen liegen die Wendepunkte in etwa an gleicher Stelle, was entwässerungstechnisch große Vorteile hat. Weiterhin sollten die Elementlängen im Lage- und im Höhenplan annähernd gleich sein, um Phasenverschiebungen der Wendepunkte zu vermeiden (Bild 2).

### 2.1.3 Defizite in der räumlichen Linienführung

Defizite in der räumlichen Linienführung können auch dann auftreten, wenn die Trassierung in den Entwurfsebenen Lageplan und Höhenplan fehlerfrei ist. Dabei können die Defizite sowohl in nur einem Raumelement als auch in einer ganzen Raumelementfolge bestehen.

Defizite in der räumlichen Linienführung können nach sicherheitsrelevanten und gestalterischen unterschieden werden.

Sicherheitsrelevante Defizite sind unter anderem:

- Sichtschatten (Tauchen und Springen),
- Dehnung,
- Stauchung und
- verdeckter Kurvenbeginn.

Gestalterische Defizite sind unter anderem:

- Knickwirkung,
- Brettwirkung,
- Flattern,
- Verzerrung der Längsneigung sowie
- Widerspruch zwischen Straße und Umfeld.

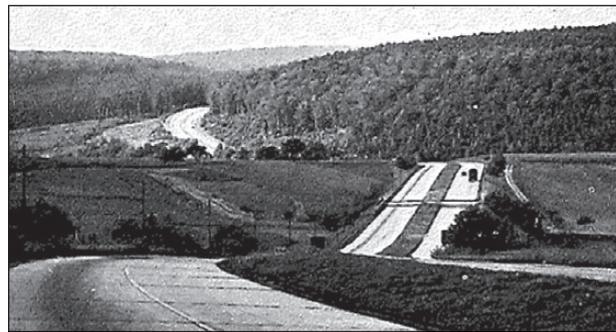


Bild 3: Springen (LORENZ, 1971)

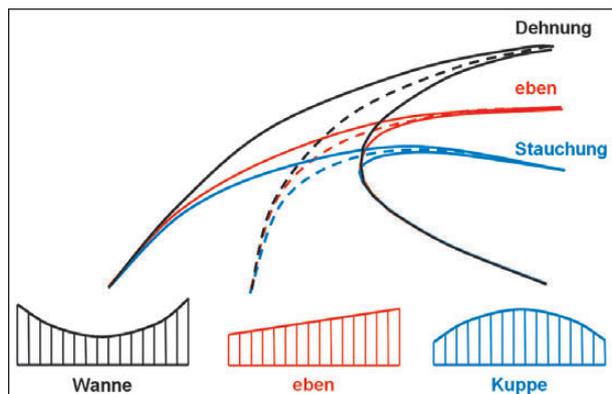


Bild 4: Dehnung und Stauchung (nach APPELT, 1998)

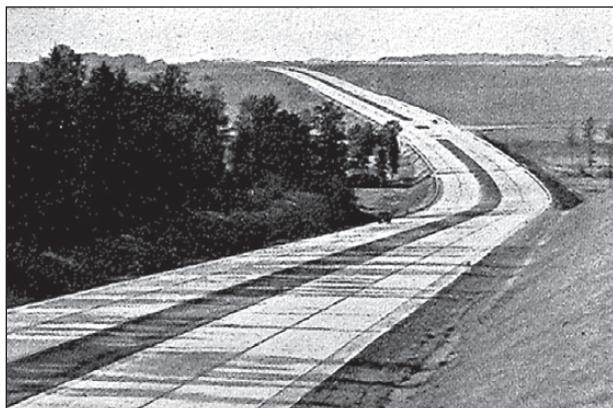


Bild 5: Dehnung (LORENZ, 1971)

Bei Streckenabschnitten, die sich im Sichtschatten befinden, kann Tauchen oder Springen vorkommen. Tauchen tritt auf, wenn ausschließlich Teilstrecken eines Streckenabschnittes im Sichtschatten liegen. Liegen innerhalb des nicht einsehbaren Bereiches zusätzlich Lageplankrümmungsänderungen vor, wird dies als Springen bezeichnet (ZIMMERMANN, 2001).

Die Effekte der Dehnung und Stauchung treten auf, wenn sich ein Kreisbogen im Lageplan mit einer Wanne bzw. einer Kuppe im Höhenplan überlagert. Dabei erscheint der Radius einer Lageplankurve größer, wenn diese mit einer Wanne überlagert wird (Bild 4 und Bild 5) und kleiner, wenn sich diese mit einer Kuppe überlagert (Bild 4).

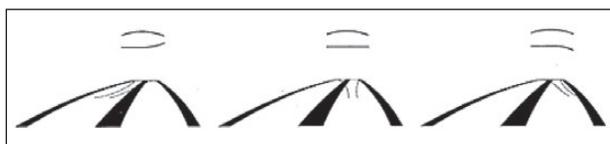


Bild 6: verdeckter Kurvenbeginn (LORENZ, 1971)



Bild 7: Knickwirkung im Höhenplan (LORENZ, 1971)

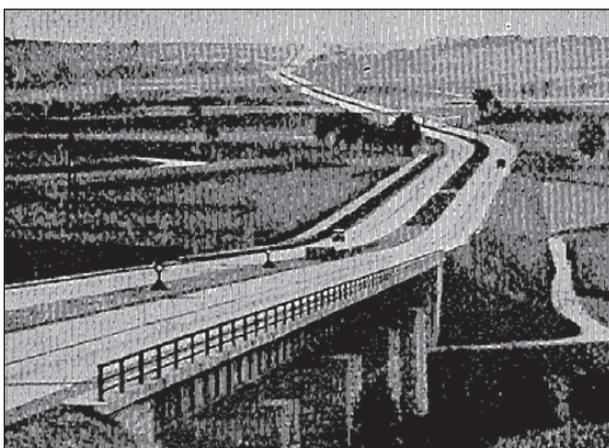


Bild 8: Brettwirkung (LORENZ, 1971)

HASSAN / EASA (2003) bestätigen diese Annahme. Bei deren Untersuchungen stellte sich ein unterschiedliches Fahrverhalten der Probanden je nach Elementkombination ein, welches sich in einer unterschiedlichen Wahl der Geschwindigkeiten zeigte. Während Überlagerungen mit Kuppen Anlass zur Reduktion der Geschwindigkeit gaben, konnten in Wannern gegenteilige Zusammenhänge beobachtet werden. Der Orientierung des Kreisbogens und der Differenz aufeinanderfolgender Längsneigungen wurde kein Einfluss zugeschrieben.

Ein verdeckter Kurvenbeginn tritt auf, wenn sich in Fahrtrichtung der Beginn eines Kreisbogens im Lageplan hinter dem Hochpunkt einer Kuppe im Höhenplan befindet (Bild 6).

Im Lageplan entsteht eine Knickwirkung, wenn in der Achse zwischen zwei langen Geraden eine kur-

ze Kurve angeordnet wird. Analog kann im Höhenplan eine Knickwirkung entstehen, wenn in der Gradienten zwischen zwei langen Geraden eine kurze Wanne angeordnet wird (Bild 7) (LORENZ, 1971).

Wird in der Gradienten zwischen zwei gegenseitig gekrümmten oder geraden Gefällestrahlen eine kurze Gerade (z. B. in Form einer Brücke) angeordnet, wirkt diese wie ein Brett (Bild 8).

Flattern entsteht, wenn über eine lange Gerade oder einen langen Kreisbogen in der Achse mehrere Wannens und Kuppen in der Gradienten angeordnet werden (LORENZ, 1971).

Eine Verzerrung der Längsneigung entsteht im Bereich von geraden Wannens, die mit einem geringen Halbmesser ausgerundet sind. In diesen wird die Längendehnung durch den Fahrzeugführer als eine stärkere Längsneigung interpretiert (ENGELKE, 1990).

Unter dem Defizit Widerspruch zwischen Straße und Umfeld wird verstanden, dass dem Fahrzeugführer ein falscher Streckenverlauf vorgetäuscht werden kann, wenn sich im Umfeld der Straße aufragende Elemente, wie z. B. Bäume oder Masten, befinden, die dem Streckenverlauf folgen, jedoch später von diesem abweichen (KÜHN et al., 2007).

#### 2.1.4 Bewertung der räumlichen Linienführung

Bei dem Entwurf einer Straße werden Querschnitt, Achse und Gradienten unabhängig voneinander konstruiert. Das räumliche Ergebnis wurde dabei lange Zeit dem Zufall überlassen (LORENZ, 1971).

Mit dem Bau der Reichsautobahnen wurde erstmals Kritik hinsichtlich der räumlichen Linienführung von Straßen geäußert. Diese bezog sich vor allem auf gestalterische Defizite. Im Weiteren wurden auch Untersuchungen zu den fahrpsychologischen und fahrdynamischen Auswirkungen sowie zu deren Ursachen durchgeführt (LORENZ, 1971).

Die räumliche Linienführung kann qualitativ und quantitativ bewertet werden.

#### Qualitative Bewertungsverfahren

Bereits RANKE / NIEBLER (1956) stellten fest, dass trotz zufriedenstellender Linienführung in Lage- und Höhenplan, bei dessen Überlagerung mitunter unzureichende räumliche Wirkungen aus fahrdynamischer bzw. fahrpsychologischer Sicht auftreten können. Daher wurde ein Verfahren zur

Erstellung von Schaubildern entwickelt, welches dem planenden Ingenieur eine Vorstellung des räumlichen Gebildes der Straße im Entwurf möglich macht. Eine ungenügende optische Erscheinung gibt dann Anlass zur Korrektur einer oder beider Entwurfsebenen.

SCHOSS (1975) analysierte im Rahmen seiner Untersuchung bereits vorhandene Prüfmöglichkeiten der räumlichen Linienführung und leitete daraus neue Erkenntnisse für die Trassierung ab. Er schlussfolgerte, dass die Krümmung der Kurve im Perspektivbild von der tatsächlichen Krümmung und von dem Winkel zwischen der Kurvenebene und dem Sichtstrahl abhängt.

SCHOSS (1975) kommt weiterhin zu dem Ergebnis, dass unter Einhaltung folgender Bedingung die optische Wirkung einer Linienführung fehlerfrei ist, d. h. dass keine Abbildungsfehler auftreten: „In jedem denkbaren Projektionszentrum einer Fahrerperspektive müssen für alle von diesem Zentrum sichtbaren Kurvenpunkte die Lote vom Projektionszentrum auf die Schmiegeebenen in diesen Punkten positive Vorzeichen<sup>1</sup> haben, und ihre Länge muß ungleich Null sein“ (SCHOSS, 1975, S. 7).

Aus dieser Bedingung leitet SCHOSS (1975) für die praktische Entwurfsarbeit ab, dass sich das Vorzeichen der Gradientenelemente innerhalb einer Lageplankurve gleichen Vorzeichens nicht ändern darf. Weiterhin sollte in der Achse und in der Gradienten die Größe der Elemente aufeinander abgestimmt werden. SCHOSS (1975) empfiehlt auch, die Wendepunkte im Lage- und Höhenplan zusammenzulegen.

Die perspektivische Darstellung der Straßenverkehrsanlage stellt nach KUPKE (1977) einen elementaren Bestandteil der Planung dar. Nur so kann der vorausliegende Raum der späteren Straßennutzer vom verantwortlichen Planer nachempfunden und gegebenenfalls notwendige Anpassungen vorgenommen werden.

Perspektivbilder alleine sind keine dynamische Bildfolge, sondern statische Momentaufnahmen. Diese spiegeln nicht in ausreichendem Maße die Realität wider. Eine Aneinanderreihung mehrerer (statischer) Perspektivbilder wird aus diesem Grund als vorteilhaft angesehen. Der Adaption der dynamischen Darstellungen an das vom Beobachter ge-

wählte Geschwindigkeitsniveau wird dabei eine zufriedenstellende Anwendung bescheinigt. Das Fahrverhalten an engen Kurven, Unfallhäufungsstellen und das Vorkommen verschiedener Elemente des Seitenraums können dadurch überprüft werden. KUPKE (1977) wählt einen Fahrsimulator zur Abbildung des Straßenverlaufes.

Auch NAUMANN (1977) beschreibt ein Programmsystem, mit dessen Hilfe statische Perspektivdarstellungen erstellt und zu einem Film aneinandergesetzt werden können. Die Anwendung in einem Fahrsimulator wird als geeignet erachtet, um das Geschwindigkeitsverhalten anhand des optischen Eindrucks der Strecke zu untersuchen. Jedoch sollte Beachtung finden, dass aufgrund fehlender Beschleunigungskräfte bzw. Fahrgeräusche bis dato keine realistische Wiedergabe der Situation darstellbar war.

REUTER (1982) führt die Notwendigkeit des bis dato aktuellen Standes der Forschung von Raumperspektiven an, um qualitative Aussagen zu Stetigkeit sowie Sichtverhältnissen der Linienführung treffen zu können und die räumliche Wirkung nachzuvollziehen. Er erläutert, dass nicht alleinig Trassierungsparameter das menschliche Verhalten beeinflussen, sondern vielmehr die Gesamtperspektive aus Querschnitt, Lage- und Höhenplan, welche sich für den Fahrer darstellt. Anhand bereits erlebter Szenarien versucht der Fahrer ein geeignetes Verhalten zu adaptieren. In Krümmungen ist weniger die Richtungsänderung, sondern vielmehr die perspektivische Verzerrung von Bedeutung. Von REUTER (1982) wird ein numerisches Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe Raumperspektiven in einem 10 m-Raster darstellbar sind.

SCHLICHTER (1985) beschreibt im Rahmen seiner Arbeit rechnerische, handwerkliche, fotografische und grafisch-simulative Verfahren, mit denen die räumliche Linienführung einer Straße erfasst, dargestellt und beurteilt werden kann. Anschließend klassifiziert er diese und ordnet sie den Einsatzbereichen Entwurfstechnik, Entwurfsprüfung, Verkehrssicherheit, Umwelteinpassung und Bürgerinformation zu. Zunächst definiert er für die Trassierung und Gestaltung des Fahrtraumes vier Hauptforderungen:

- Verbesserung der optischen Führung durch Fahrbahnmarkierung, Leitelemente, Bepflanzung und Anordnung von Bauwerken,

<sup>1</sup> nach den Vorzeichenfestlegungen der Untersuchungen von SCHOSS (1975)

- Vermeidung von Elementen, die eine ungünstige optische Wirkung haben,
- Abstimmung der Elementfolgen nach Anzahl und Zuordnung der Wendepunkte im Lage- und Höhenplan sowie nach Elementgröße und
- Feststellung optischer Mängel, die einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben.

Für die Beschreibung von rechnerischen und handwerklichen (Darstellung in Modellen) Verfahren zur Erfassung, Darstellung und Beurteilung der räumlichen Linienführung führt SCHLICHTER (1985) eine Literaturanalyse durch. Dabei hat er festgestellt, dass dem Planer meist die erstellten Planunterlagen und die rechnerischen Verfahren für die Beurteilung seines Entwurfs ausreichen. Anhand von Modellen kann jedoch der Entwurf dreidimensional dargestellt und so die Überlagerung von Lageplan, Höhenplan und Querschnitt geprüft werden. Das Modell ist jedoch zeitlich sowie materialtechnisch sehr aufwendig und kann nachträglich schwer verändert werden.

SCHLICHTER (1985) untersucht weiterhin, wie die räumliche Linienführung anhand von Perspektivbildern beurteilt werden kann. Mit Perspektivbildern können der räumliche Eindruck einer Straße vermittelt, die räumliche Linienführung beurteilt und Trassierungsmängel erkannt werden. Sie sind jedoch technisch-abstrakt. Für eine praktisch-verständliche Darstellung können diese mit zusätzlichen grafischen Gestaltungen oder realen Fotos in Form von Fotomontagen kombiniert werden.

Einzelne Perspektivbilder, Modelle und Fotomontagen geben lediglich statische Verhältnisse wieder. Anhand von Perspektivfilmen kann nach SCHLICHTER (1985) der dynamische Eindruck, der vom Fahrzeugführer beim Befahren einer Straße empfunden wird, vermittelt werden. Für die Darstellung von Verkehrswegen in ihrer Umgebung eignet sich nach SCHLICHTER (1985) eine Kombination aus computererzeugten Perspektivfilmen und Realfilmen.

HASSAN / EASA (1998) ermitteln, dass sich durch zweidimensionale Darstellungen der einzelnen Entwurfsebenen bisweilen Fehleinschätzungen ergeben können. Anhand von dreidimensionalen Perspektivbildern, hier speziell auf die Erhebung von Sichtweiten bezogen, bieten sich Lösungsmöglichkeiten, aus denen realistischere Rückschlüsse gezogen werden können. So lassen sich unter Beach-

tung der Fahrzeugausleuchtung auch nächtliche Bedingungen annehmen.

Nach KÜHN (2000) kann die räumliche Linienführung mit Hilfe von Fahrraumsperspektiven und -folgen sowie daraus abgeleiteten Parametern objektiv überprüft werden. Die Berechnung von Fahrraumsperspektiven in kritischen Bereichen ist mit Hilfe von speziellen Softwaresystemen in einem beliebigen Abstand möglich. KÜHN (2000) weist darauf hin, dass die Beurteilung der Wirkung des Fahrraumes zunehmend durch fotorealistische, virtuelle Fahrraumsperspektiven erfolgen wird.

KOCH (2011) erstellte Perspektivbilder einer realen Szenerie und verglich das von Probanden zu erwartende Geschwindigkeitsniveau mit dem vorherrschenden realen Geschwindigkeitsverhalten. Der Autor attestiert der Methodik dabei eine eingeschränkte Aussagekraft im Hinblick auf die Wiedergabe von Witterungs- und Verkehrsbedingungen. Außerdem stehen dem Beobachter keine akustischen und haptischen Rückkopplungen zur Verfügung, weshalb Situationen mitunter verändert eingeschätzt wurden. Generell erwies sich das Perspektivbild jedoch als flexible Methode, mit deren Hilfe auch fiktive, bisher nicht erstellte Situationen darstellbar sind.

### Quantitative Bewertungsverfahren

LORENZ (1971) stellte fest, dass die Berücksichtigung einer räumlichen Perspektive von hoher Relevanz ist. Während durch einen senkrechten Blick auf die Verkehrsanlage lediglich Aussagen zum Lageplan und mithilfe einer waagerechten Beobachtung ausschließlich der Gradientenverlauf abzuleiten ist, kann mit einer Darstellung der Perspektiven in Fahrtrichtung deren Überlagerung möglich sein. Die dann entstehende Kombination muss in einem iterativen Prozess infolge der Anpassung einer der Ebenen zu optimieren versucht werden.

Das Verhältnis von Aufrissradius  $R_V$  (z. B. Wannenhalsmesser) zu Grundrissradius  $R_H$  (Kreisbogenradius) ist nach LORENZ (1971) mitbestimmend für den optisch erscheinenden Krümmungssinn. Für Verhältnisse  $R_V \geq 6 \cdot R_H$  liegen keine Verzerrung vor. Von kleineren Verhältnissen jedoch muss erwartet werden, dass der Kurvenaußenrand in die entgegengesetzte Richtung strebt. Generell stellt die Überlagerung der Wendepunkte in Lage- und Höhenplan einen ruhigeren Streckenverlauf her.

PFEIL (1970) hat ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe für die Bewertung der räumlichen Linienführung quantitative Kriterien anhand der Winkeländerung des Netzhaut-Perspektivbildes aufgestellt werden können. Dabei untersucht er die zentralperspektivische Abbildung der Krümmungsverhältnisse von – in regelmäßigen Abständen liegenden – Fahrbahnrandpunkten einzeln nacheinander. PFEIL (1970) leitet zunächst eine Berechnungsformel für die Winkeländerung des Perspektivbildes her. Für die Wertung des Perspektivbildes vergleicht er die ermittelte Winkeländerung mit einer Winkeländerung des Perspektivbildes einer eben verlaufenden Trasse, da bei dieser keine Verzerrungen durch die Gradienten vorliegen und der räumliche Verlauf der Trasse somit eindeutig erkennbar ist. Aus dem Vergleich können Kriterien für die Bewertung der optischen Linienführung des Fahrbahnrandes mathematisch formuliert werden. Diese allein reichen für eine Beurteilung der Trassenführung jedoch nicht aus, da die durch den Fahrer bedingten Grenzwerte für die Erkennbarkeit und die Perspektivbilddeutung nicht vorliegen. Nach PFEIL (1970) genügt es, wenn die quantitativen Kriterien ausschließlich auf kritische Punkte oder Bereiche hinweisen.

Das Ziel der Arbeit von LEUTNER (1974) ist es, den Fahrraum quantitativ zu erfassen und diesen mit empirisch erhobenen Kenngrößen des Fahrverhaltens zu vergleichen. Dazu ermittelt er zunächst rechnerisch den Fahrraum als eine Folge von Perspektivbildern. Anschließend isoliert er aus den geometrisch erfassbaren Daten, die den Fahrraum in seiner Gestalt festlegen, alle Größen, die dem Fahrzeugführer Auskunft über die Wahl einer angemessenen Fahrgeschwindigkeit geben können. Aus Blickverhaltensuntersuchungen ging hervor, dass die Markierung der Straßenmitte und des rechten Fahrstreifenrandes als Orientierungshilfen dienen. Weiterhin untersucht LEUTNER (1974) im Zusammenhang mit der vorhandenen Sichtweite die Krümmungs- als auch Winkeländerung der Straßenachse und stellt diese den Größen des Fahrverhaltens gegenüber. Dazu stellt er unter anderem Krümmungsspektren auf (Bild 9), wodurch die subjektiv empfundene Folge an optischen Eindrücken der Straße mathematisch erfasst und dargestellt werden kann.

Durch das Krümmungsspektrum kann nach LEUTNER (1974) das Krümmungsband ersetzt werden, da dieses Lage- und Höhenplan als auch Sichtweite vereint.

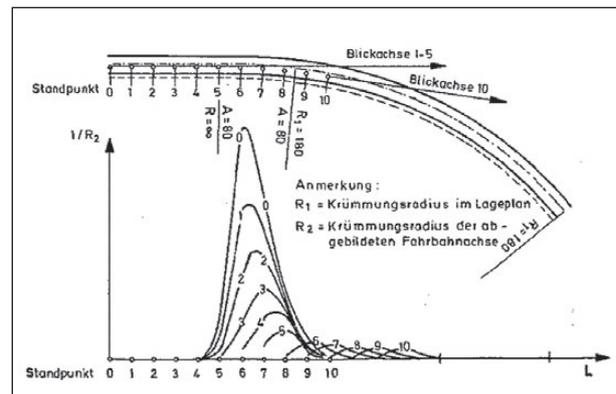


Bild 9: Prinzipskizze eines Krümmungsspektrums (LEUTNER, 1974)

Für den Fahrzeugführer ist die Abschätzung von Winkeländerungen der Straßenachse im Vergleich zu Krümmungen leichter, da die Position seines Fahrzeuges im Fahrraum sowie dessen Konturen stets als Bezugssystem zur Verfügung stehen. LEUTNER (1974) trägt daher die aus den Krümmungen resultierenden Winkeländerungen ebenfalls in Spektren auf.

Nach LEUTNER (1974) stellen die ermittelten Krümmungs- und Winkelspektren das für den Fahrzeugführer verfügbare Angebot an Informationen der Straßengestalt dar. Die in den Spektren bestehende Harmonie der Schwingungen überträgt sich auf das Fahrverhalten. Dieses wird durch die erhobenen Geschwindigkeitsprofile repräsentiert. Dem Fahrzeugführer stehen stets parallel mehrere Informationsquellen zur Verfügung. Die optischen Informationsquellen (Winkeländerung) sind dabei vor allem im Annäherungsbereich von Kurven und die haptischen Informationsquellen (Krümmungsänderung) vor allem unmittelbar im Kurvenbereich von Bedeutung. Durch den visuellen Input wird die Grobstruktur und durch den haptischen Input die Feinstruktur der Geschwindigkeitsprofile bestimmt. Der haptische Input stellt weiterhin einen Kontrollmechanismus des Fahrverhaltens dar. Die optischen und haptischen Informationsquellen werden von der Persönlichkeit des Fahrzeugführers und der Leistungsfähigkeit des Kraftfahrzeuges überlagert.

SPRINGER / HUIZINGA (1975) haben Perspektivbilder von Straßen untersucht und beurteilt. Die Darstellung der Perspektivbilder erfolgt anhand der Tangentenmethode. Grundlage dafür ist die in einer vorangegangenen Betrachtung gewonnenen Erkenntnis, dass in der Abbildung fast jeder vertikale, horizontale und schräge Bogen als eine Hyperbel erscheint. Der Mittelpunkt und die Asymptoten der

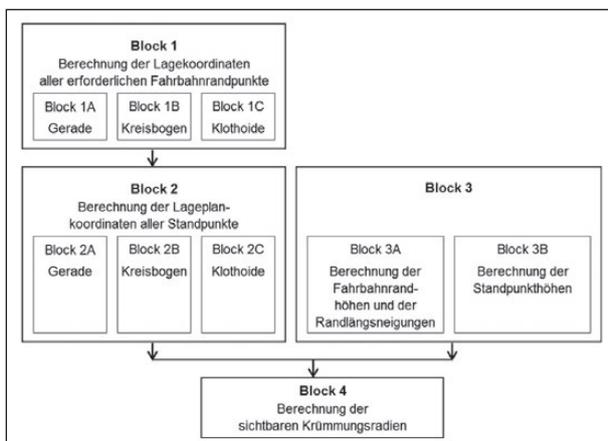


Bild 10: Programmdokumentation von Osterloh (nach OSTERLOH, 1983)

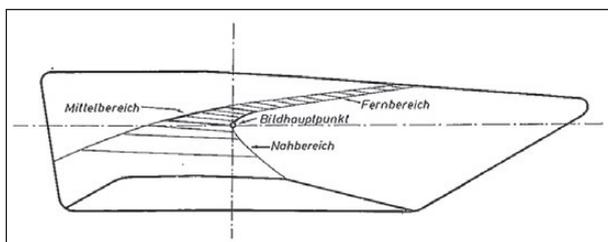


Bild 11: Perspektivbild der Straße (OSTERLOH, 1983)

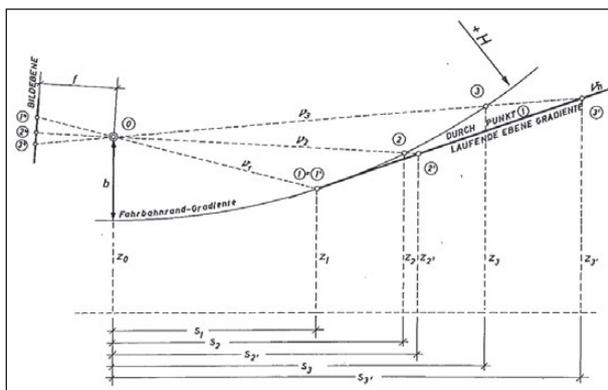


Bild 12: Ermittlung der sichtbaren Kurve im Längsschnitt (OSTERLOH, 1983)

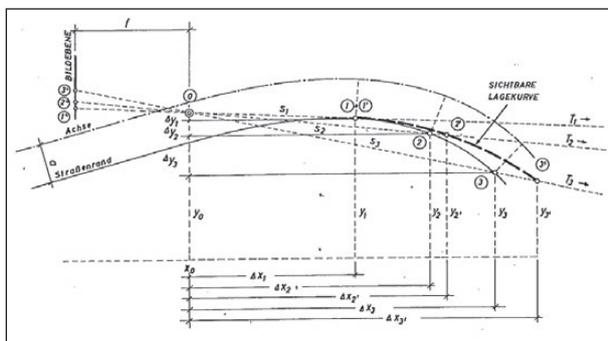


Bild 13: Ermittlung der sichtbaren Kurve im Lageplan (OSTERLOH, 1983)

Hyperbel sind leicht zu konstruieren. SPRINGER / HUIZINGA (1975) detektieren Defizite in der räumlichen Linienführung über Einschnürungen und Ausbauchungen. Diese können nach SPRINGER /

HUIZINGA (1975) vermieden werden, wenn sich die Wendepunkte der Achse und der Gradiente überlagern.

OSTERLOH (1983) hat den räumlichen Eindruck des Perspektivbildes auf den Kraftfahrer mathematisch erfasst. Dazu hat er sichtbare Krümmungsradien über das Perspektivbild berechnet, diese mit dem real vorhandenen Krümmungsbild verglichen und Wannen- als auch Kuppeneffekte rechnerisch nachgewiesen.

Für die Berechnung der sichtbaren Krümmungsradien hat OSTERLOH (1983) ein Modell aufgestellt und programmiert (Bild 10).

OSTERLOH (1983) legt dabei als Hauptbedingung für die Untersuchung und Beurteilung der Kurven fest, dass der Bildhauptpunkt der Perspektive in dem Berührungspunkt des Hauptstrahls mit dem Innenrand der Straße liegt (Bild 11).

Anhand der gegebenen Daten zur Straßenachse, Gradiente und Querneigung werden über die Blöcke 1 bis 3 des Modells die Werte für die Bogenkleinpunkte und deren Höhen ermittelt (Bild 10).

Für die im Block 4 zu berechnenden sichtbaren Krümmungsradien ist, neben den in den Blöcken 1 bis 3 berechneten Werten, die Kenntnis von der Augenhöhe über der Fahrbahn erforderlich. Im Rahmen einer Voruntersuchung analysierte OSTERLOH (1983), wie sich unterschiedliche Beobachterstandpunkte auf die sichtbare Krümmung auswirken. Dabei hat er ermittelt, dass vor allem die Augenhöhe einen bedeutenden Einfluss auf die berechnete sichtbare Krümmung hat. Die Täuschung nimmt mit geringer werdender Augenhöhe beim Wannen- und beim Kuppeneffekt überproportional zu.

In Bild 12 und Bild 13 sind Skizzen zur Ermittlung der sichtbaren Kurve dargestellt. Für die Berechnung eines Bogenradius werden drei Punkte benötigt, die sich auf dem Bogen befinden. Der in den Skizzen dargestellte Punkt 1 entspricht dem Bildhauptpunkt der Perspektive. Die Punkte 2 und 3 haben von Punkt 1 einen Abstand von 10 m und 20 m. Die Bildkoordinaten (1'', 2'' und 3'') der Punkte 1, 2, und 3 werden auf eine ebene Gradiente, die durch den Punkt 1 geht, projiziert. Daraus ergeben sich die Punkte 2' und 3' (Bild 12).

Die sichtbare Lagekurve ergibt sich schließlich, wenn die Werte  $s_2'$  und  $s_3'$  in den Lageplan übertragen werden (Bild 13, Punkte 1, 2' und 3').

Die sichtbare Krümmung  $R_s$  wird getrennt für beide Fahrbahnränder berechnet. Aus den Ergebnissen wird anschließend das harmonische Mittel gebildet. Für die Untersuchung wählt OSTERLOH (1983) konstante Zielpunktabstände, aus denen die zugehörigen Standpunkte berechnet werden.

Bei dem Vergleich zwischen dem sichtbaren Radius  $R_s$  und dem geplanten Radius  $R_g$  kann nicht ausschließlich das Verhältnis zwischen diesen betrachtet werden, da es sich bei großen Radien im Vergleich zu kleinen Radien anders auf die Sicherheit auswirkt. Daher modifiziert OSTERLOH (1983) das Radienverhältnis und berechnet einen Risikofaktor  $S$ :

$$S = \left[ \frac{\log R_s}{\log R_g} \right]^6 \quad \text{Gl. 1}$$

OSTERLOH (1983) weist darauf hin, dass das Sicherheitsbild, welches sich nach Gleichung 1 berechnen lässt, nicht durch Daten belegt wurde und daher nicht allgemein gültig ist.

BIEDERMANN (1984) hat im Rahmen seiner Untersuchungen zur Straßentrassierung auf der Grundlage von Geschwindigkeiten unter anderem den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und den sichtbaren Straßenflächen analysiert. Als maßgebende Faktoren, die das Fahrverhalten und demnach auch das Geschwindigkeitsverhalten beeinflussen, hat er die Kurvigkeit, die Fahrbahnbreite und die Sichtweite herausgearbeitet. Die Fahrbahnfläche innerhalb des Sehfeldes nimmt dabei mit abnehmender Krümmung, mit zunehmender Fahrbahnbreite und mit zunehmender Sichtweite zu.

Für die Erfassung der sichtbaren Straßenflächen nimmt BIEDERMANN (1984) aus der Fahrersicht alle 20 m ein Perspektivbild von einer Untersuchungsstrecke auf (Augpunkthöhe: 1,10 m). Aus den Perspektivbildern ermittelt er die sich aus der räumlichen Sicht ergebenden Straßenflächen. Diese bezieht er auf die Gesamtfläche innerhalb des Kreises (Sehfeld, welches sich in Abhängigkeit vom Sehwinkel ergibt), um die sichtbaren Straßenflächen unabhängig vom Maßstab der Bildvergrößerung zu gestalten (Bild 14).

BIEDERMANN (1984) hat im Rahmen seiner Untersuchungen Sehwinkel zwischen  $5^\circ$  und  $30^\circ$  analysiert. Im Ergebnis beschreibt er die Zusammenhänge zwischen den sichtbaren Straßenflächen und

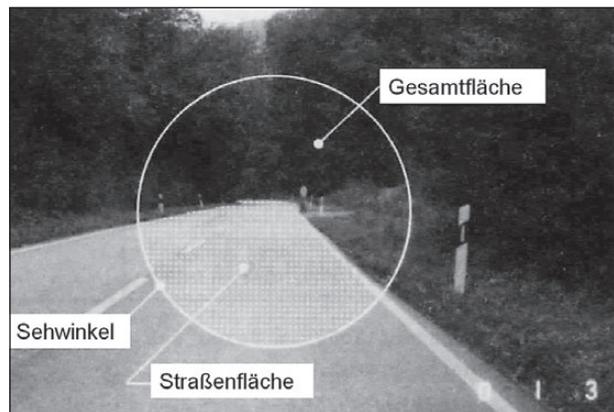


Bild 14: Sehfeld des Fahrzeugführers (BIEDERMANN, 1984)

der Geschwindigkeit  $V_{85}$ . Die dabei getroffenen Aussagen können nicht verallgemeinert werden, da die erarbeiteten Größen nicht validiert wurden.

Ziel der Arbeit von KAYSER et al. (1985) war es, die Elemente des Fahrraums zu ermitteln, die einen Einfluss auf den Fahrzeugführer haben, und sie anschließend zu quantifizieren. Dazu wurden die Teilbereiche des Systems Mensch-Fahrzeug-Raum getrennt voneinander untersucht. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse stellten die Grundlage für eine gemeinsame Betrachtung dar.

KAYSER et al. (1985) haben Untersuchungen zur Bildinhalteerfassung durchgeführt. Dazu wurden Fotografien von ausgewählten Messstrecken mit einem Bildabstand von 50 m, einer Brennweite von 50 mm und einer Augpunkthöhe von 1,10 m aufgenommen. Diese wurden anschließend aufbereitet, wobei eine Abstraktion der fahrtraumbildenden Elemente erfolgte. Die Bildinhalteerfassung wurde anhand des Rasterverfahrens durchgeführt. Dabei wurden die Fotografien über eine Rasterschablone (Bild 15) in Teilbilder zerlegt. Bei der Auswertung der Informationen in den Teilbildern erfolgte eine Merkmalerkennung und eine Flächenzuweisung zu den Merkmalen. Demnach wurde die im Teilbild auszuwertende Fläche als prozentualer Anteil an der Gesamtfläche des Teilbildes angegeben, wobei jeder Fläche ein Merkmal zugewiesen wird (KAYSER et al., 1985).

Die aus der Bildinhalteerfassung gewonnenen Informationen wurden anschließend ausgewertet. Dafür konnten im Rahmen des Forschungsprojektes nur heuristische Verfahren entwickelt werden.

KAYSER et al. (1985) haben weiterhin Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Dabei wurde über Verfolgungsfahrten von freifahrenden Einzelfahr-

73	74	75										85	86		
		76	77	78	79	80	81	82	83	84					
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
		103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114		
		115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126		
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142
		143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154		
155	156	157										158	159		
160	161	162										163	164		

Bild 15: Rasterschablone zur Bildinhaltsfassung (KAYSER et al., 1985)

zeugen das Geschwindigkeitsverhalten auf den Messstrecken analysiert.

Außerdem wurde das Wahrnehmungsverhalten der Fahrzeugführer untersucht. Dabei wurden von Versuchspersonen deren Blickbewegungen analysiert und deren subjektiven Äußerungen bewertet. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse konnten Rückschlüsse auf die Abhängigkeiten zwischen der Straßenraumgestalt und dem Fahrverhalten gezogen werden.

Im Ergebnis der Untersuchungen stellten KAYSER et al. (1985) fest, dass anhand der entwickelten Verfahren die quantitativen und qualitativen Eigenschaften des Straßenraumes, des Fahrverhaltens und der Wahrnehmungsindikatoren beschrieben werden können. Dies kann jedoch nicht verallgemeinert oder im Planungsprozess angewendet werden.

OTTEN (1988) baut auf das von KAYSER et al. (1985) entwickelte Verfahren auf. Er verbessert dieses, indem er das im Rahmen der rasterfeldweisen Bildauswertung erzeugte Ergebnistableau durch einen von ihm entwickelten Algorithmus automatisch generieren lässt. Der Algorithmus basiert auf Trassierungsdaten, Gestaltungselementen und einem einfachen Geländemodell. Der abzubildende Raum wird dabei linearisiert dargestellt, wobei die Elemente des Raumes in „Einzelscheiben“ aufgelöst werden.

Zur Bewertung der räumlichen Linienführung von Straßen hat ENGELKE (1990) streckenspezifische Parameter abgeleitet. Die wesentlichen Grundlagen dafür hat er von OSTERLOH (1983) übernommen. Im Ergebnis der Untersuchungen bestätigt ENGELKE (1990) den Einfluss der räumlichen Li-

nienerführung auf das Fahrverhalten der Fahrzeugführer. Dies belegt er anhand des „sichtbaren Radius“. ENGELKE (1990) leitet weiterhin aus einer umfangreichen Literaturanalyse ab, dass der Fahrer durch die Gesamtheit aller fahrraumbildenden Elemente einer Straße beeinflusst wird. Den größten Einfluss hat dabei jedoch das perspektivische Bild der voraus liegenden Straße.

ENGELKE (1990) hat in seiner Untersuchungen den Wannens- und den Kuppeneffekt analysiert. Er kommt zu dem Ergebnis, dass diese zum einen eine Gefährdung für die Verkehrsteilnehmer und zum anderen gestalterische Defizite darstellen.

APPELT (1998) hat sichtbare Radien als ein Kriterium zur Kontrolle der räumlichen Linienführung untersucht. Die Beurteilung der Kuppen- und Wanneneffekte erfolgt dabei anhand der gleichen Vorgehensweise. APPELT (1998) hat die von OSTERLOH (1983) und ENGELKE (1990) zur mathematischen Erfassung des Straßenraums aufgestellten Modelle angewandt sowie deren Ergebnisse analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in ein weiterentwickeltes Berechnungsmodell (Progressiv-Verfahren) eingebunden, welches anschließend für Messstrecken angewendet wurde. Für das Modell wurden dabei folgende neue bzw. ergänzende Festlegungen getroffen:

- Für die Beurteilung der sichtbaren Krümmungen werden die Markierungslinien des Fahrstreifens betrachtet. Die Fahrerposition befindet sich 1 m über der Fahrbahn in Fahrstreifenmitte.
- Die Beurteilung des Fahrraums erfolgt am – vom Fahrer wahrgenommenen – Bereich des Krümmungsscheitels an der Kurveninnenseite.
- Der Fahrraum wird aus Fahrersicht kontinuierlich erfasst. Die Vorausorientierung wird in gestreckten Bereichen auf  $\leq 250$  m begrenzt.
- Der Fahrer nimmt die sichtbare Fahrbahnkrümmung als Bezugsmaßstab zur Einschätzung der voraus liegenden Straße.

Im Ergebnis ist nach dem Progressiv-Verfahren ein überwiegend glatter Verlauf der sichtbaren Radien zu verzeichnen. Dieser gibt zu den bekannten Überlagerungsfällen aus Lage- und Höhenplan logische Rückschlüsse (APPELT, 1998).

Das Progressiv-Verfahren wurde anschließend anhand eines weiteren Berechnungsverfahrens, einem entwickelten Algorithmus zur Ermittlung des

sichtbaren Radius aus dem Perspektivbild, validiert. Dafür bildet das Perspektivbild der ebenen Trasse die Bezugsgröße zur Bewertung der Abbildungsverzerrung. Ansonsten werden alle wesentlichen Modellfestlegungen des Progressiv Verfahrens übernommen. APPELT (1998) vergleicht die beiden Verfahren in einer Untersuchung zum Einfluss der Modellfestlegungen und der Entwurfsgrößen auf die ermittelten Abbildungsverzerrungen sowie sichtbaren Radien die beiden Berechnungsverfahren. Dabei kommt er zu dem Schluss, dass die direkte Perspektivbildauswertung mit 0,1 m Bezugspunktstand das am besten geeignete Verfahren ist (APPELT, 1998).

APPELT (1998) hat weiterhin Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten durchgeführt. Dies erfolgte anhand von Querschnittsmessungen und Verfolgungsfahrten. Die Ergebnisse aus den Berechnungsverfahren wurden anschließend dem erhobenen Geschwindigkeitsverhalten gegenübergestellt und analysiert. Daraus resultierte, dass die ermittelten sichtbaren Radien im Vergleich zu den Lageplanradien einen besseren Bezug als Führungsgröße des Fahrverhaltens bieten (APPELT, 1998).

Anschließend wurde der Zusammenhang von sichtbaren Radien und dem Unfallgeschehen analysiert. Dabei konnten jedoch keine Sicherheitsgrenzen der Abbildungsverzerrung festgelegt werden, die verallgemeinerungsfähig sind. Für die Abschätzung der perspektivischen Abbildung, die Beurteilung des Ausbaubedarfes und die Optimierung der Straßentwürfe erstellt APPELT (1998) unter anderem Nogramme und definiert Berechnungsformeln.

Kriterien zur Differenzierung der räumlichen Defizite Tauchen und Flattern wurden von OSBURG (2000) untersucht. Eine Variation der Entwurfparameter ergab, dass bei geringen Längsneigungen ( $s = 1\%$ ) lediglich das Defizit Flattern auftritt. Ab einer Längsneigung von  $s = 5\%$  wurde Tauchen festgestellt. Ein Wechsel zwischen diesen beiden Erscheinungen tritt folglich zwischen den genannten Längsneigungen auf. Außerdem konnte mit zunehmenden Kuppenhalbmessern abnehmende Längen und Tiefen von Sichtschatten beobachtet werden.

BODEN (2000) erarbeitete ein Schema, mit dessen Hilfe Landstraßen hinsichtlich ihrer räumlichen Linienführung in gute, brauchbare und schlechte Entwürfe kategorisiert werden können. Beschreibende Parameter hierfür stellen

- Sichtweiten,
- Kurvigkeit,
- Relationstrassierung im Lageplan,
- Überlagerung der Wendepunkte in Lage- und Höhenplan,
- Elementlängen sowie
- Abbildungsverzerrungen

dar. Dabei eignen sich besonders quantitative Beschreibungsrößen, um eine Strecke hinsichtlich ihrer räumlichen Linienführung objektiv beschreiben zu können.

Eine weitere quantitative Bewertungsmöglichkeit in Form eines Parameters wurde von DIETZE (2000) aufgeworfen. Hierbei wurde der Bildpunktstand eingeführt, welcher innerhalb des Perspektivbildes als „euklidischer Abstand zweier aufeinanderfolgender Bildpunkte“ definiert werden kann. Geringe Bildpunktstände sind demnach ein Indiz für hohe Krümmungen.

Von REPPE (2001) wurde ein Zusammenhang zum Unfallgeschehen hergestellt. Anhand der Überlagerung von Bildpunktständen und Unfallhäufungsstellen kann ein parabelförmiger Funktionsverlauf ausgemacht werden, welcher sich wie folgt zusammensetzt:

- Sehr kleine Bildpunktstände (Stauchung) führen zu erhöhten Unfallkosten.
- Mittlere Bildpunktstände (zwischen 0,005 m und 0,010 m) führen zu dem niedrigsten Niveau der Unfallkosten.
- Bildpunktstände größer 0,015 m (Dehnung) führen wiederum zu erhöhten Unfallkosten.

Es besteht somit voraussichtlich ein Zusammenhang zwischen der optischen Stauchung und Dehnung einer Strecke und dem Unfallgeschehen.

ZIMMERMANN (2001) konnte für die Beurteilung der räumlichen Linienführung keinen universell anwendbaren Bewertungsansatz ermitteln. Er führt aber einzelne geeignete Kriterien auf, mit dessen Hilfe Defizite in der räumlichen Linienführung detektiert werden können. ZIMMERMANN (2001) stuft die Sicht als ein Hauptkriterium ein. Er unterteilt die Sichtprobleme in drei Gruppen:

- physisch beeinträchtigte Sicht,

- verzerrte Sicht und
- qualitativ ungünstige Sicht.

Unter der ersten Gruppe werden nicht ausreichende Sicht (z. B. Unterschreiten der Haltesichtweite, verdeckter Kurvenbeginn) und unterbrochene Sicht (z. B. Tauchen, Springen) verstanden. Eine verzerrte Sicht tritt unter anderem bei dem Wanneneffekt sowie eine qualitativ ungünstige Sicht z. B. bei Aufwölbung und Flattern auf (ZIMMERMANN, 2001).

Für die Beurteilung der Sichtbarkeit vorausliegender Lageplankrümmungswechsel sind folgende Faktoren von Bedeutung (ZIMMERMANN, 2001):

- Anforderung an die zu gewährleistende Erkennbarkeit der vorausliegenden Kurve (sichtbare Richtungsänderung und sichtbare Elemente des Straßenraumes) und
- Abstand des Punktes zum Kurvenanfang, an dem die Anforderungen erfüllt sein müssen.

Für die sichtbare Richtungsänderung wird der Wert 3,5 gon gemäß den RAS-L (1995) (FGSV, 1995) angenommen. Die Eingangsgröße der sichtbaren Elemente des Straßenraumes wird über die Qualität der sichtbaren Straßenoberfläche ermittelt. Der Abstand des Punktes zum Kurvenanfang ist in den restlichen Kriterien implizit enthalten.

Bei einer unterbrochenen Sicht, d. h. bei Sichtschattenstrecken zwischen zwei einsehbaren Streckenabschnitten, ist die Tiefe der Straßenoberfläche die wichtigste Größe. Diese entspricht dem Abstand zwischen der Straßenoberfläche und der „Linie, die den sichtbaren vom unsichtbaren Bereich des Perspektivbildes trennt“ (ZIMMERMANN, 2001, S. 45).

Als Beurteilungskriterium für Sichtverzerrungen weist ZIMMERMANN (2001) die sichtbare Straßenoberfläche im Perspektivbild aus. Für die Beurteilung des Wanneneffektes wird dabei der Verhältniswert aus wannenüberlagerter und ebener Lageplankurve betrachtet, wobei die charakteristischen Verläufe der Verhältniswerte normiert werden.

Flache bzw. unstete Auftreffwinkel des Sichtstrahls auf die Fahrbahnoberfläche können zu geringen sichtbaren Straßenoberflächen führen, welche die optische Qualität der Straße reduzieren. Für die Beurteilung der Sichtqualität wird die Relation zwischen der tatsächlichen sichtbaren Straßenoberfläche und einer Vergleichstrassierung mit einem ebe-

nen Höhenplan sowie ohne Querneigungseinfluss betrachtet (ZIMMERMANN, 2001).

ZIMMERMANN (2001) hat ein Verfahren entwickelt, welches die Beurteilungskriterien berechnet und darstellt. Weiterhin kann über dieses die Sichtweite als maßgebliche Entwurfsgröße beurteilt werden. Außerdem kann für unsichtbare Punkte die Tiefe der Verdeckung gemessen werden, so dass jede beliebige Hindernishöhe auswertbar ist.

Im Ergebnis werden die abgeleiteten Größen in einem Eigenschaftsband dargestellt. Dieses hat ZIMMERMANN (2001) als Band für die Qualität der Sicht (QuaSi-Band) bezeichnet.

WEISE et al. (2001) entwickelten ein Berechnungsmodul, mit dessen Hilfe die kumulierte Winkeländerung einer Strecke aus deren Perspektivbild entnommen werden kann. Bezogen auf die untersuchte Abschnittslänge wird dieser Quotient als sichtbare Kurvigkeit bezeichnet.

TIEDKE (2001) führte daraufhin Untersuchungen durch, aus denen Zusammenhänge zwischen den Winkeländerungen einer Strecke und dem Fahrverhalten der Kraftfahrer abgeleitet werden sollten. Dabei stellten sich rückläufige Geschwindigkeiten und höhere Geschwindigkeitsdifferenzen bei zunehmender Winkeländerung ein. Den Ergebnissen ist jedoch nur ein tendenzieller Charakter zuzuschreiben, da die beobachteten Zusammenhänge große Streubereiche aufwiesen.

WEISE et al. (2002) haben eine umfangreiche Literatur- und Richtlinienauswertung durchgeführt. Darauf aufbauend haben sie Parametervariationen von Raumelementen in Perspektivbildern mittels Computersimulationen untersucht. Dabei haben sie in Bezug auf das Raumelement folgende drei Standpunkte gewählt:

- 250 m vor Beginn des Raumelements,
- 125 m vor Beginn des Raumelements und
- am Beginn des Raumelements.

Aus den Untersuchungen ging et al. hervor, dass unterschiedliche Längsneigungen unter der Voraussetzung einer gleichen Neigungsdifferenz keinen Einfluss auf das Perspektivbild haben (Bild 16). Anhand der gewonnenen Erkenntnisse haben WEISE et al. (2002) Empfehlungen für eine Erweiterung der Wendepunktregel gegeben. Dabei benennen sie eine maximale Verschiebung der Wendepunkte

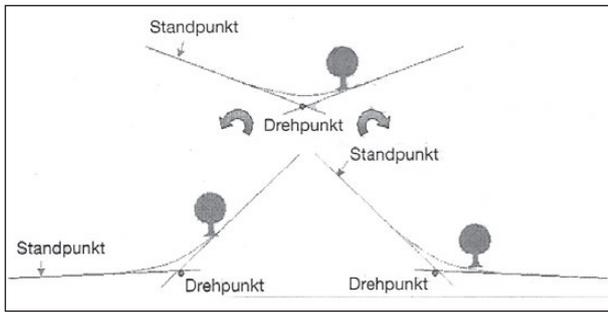


Bild 16: Nachweis für die Analogie der Perspektivbilder mit gleicher Neigungsdifferenz (WEISE et al., 2002)

und eine Reihenfolge der Wendepunkte in den Ebenen. Aus der Untersuchung von Defiziten in Standardraumelementfolgen wurden Empfehlungen zur Vermeidung dieser abgeleitet. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich für eine Augpunktstation Sichtschatten durch die Länge und maximale Tiefe ausreichend quantitativ beschreiben lassen. WEISE et al. (2002) haben die Einflüsse der Raumelemente und -folgen auf die Verkehrssicherheit und das Fahrverhalten über eine Wirkungsanalyse untersucht. Dazu haben sie die Trassierungsparameter von ausgewählten Messstrecken erhoben, quantifizierbare Parameter zur Beschreibung der räumlichen Linienführung berechnet, eine Verkehrs- und eine Unfallanalyse durchgeführt sowie letztlich das Fahrverhalten in Abhängigkeit von der räumlichen Linienführung analysiert. Die Erhebung des Fahrverhaltens erfolgte über Verfolgungsfahrten, wobei von frei fahrenden Einzelfahrzeugen Geschwindigkeitsprofile erstellt wurden. Aus der Wirkungsanalyse resultierte, dass Raumelemente einen Einfluss auf das Fahrverhalten haben und sich unterschiedlich darauf auswirken. Im Ergebnis der Untersuchung haben WEISE et al. (2002) ein Schema zur Überprüfung der räumlichen Linienführung entwickelt und für die RAS-L (FGSV, 1995) einen Vorschlag für das Kapitel der räumlichen Linienführung erarbeitet (WEISE et al., 2002).

ZIMMERMANN et al. (2006) haben eine Untersuchung zur Kontrolle und Bewertung der räumlichen Linienführung mit quantitativen Parametern durchgeführt. Diese basiert auf den Arbeiten von ZIMMERMANN (2001) und WEISE et al. (2002). Sie haben für die Ermittlung von Sichtschattenstrecken und für die Beurteilung von vorausliegenden Kurvenanfängen die Berechnungsansätze von ZIMMERMANN (2001) verwendet. In den Berechnungsansätzen wurden vor allem bei der Ermittlung von Sichtverzerrungen (Wanneneffekt) die Parameter variiert. Für die Analyse der Auswirkungen von Defiziten in der räumlichen Linienführung auf das

Fahrverhalten, wurden Verfolgungsfahrten durchgeführt. Dabei wurden unter anderem die Geschwindigkeitsverläufe von Einzelfahrern ( $V_{85}$ ) aufgenommen. Um das Fahrverhalten in Abhängigkeit vom Einfluss der räumlichen Linienführung analysieren zu können, muss dieser von den lageplanbedingten Einflüssen unterscheidbar gemacht werden. Dazu haben ZIMMERMANN et al. (2006) die gemessene  $V_{85}$  mit einer Modellgeschwindigkeit verglichen. Für die Modellgeschwindigkeit haben sie eine Funktion für eine lageplankrümmungsabhängige  $V_{85}$  aus dem Gesamtstreckenkollektiv berechnet. Ein Einfluss der räumlichen Linienführung auf das Fahrverhalten besteht, wenn ein deutlicher Unterschied zwischen der gemessenen  $V_{85}$  und der Modell-Geschwindigkeit vorliegt. Dabei konnten vor allem für verdeckte Kurvenanfänge und Sichtverzerrungen Erkenntnisse für spätere Grenz- und Schwellenwertbestimmungen gewonnen werden. Darauf aufbauend wurde das Unfallgeschehen analysiert, wobei der Einfluss von verdeckten Kurvenanfängen auf das Fahrverhalten nachgewiesen werden konnte (ZIMMERMANN et al., 2006).

Im Ergebnis der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass eine übersichtliche Trassierung mit frühzeitiger Erkennbarkeit des Trassenverlaufes tatsächlich eine Verbesserung der Verkehrssicherheit bewirkt. Weiterhin wurden für Landstraßen Grenz- und Schwellenwerte für

- die minimale Entfernung zwischen der ersten Sichtbarkeit eines vorausliegenden Krümmungswechsels und dem Fahrer,
- die maximale Tiefe von Sichtschattenstrecken und
- die Begrenzung von Sichtverzerrungen in Wannenkurven

bestätigt oder festgelegt. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen von ZIMMERMANN et al. (2006) war die Erweiterung und Präzisierung des an der Universität Karlsruhe entwickelten QuaSi-Bandes.

Das Forschungsprojekt von LIPPOLD et al. (2010) hatte zum Ziel, wissenschaftlich abgesicherte Trassierungsgrenzwerte für den Ausbau von vier- auf sechsstreifige Autobahnen zu ermitteln. Dazu haben sie fahrdynamische Berechnungen, Erhebungen zum Fahrverhalten, der Streckengeometrie und Unfalldaten sowie entwässerungstechnische Simulationsrechnungen durchgeführt. Die Bewertung der räumlichen Linienführung erfolgte dabei über

die erhobenen Daten zur Streckengeometrie und den Unfalldaten. LIPPOLD et al. (2010) betrachten ausschließlich gekrümmte Wannen, wobei folgende Randbedingungen festgelegt wurden:

- maximaler Radius der Lageplankurve:  $R = 10.000 \text{ m}$ ,
- Raumelementlänge entspricht der Länge der Lageplankurven sowie
- Grenzen des Erfassungsbereiches der Unfälle entspricht Beginn und Ende der Raumelemente.

LIPPOLD et al. (2010) haben für die Raumelemente die Verhältnisse  $R : H_W$  bestimmt und sie in vier Klassen eingeteilt. Für jede Klasse wurden anschließend die mittlere Unfallrate und die mittlere Unfallkostenrate der zugehörigen Lageplanradien berechnet sowie miteinander verglichen. Daraus ließen sich kritische Verhältniswerte ableiten.

Aus den Untersuchungen von LIPPOLD et al. (2010) ging hervor, dass gekrümmte Wannen mit großen Verhältnissen ( $R : H_W > 7,5$ ) im Vergleich zu gekrümmten Wannen mit kleinen Verhältnissen tendenziell höhere Unfallkennwerte aufweisen. Sie können bestätigen, dass ein höheres Unfallgeschehen besteht, wenn kleine bzw. mittlere Lageplanradien ( $R \leq 2.000 \text{ m}$ ) mit kleinen Wannenhalbmessern überlagert werden, was eine optische Dehnung des Radius zur Folge hat. Ein erhöhtes Unfallgeschehen weisen dabei Raumelemente mit Verhältnissen von  $> 1 : 7,5$  auf. LIPPOLD et al. (2010) empfehlen daher beim Um- und Ausbau von Bundesautobahnen dieses Verhältnis nicht zu überschreiten, wenn Wannen im Höhenplan mit Kurven im Lageplan ( $R \leq 2.000 \text{ m}$ ) überlagert werden.

### Kombination aus qualitativen und quantitativen Bewertungsverfahren

Ziel der Untersuchungen von KÜHN (2003) war es, qualitative Kriterien und quantitative Kontrollgrößen auf der Grundlage von Perspektivbildern für ein Kontrollverfahren zu entwickeln, welches der Überprüfung der räumlichen Linienführung dient. Das Verfahren sollte eine objektive Qualitätskontrolle ermöglichen. Nach KÜHN (2003) stellt die Computersimulation dabei ein neues Hilfsmittel für den Entwurfsingenieur dar, im Entwurfsprozess eine Qualitätskontrolle durchführen zu können. Für die Perspektivbildberechnung legt er zunächst auf der Grundlage der Arbeit von WEISE et al. (2002) und eigenen vorangegangenen Forschungsarbeiten Modellannahmen fest (Tabelle 1). Er empfiehlt, die-

Merkmal	Modellannahme
Höhe über Fahrbahn	Augpunkt: 1,0 m Zielpunkt: 0,0 m
Lage im Querschnitt	Aug- / Zielpunkt: Mitte des Fahrstreifens
Vorausorientierung	Wahrnehmbarkeitszone 3: 75 m
Bildweite (Brennweite)	$f = 50 \text{ mm}$

Tab. 1: Modellannahmen (KÜHN, 2003)

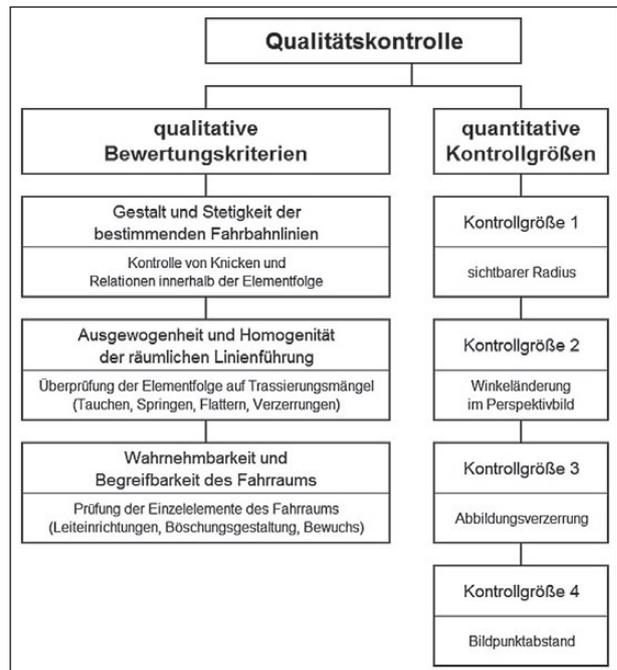


Bild 17: Prüfung der räumlichen Linienführung mit Perspektivbildern (nach KÜHN, 2003)

se auch für künftige Perspektivbildberechnungen als Grundlage zu verwenden.

Nach KÜHN (2003) sollte die Überprüfung der Fahrraumgestaltung und der räumlichen Linienführung kombinatorisch anhand von qualitativen Kriterien und quantitativen Kontrollgrößen erfolgen (Bild 17). Die qualitativen Bewertungskriterien lassen dabei einen subjektiven Spielraum zu. Dagegen können quantitative Kontrollgrößen aus dem Perspektivbild abgeleitet, berechnet und anhand von Richtwerten für eine objektive Bewertung verwendet werden.

Für die Kontrolle der räumlichen Linienführung schlägt KÜHN (2003) vor, zu prüfen, ob der Achsentwurf im Lage- und Höhenplan in Standardraumelemente eingeteilt werden kann, d. h. eine Abstimmung der Elementlängen und der Wendepunkte im Lage- und Höhenplan durchführbar ist. Ist dies möglich, kann auf eine Perspektivbildberechnung verzichtet werden und es ist eine geeignete Einteilung in Raumelemente vorzunehmen. Diese und die Raumelementfolgen sind anschlie-

ßend auf Mängel zu überprüfen. Kann der Achsentwurf nicht in Standardraumelemente eingeteilt werden, empfiehlt KÜHN (2003) eine Perspektivbildberechnung durchzuführen. Auf deren Grundlage soll anschließend mit Hilfe von qualitativen Bewertungskriterien und quantitativen Kontrollgrößen eine Qualitätskontrolle erfolgen.

KÜHN (2003) weist darauf hin, dass der Nachteil eines Einzelperspektivbildes ist, dass es einer Momentaufnahme entspricht. Daher ist es sinnvoller, über einen festgelegten Kamerapfad Einzelperspektivbilder zu berechnen und diese zu einer virtuellen Animation zusammensetzen.

Virtuelle Animationen lassen sich nach KÜHN (2003) in statische und dynamische Simulationen unterscheiden. Statische Darstellungen stellen eine hinsichtlich der Geschwindigkeit, der Fahrlinie und des Blickverhaltens im Vorfeld vorgegebene Perspektivbildabfolge bereit. Im Gegensatz hierzu reagieren dynamische Animationen beispielsweise durch einen Joysticks auf das Fahrverhalten eines Probanden. Für deren Realisierung sind jedoch hohe Rechenleistungen erforderlich.

KÜHN et al. (2007) haben im Rahmen ihres Forschungsprojektes eine einheitliche Methodik für die Überprüfung der räumlichen Linienführung von Landstraßen entwickelt, bei der sie die von WEISE et al. (2002) gewonnenen Erkenntnisse zu den Standardraumelementen, das von ZIMMERMANN et al. (2006) entwickelte Kontroll- und Bewertungsverfahren auf der Grundlage von quantitativen Parametern sowie eine qualitative Perspektivbildbewertung zusammenführen. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der mit unterschiedlichen CAD- und Visualisierungsprogrammen erstellten räumlichen Darstellungen des Fahrbahnbandes abgesichert.

KÜHN et al. (2007) haben zunächst Untersuchungen zur Erkennbarkeit der Defizite durchgeführt, d. h. in welcher Art und Weise eine Visualisierung erfolgen muss, um Defizite erkennen zu können. Dafür haben sie von realen Strecken Defizite nachtrassiert, wobei sie nach vier Detailliertheitsgraden unterschieden haben. Dadurch ermittelten sie den Detailliertheitsgrad einer Visualisierung, der erforderlich ist, um ein Defizit erkennen zu können. Weiterhin haben KÜHN et al. (2007) in einer Entfernung von 50 m, 100 m, 150 m, 200 m und 250 m vom Bezugspunkt des Defizits Perspektivbilder erstellt und in diesen

Defizit	notwendiger Detailliertheitsgrad (Visualisierungsinhalt)	Bezugspunkt des Defizits	Visualisierungsstandpunkt / -bereich
Tauchen in der Geraden	Fahrbahnband	der Wanne voraus liegender Neigungswechsel	aus Sichtschattenband ablesbar
Tauchen in der Kurve	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten, Gelände	der Wanne voraus liegender Neigungswechsel	aus Sichtschattenband ablesbar
Springen	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten, Gelände und ggf. Seitenraumelemente	der Wanne voraus liegender Neigungswechsel	aus Sichtschattenband ablesbar
Flattern in der Geraden	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten	der ersten Wanne voraus liegender Neigungswechsel	200 m vor bis 200 m nach Bezugspunkt
Flattern in der Kurve	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten, Gelände und ggf. Seitenraumelemente	der ersten Wanne voraus liegender Neigungswechsel	200 m vor bis 200 m nach Bezugspunkt
Verzerrung der Längsneigung	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten, Gelände und ggf. Seitenraumelemente	Neigungswechsel der Wanne	Bereich konst. Längsneigung vor Bezugspunkt
Knick im Lageplan	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten	Kurvenmittelpunkt	200 m vor Bezugspunkt
Knick im Höhenplan in der Wanne	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten	Neigungswechsel der Wanne	> 100 m vor Bezugspunkt
Knick im Höhenplan in der Kuppe	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten	Neigungswechsel der Kuppe	> 100 m vor Bezugspunkt
Aufwölbung	Fahrbahnband	Neigungswechsel der Wanne	100 m vor Bezugspunkt
Widerspruch zw. Straße und Umfeld	Fahrbahnband, Markierung + Leitpfosten, Gelände und Seitenraumelemente	k. A.	k. A.

Tab. 2: Empfehlungen für Detailliertheitsgrad, Bezugspunkt und Visualisierungsstandpunkt (KÜHN et al., 2007)

die Erkennbarkeit des Defizits bewertet. Im Ergebnis haben sie den erforderlichen Visualisierungsstandpunkt bzw. -bereich ermittelt. Aus den Untersuchungen zur Erkennbarkeit der Defizite resultieren die in Tabelle 2 aufgelisteten Ergebnisse. Ergänzend weisen KÜHN et al. (2007) darauf hin, dass es für die visuelle Erkennbarkeit der Defizite ausreichend ist, wenn Regelquerschnitte anstelle von gerechneten Querprofilen verwendet werden. Weiterhin sollte im Allgemeinen ein Bereich von 300 m vor dem Bezugspunkt des Defizits bis zum Bezugspunkt selbst für jedes Defizit visualisiert werden.

Nach der qualitativen Bewertung über die Betrachtung der Perspektivbilder haben KÜHN et al. (2007) eine quantitative Bewertung der räumlichen Linienführung anhand des von ZIMMERMANN et al. (2006) entwickelten Verfahrens durchgeführt. Aus dem Vergleich zwischen den Perspektivbildern und den quantitativen Kontrollgrößen haben KÜHN et al. (2007) ermittelt, dass zwischen diesen eine hohe Übereinstimmung in Hinblick auf das Detektieren von Defiziten in der räumlichen Linienführung besteht. Jedoch haben sie auch erkannt, dass über die quantitative Bewertung Defizite ermittelt wurden, die in den Perspektivbildern als nicht maßgebend erschienen.

Der Ablauf des im Ergebnis der Untersuchungen von KÜHN et al. (2007) entwickelten Prüfverfahrens ist in Bild 18 dargestellt. Im ersten Schritt soll geprüft werden, ob die entworfene Trasse in eine Folge aus Standardraumelementen eingeteilt werden kann. Anschließend wird im zweiten Schritt die Trasse quantitativ auf sicherheitsrelevante Defizite überprüft. Die Abschnitte, die sich aus einer Folge von Standardraumelementen zusammensetzen, werden ausschließlich auf kritische Sichtschattenbereiche untersucht. Dagegen wird bei den Abschnitten, die sich aus einer beliebigen Elementfolge zusammensetzen, zusätzlich geprüft, ob verdeckte Kurvenbeginne vorliegen.

KÜHN et al. (2007) haben ermittelt, dass kritische Sichtschattenbereiche anhand einer Veränderung der Höhen- und / oder Lageplanelemente beseitigt werden können. Dabei empfehlen sie folgende Vorgehensweise:

1. Vergrößerung des Kuppenhalbmessers
2. Vergrößerung des Wannenthalbmessers
3. iterative Vergrößerung beider Ausrundungshalbmesser

#### 4. Veränderung der Längsneigung

#### 5. Verschiebung der Gradientenschnittpunkte

Verdeckte Kurvenbeginne können vermieden werden, wenn die Kreisbogenlänge und der Klothoidenparameter vergrößert werden oder ggf. der Kreisbogen durch eine Gerade ersetzt wird.

Im dritten Schritt des Prüfverfahrens nach KÜHN et al. (2007) wird die Gesamttrasse anhand einer qualitativen Bewertung mit Perspektivbildern auf gestalterische Defizite geprüft. Nach KÜHN et al. (2007) können für gestalterische Defizite keine quantitativen Kriterien festgelegt werden, da diese von der Anordnung und den Parametern von mehreren aufeinander folgenden Lage- und Höhenplanelementen abhängig sind.

KÜHN et al. (2007) haben ermittelt, dass Knicke im Lageplan durch die Verwendung von größeren Radien vermieden werden können. Knicke im Höhenplan können durch größere Wannenthalbmesser beseitigt werden.

Nach dem Prüfverfahren von KÜHN et al. (2007) muss nach jeder Änderung der Entwurfselemente das gesamte Verfahren noch einmal von vorn durchgeführt werden.

Auch in KÜHN et al. (2009) wird darauf hingewiesen, dass eine ausschließlich qualitative Überprüfung der räumlichen Linienführung nicht durchgängig leistbar ist. Aufgrund der Komplexität ist auch eine ausschließlich quantitative Kontrolle nicht zielführend. Sie schlagen ebenfalls eine kombinierte Prüfung mit qualitativen Bewertungskriterien und quantitativen Kontrollgrößen vor. Diese soll über das in KÜHN et al. (2007) entwickelte dreistufige Prüfverfahren erfolgen (Bild 18).

KÜHN / JHA (2011) schlussfolgert, dass sich mit einem einheitlichen Prüfmechanismus objektive und zuverlässige Aussagen hinsichtlich sicherheitsrelevanter Defizite fassen lassen. Im Falle deren Auftretens sind Anpassungen der Gradienten notwendig. Liegt dann auch noch ein unbefriedigender Entwurf vor, sind Veränderungen der Achse im Bereich des auftretenden Defizits vorzunehmen. Eine Einteilung in Standardraumelemente wird als zielführend erachtet. Das Auftreten von gestalterischen Defiziten sollte die Ausnahme darstellen.

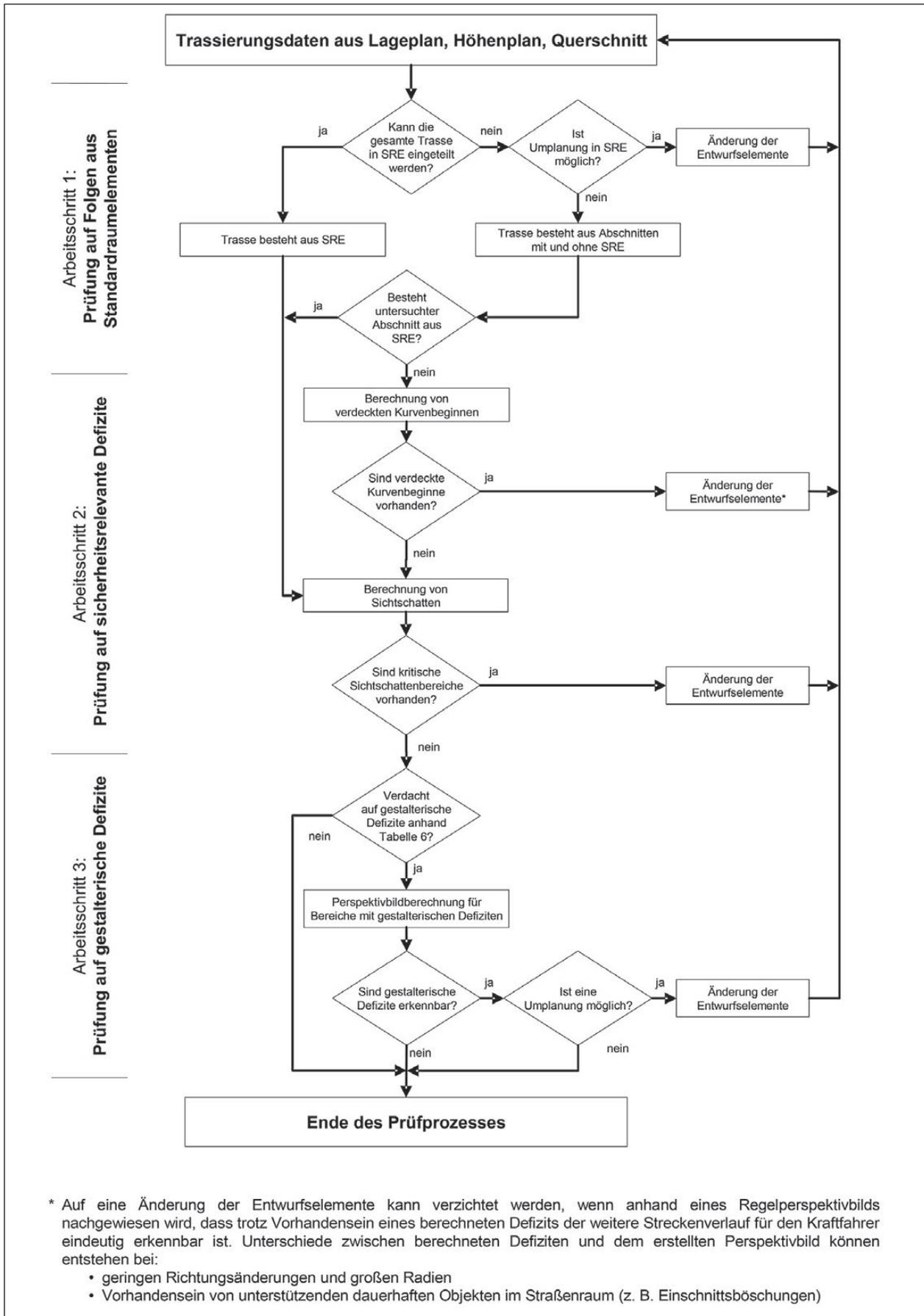


Bild 18: Ablauf der Prüfung der räumlichen Linienführung (KÜHN et al., 2007)

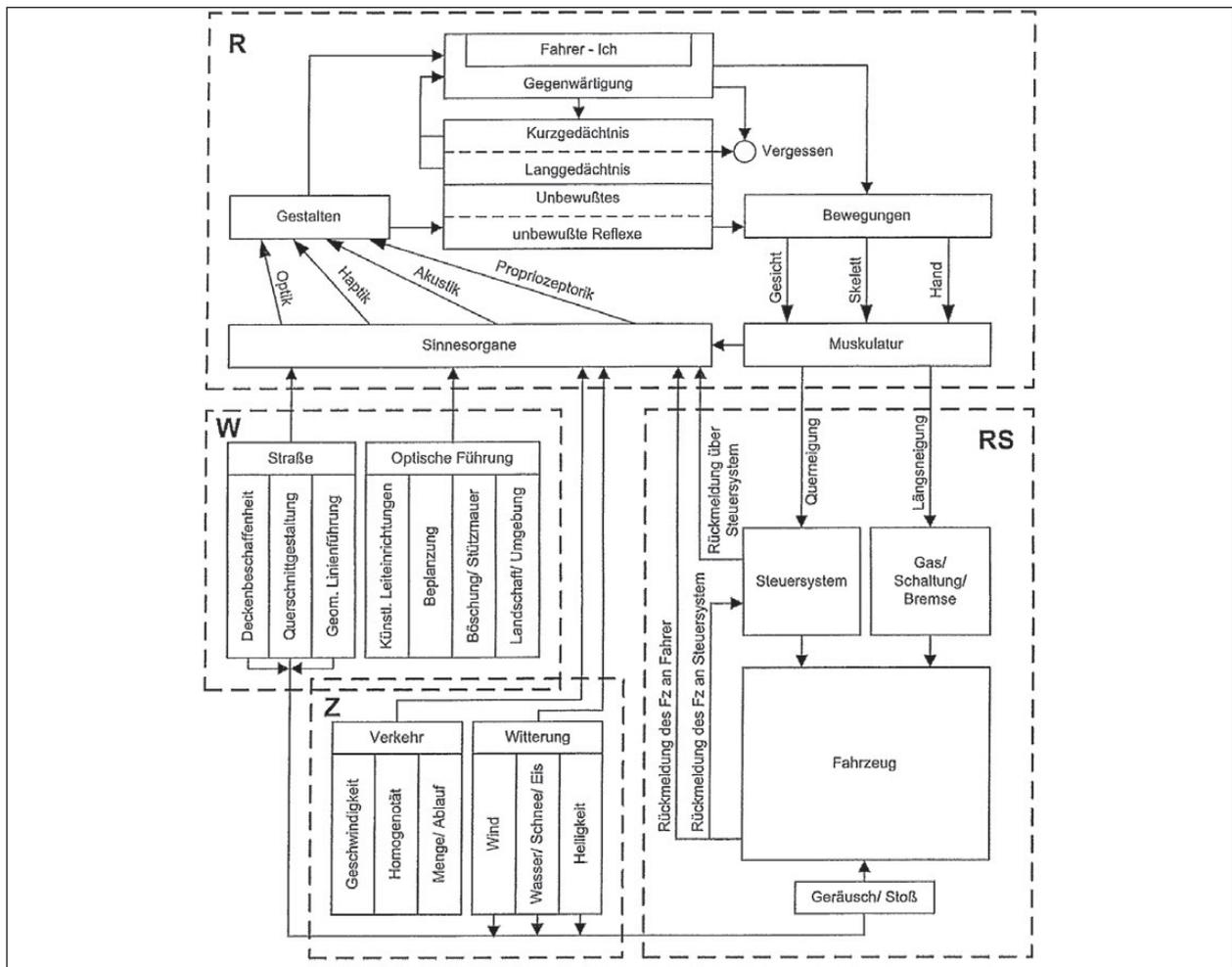


Bild 19: Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Straße (DURTH, 1974)

## 2.1.5 Wahrnehmung

### System Fahrer - Fahrzeug - Fahrraum

Das Fahrverhalten eines Fahrzeugführers wird durch das Zusammenwirken zwischen dem Fahrer, dem Fahrzeug und dem Fahrraum bestimmt. DURTH (1974) beschreibt dieses System in Form eines Regelkreises (Bild 19). Dieser setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Regler (R): Fahrer,
- Regelstrecke (RS): Fahrzeug,
- Führungsgröße (W): Straße und ihre optische Führung sowie
- Störgröße (Z): Verkehr und Witterung.

Der Fahrer (R) nimmt die Informationen aus seiner Umwelt (W und Z) über die Sinnesorgane auf. Dabei haben die Augen (Optik) die größte Bedeutung (DURTH, 1974). Deren Anteil beträgt über 90 % (BIEDERMANN, 1984).

Von der insgesamt zur Verfügung stehenden Informationsmenge wird nur ein geringer Teil als verkehrsmaßgebende Information erkannt und für das Fahrverhalten verarbeitet. Im Gehirn werden diese in bewusstes und unbewusstes Handeln umgesetzt. Die resultierende Fahrerreaktion bestimmt schließlich die Längsregelung (Geschwindigkeit) und die Querregelung (Lenkradeinschlag) des Fahrzeuges, wodurch dieses und somit auch die Fahrlinie des Fahrzeuges beeinflusst werden (DURTH, 1974).

Mit der Gestaltung der Straßenverkehrsanlage wird demnach das Fahrverhalten der Kraftfahrer entscheidend bestimmt. Daher ist eine gute optische Führung der Straße eine Voraussetzung für eine ausreichende Fahrsicherheit.

### Optische Informationsaufnahme

Die vom Fahrer von der Straße aufgenommenen optischen Informationen liegen innerhalb des Gesichtsfeldes. Dabei kann ohne Kopfbewegung und mit unbewegtem Auge ein horizontaler Bereich von

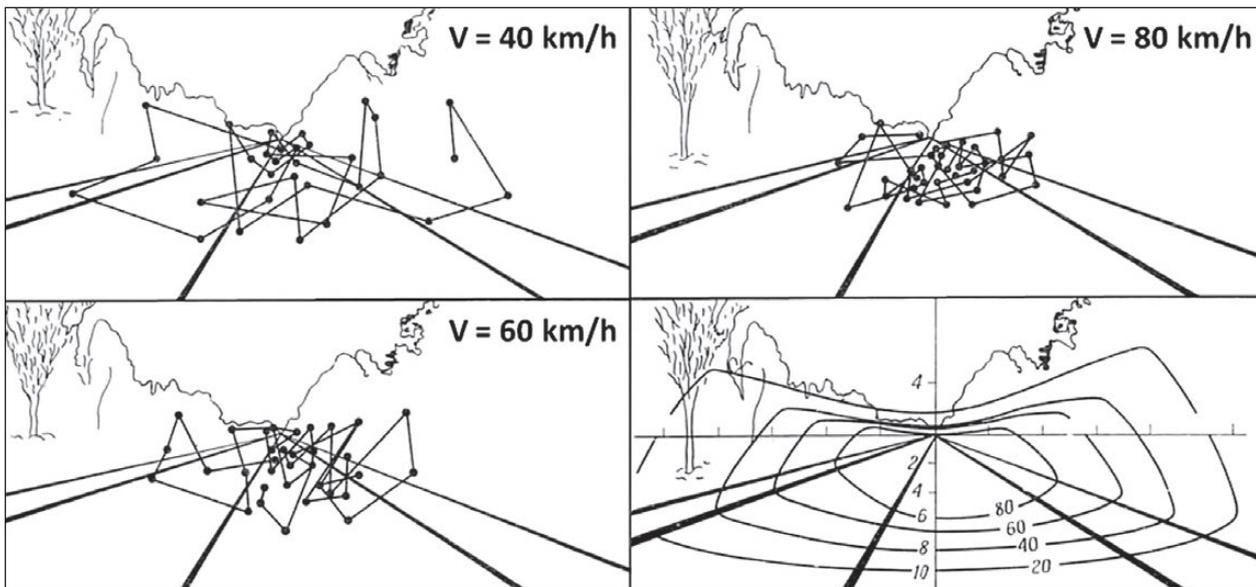


Bild 20: Positionen der Fixationspunkte (links und oben rechts) und Größe des Sehfeldes mit zunehmenden Geschwindigkeiten (unten rechts, Zahlen auf den Kurven entsprechen den Geschwindigkeiten in [km/h]) (BABKOV, 1975)

180° bis 220° aufgenommen werden. Die Ausdehnung des Gesichtsfeldes beträgt in vertikaler Richtung ca. 130°. Innerhalb des Gesichtsfeldes befindet sich das Blickfeld, in dem scharfes Sehen mit bewegtem Auge möglich ist. In horizontaler und in vertikaler Richtung beträgt der maximale Winkel 45° (BIEDERMANN, 1984).

Innerhalb des Blickfeldes besteht ein Bereich, aus dem der Fahrzeugführer die für den Fahrvorgang relevanten Informationen aufnimmt. Dieser wird als Sehfeld bezeichnet. Das Sehfeld ist variabel, da es von vielen Faktoren beeinflusst wird. Dies sind z. B. die persönlichen Merkmale des Fahrzeugführers oder die Fahrgeschwindigkeit (KAYSER et al., 1989). In dem Sehfeld liegen die Fixationen und Blicksprünge, die der Fahrzeugführer für die Wahrnehmung des Fahrtraumes benötigt. Dabei verharrt der Blick des Fahrzeugführers bei einer Fixation ca. 0,2 s bis 0,3 s auf einem Punkt bzw. Objekt (BIEDERMANN, 1984).

### Blickverhalten

Durch die Fixationspunkte wird nach ZIMMERMANN et al. (2006) das Blickverhalten charakterisiert. Dabei variiert die Häufigkeit der Fixationen in Abhängigkeit von den Fahrgeschwindigkeiten und dem Fahrbahnverlauf.

Bei einer Autobahnfahrt in einer Geraden liegen nach COHEN (1987) die Fixationspunkte überwiegend im Bereich oberhalb des Horizontes, etwas rechts von der Fahrtrichtung. HRISTOV (2009) bestätigt die Erkenntnisse von COHEN (1987). Die

mittlere Position der Fixationen liegt dabei ca. 1° rechts von der Hauptblickrichtung (HRISTOV, 2009). BABKOV (1975) hat unter anderem eine Literaturanalyse über den Einfluss der Fahrgeschwindigkeiten auf die Fixationspunkte durchgeführt. Aus der Literaturanalyse ging hervor, dass mit zunehmenden Geschwindigkeiten das Sehfeld geringer wird. Die Fixationspunkte häufen sich dabei zunehmend im Fluchtpunkt (Bild 20).

FRIEDINGER (1980) hat im Rahmen seiner Untersuchungen herausgefunden, dass der Fahrer während einer Fahrt durch eine Rechtskurve die Randlinie fixiert. Der Fixationspunkt liegt dabei im aus der Fahrerperspektive scheinbaren Scheitelbereich der Kurve. Bei Linkskurven fixiert der Fahrer eher die Mittellinie. COHEN (1987) und HRISTOV (2009) bestätigen die Aussagen von FRIEDINGER (1980).

Nach LEUTNER (1974) ist die Wahrnehmung von bewegten und unbewegten Gegenständen aufgrund des bestehenden Auflösungsvermögens des menschlichen Auges begrenzt. Dabei sind unbewegte Gegenstände bis zu einer Entfernung von max. 400 m bis 500 m und bewegte Gegenstände bis zu einer Entfernung von max. 600 m bis 800 m erfassbar (in TEICHNER, 1955).

### Psychologische und physiologische Sichtweite

Die psychologische Sichtweite ist die Tiefe des Verkehrsraumes, von dem der Fahrzeugführer den Eindruck hat, ihn für die Fahraufgabe einwandfrei überschauen beziehungsweise erfassen zu können. Der Verkehrsraum muss so gestaltet sein,

dass die Menge der aufzunehmenden Informationen dem vom Fahrzeugführer gewählten Geschwindigkeitsniveau entspricht. Es soll demnach ausreichend Zeit zur Verfügung stehen, den vor ihm liegenden Fahrraum wahrnehmen und erfassen sowie die dazu entsprechende Fahrweise wählen zu können. Diese Vorgänge sollen möglichst ohne Überschreiten der Bewusstseinschwelle erfolgen (HIERSCHE, 1968).

AULHORN (1971) hat die wahrnehmungsphysiologische Sichtweite als Abstand definiert, aus dem ein Objekt mit gegebener optischer Charakteristik (Kontrast, Form und Größe) vom Fahrer mit gegebener Sehschärfe bei vorhandenen Witterungs- und Lichtverhältnissen wahrgenommen oder erkannt werden kann. LORENZ (1971) fordert eine Sichtweite, mit der der Fahrer in der Lage sein soll, den Straßenverlauf und das Verkehrsaufkommen so beurteilen zu können, dass unvermittelte Bremsmanöver vermieden werden. Weiterhin soll durch diese eine vorausschauende Beurteilung des Fahrraums möglich sein. Diese Sichtweite bezeichnet er als Erfassungssichtweite. DILLING (1973) definiert die Erkennbarkeitssichtweite als Entfernung, in der ein Streckenabschnitt uneingeschränkt überschaubar ist.

Die vorangegangenen Erkenntnisse werden von LEUTNER (1974) zusammengefasst. Er unterteilt den Fahrraum in drei Zonen, die durch wachsende Anspannung und Aufmerksamkeit des Fahrers bestimmt sind:

- Zone 1: Fernorientierung und Information (600 m bis 250 m),
- Zone 2: Bereitschaft und Entscheidung (250 m bis 75 m) und
- Zone 3: Nahorientierung und Handlung (bis 75 m).

LIPPOLD / SCHULZ (2007) haben das Zusammenwirken entwurfstechnischer, fahrdynamischer und verhaltenspsychologischer Größen sowie ihre Auswirkungen auf das Fahrverhalten untersucht. Als Ergebnis haben sie ein Modell für die Orientierungssichtweite entwickelt. Unter der Orientierungssichtweite wird die Sichtweite verstanden, die notwendig ist, ohne abrupte Reaktionen die Streckencharakteristik erfassen und sein Fahrverhalten darauf anpassen zu können.

Der Zusammenhang zwischen den Sichtweiten und dem Fahrraum ist in Bild 21 dargestellt.

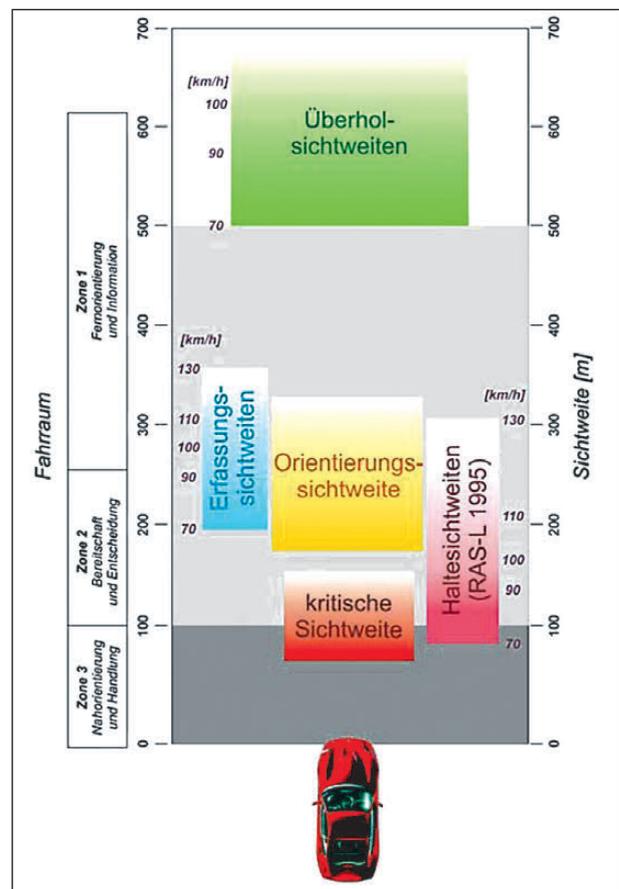


Bild 21: Zusammenhang Fahrraum – Sichtweiten (LIPPOLD / SCHULZ, 2007)

### 2.1.6 Grundlagen zu Probandenbefragungen

Von jedem Menschen wird die Existenz von gestalterischen Defiziten in der räumlichen Linienführung unterschiedlich wahrgenommen. Die vom Fahrraum aufgenommenen Informationen werden nicht nur verarbeitet und gespeichert, sie werden auch mit dem vorhandenen Wissen verglichen. Dabei spielen vor allem Erfahrungen, Einstellungen und äußere Bedingungen, wie z. B. bestehende Werte und Normen, bedeutende Rollen (BUSINESSDESIGNER GbR, 2014). Daher ist es sinnvoll, zu ermitteln, wie die Linienführung einer Straße vorrangig wahrgenommen wird. Aus den Ergebnissen lassen sich anschließend geeignete Festlegungen zu der Existenz von Defiziten, d. h. ob ein gestalterisches Defizit in der räumlichen Linienführung vorliegt oder nicht, ableiten.

Die Ermittlung der Existenz von gestalterischen Defiziten in der räumlichen Linienführung erfolgt über die Befragung eines Probandenkollektives, dem verschiedene Fahrräume anhand von Perspektivbildern gezeigt werden. Die Probanden müssen die Perspektivbilder anschließend beurteilen.

### Quantitative Methode „Urteilen“ zur Datenerhebung

Die Rangreihe der Perspektivbilder, d. h. es liegt kein Defizit vor bis das Defizit ist sehr stark ausgeprägt, kann über verschiedene Methoden ermittelt werden, wie z. B. Rangordnungen oder Dominanzpaarvergleiche.

Bei Rangordnungen werden die Probanden u. a. durch folgende Verfahren vor eine einfache Rangordnungsaufgaben gestellt (BORTZ / DÖRING, 2009):

- direkte Rangordnung,
- Methode der sukzessiven Intervalle und
- Skalierung nach dem „Law of Categorical Judgement“.

Bei Dominanzpaarvergleichen müssen die Probanden entscheiden, „[...] bei welchem von zwei Objekten das untersuchte Merkmal stärker ausgeprägt ist [...]“ (BORTZ / DÖRING, 2009, S. 157). Dabei muss jedes zu untersuchende Objekt mit jedem anderen verglichen werden. Die aus der Befragung resultierende Datengrundlage kann anschließend u. a. über folgende Methoden ausgewertet werden (BORTZ / DÖRING, 2009):

- indirekte Rangordnung,
- Law of Comparative Judgement,
- Konstanzmethode und
- Skalierung nach dem Signalentdeckungsdilemma.

Für die Ermittlung einer einfachen Rangreihe von Perspektivbildern ist die Anwendung der direkten oder der indirekten Rangordnung sinnvoll.

Bei der direkten Rangordnung werden den zu untersuchenden Objekten von den Probanden Rangplätze zugeordnet. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die zu untersuchenden Objekte hinsichtlich eines definierten Merkmals eindeutig voneinander unterscheiden (BORTZ / DÖRING, 2009).

Aus dem Dominanzpaarvergleich geht hervor, wie häufig ein Objekt den anderen vorgezogen wurde. Bei der indirekten Rangordnung werden den Häufigkeiten nach ihrer Größe Rangplätze zugeordnet. Wird der Dominanzpaarvergleich von mehreren Probanden durchgeführt, werden die individuellen Häufigkeiten aufsummiert und den sich ergebenden Summen Rangplätze zugewiesen. Auch bei der in-

direkten Rangordnung wird vorausgesetzt, dass sich die zu untersuchenden Objekte hinsichtlich eines definierten Merkmals eindeutig voneinander unterscheiden. Die indirekte Rangordnung ist im Vergleich zur direkten Rangordnung verlässlicher (BORTZ / DÖRING, 2009).

### Methoden der Psychophysik

Aus Rangreihen von Perspektivbildern lassen sich keine Aussagen darüber ableiten, ab wann ein Defizit auftritt. Dies muss anhand einer weiteren Untersuchung ermittelt werden. Dafür sind Methoden der Psychophysik sinnvoll, die für Untersuchungen zu Zusammenhängen zwischen physikalischen Reizen und deren Wahrnehmung dienen. Für die Bestimmung von Grenzwerten anhand von effizienten und zuverlässigen Tests eignen sich u. a. adaptive Verfahren. Bei diesen werden nicht vor sondern während der Datenerhebung (Probandenbefragung) die Ausprägungen der vorzugebenden Vergleichsreize (Anzahl der zu bewertenden Perspektivbilder) in Abhängigkeit von der Antwort der Probanden festgelegt (HELLER, 2012).

Adaptive Verfahren können nach parametrischen und nonparametrischen unterschieden werden. Bei parametrischen adaptiven Verfahren wird die Form der psychometrischen Funktion vor den Messungen festgelegt. Dabei beschreibt die psychometrische Funktion den Zusammenhang zwischen der Stärke eines Reizes (Stärke der Ausprägung des Defizits) und der Wahrscheinlichkeit, den Reiz zu entdecken. Bei nonparametrischen adaptiven Verfahren wird keine psychometrische Funktion vor den Messungen festgelegt. Es wird ausschließlich vorausgesetzt, dass die Funktion stetig und streng monoton steigend mit zunehmender Reizintensität ist (HELLER, 2012).

Über die Zusammenhänge zwischen der Stärke eines Reizes und der Wahrscheinlichkeit, den Reiz zu entdecken, ist bzgl. der Problemstellung dieses Projektes derzeit nichts bekannt. Daher sind für die Untersuchungen nonparametrische adaptive Verfahren von Bedeutung. Diese können u. a. in stochastische Approximationen und in Staircase-Verfahren unterschieden werden (HELLER, 2012).

Bei der stochastischen Approximation wird mit zunehmender Durchgangszahl die Schrittgröße verkleinert (Unterschied zwischen den Perspektivbildern bzgl. der Stärke der Ausprägung des Defizits). Ist eine hinreichend kleine Schrittgröße erreicht, wird das Verfahren beendet. Der letzte Vergleichs-

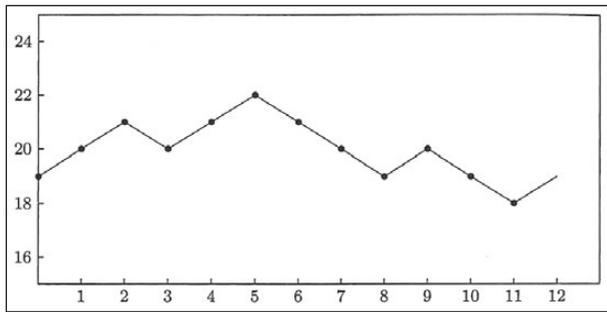


Bild 22: Simple-Up-Down Verfahren, Beispiel für eine Folge von Vergleichsreizen (HELLER, 2012)

reiz stellt die Schätzung für den Grenzwert dar. Da ausschließlich der letzte Vergleichsreiz in die Schätzung eingeht, ist die stochastische Approximation nicht sehr ökonomisch. Weiterhin können die Probanden in den letzten Durchgängen kaum noch Unterschiede zwischen den Reizintensitäten wahrnehmen. Dies kann die Motivation der Probanden negativ beeinflussen (HELLER, 2012).

Ein einfaches Staircase-Verfahren stellt das Simple-Up-Down Verfahren dar. Bei diesem ist die Schrittgröße konstant. Bei einer Veränderung in der Antwortkategorie (Defizit vorhanden oder nicht vorhanden), wird ein Wechsel der Schrittrichtung (Darstellung eines Perspektivbildes mit höherer bzw. geringerer Reizintensität) vorgenommen. Ein Abbrückriterium kann demnach z. B. die Anzahl der Umkehrpunkte sein. Die Schätzung des Grenzwertes erfolgt durch die Mittelung der Reizintensitäten an den Umkehrpunkten (Bild 22; HELLER, 2012).

### Fragebogenerstellung

Zur Aufnahme der menschlichen Wahrnehmung bedarf es eines Instrumentariums, welches die subjektiven Eindrücke eines Probandenkollektives in ein auswertbares Format überführt. Ein Fragebogen ist dafür ein anwendbares Mittel, die zugehörige Aufgabenstellung zu beantworten. Grundlegende Zielstellung hieraus sind reliable (zuverlässige) sowie valide (gültige) Aussagen hinsichtlich des formulierten Projektziels. Die genannten Gütekriterien lassen sich dann in ausreichendem Maße erreichen, wenn der praktischen Realisierung des Fragebogens ein fundiertes theoretisches Konzept zugrunde liegt.

Elementar kann in die mündliche und schriftliche Befragungen unterschieden werden. Letzteres bietet eine Ermittlung unter geringerem Zeitaufwand. Allerdings ist eine detaillierte Versuchsvorbereitung vorzusehen, da während der Probandenbefragung nicht mehr interagiert werden kann. Es sind deshalb

Fragen anzustreben, die eindeutig, möglichst kurz und nicht hypothetischer Natur sind, keine Unterstellungen oder Suggestionen enthalten, einen eindeutigen zeitlichen Bezug verwenden und anhand der dem Probanden zur Verfügung stehenden Informationen beantwortbar sind. Der Formulierung geschlossener Fragen wird wiederum eine Reduzierung des Aufwands zugesprochen. Es ist dann jedoch anzustreben, dass sich jeder Befragte zweifelsfrei einer Antwortkategorie zuordnen kann (PORST, 2011).

Die Befragung beginnt mit interessanten Einstiegsfragen, um das Interesse des Probanden zu wecken. Anschließend sollten die Fragen einen für den Versuchsteilnehmer logischen Verlauf einnehmen. Demographische Angaben senken das Interesse des Befragten und sollten zum Ende abgefragt werden (PORST, 2011).

Nach Möglichkeit sind der Erhebung Pretests voranzustellen, um gegebenenfalls auftretende Fehler der Methodik frühzeitig zu erkennen. Die Durchführung von Öffentlichkeitsarbeit bzw. das Schaffen von Anreizen zur Teilnahme sind zum Erreichen eines ausreichend großen Probandenkollektives unabdingbar (KIRCHHOFF et al., 2010).

## 2.2 Stand des Regelwerkes

Die räumliche Linienführung wurde bereits bei den deutschen Autobahnprojekten der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts berücksichtigt. Dies beschränkte sich auf die manuelle Erstellung von einzelnen Perspektivbildern und deren qualitative Bewertung. Die anschließenden Jahre waren mit einem umfangreichen Ausbau des Autobahnnetzes innerhalb der Grenzen des deutschen Reiches verbunden. Aufbauend auf deren Erfahrungen wurden 1942 die Bauanweisung für Reichsautobahnen – Trassierungsgrundsätze veröffentlicht (BAURAB TG, 1942). Im Anschluss an den zweiten Weltkrieg erfolgte im westlichen Teil Deutschlands die Einführung der Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL). Die Entwurfsrichtlinien gliederten sich sektoral in die Segmente Querschnitte (RAL-Q), Linienführung (RAL-L) und Knotenpunkte (RAL-K). Diese waren auch für die Straßenkategorie Autobahn gültig (FGSV, 2008b).

In den folgenden Jahrzehnten erfolgte eine vertiefende Auseinandersetzung mit der Thematik, die im Jahr 1970 zum Abschnitt 2 „Räumliche Linienfüh-

nung“ der Entwurfsrichtlinien „Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Teil II: Linienführung (RAL-L-2)“ (FGSV, 1970) führte. Mit diesen Richtlinien wurden erstmalig komplexe Empfehlungen und Vorgaben zur räumlichen Linienführung in das Regelwerk aufgenommen.

Nach den RAL-L-2 ist unter Berücksichtigung der räumlichen Linienführung eine vollkommener Trassierung möglich, womit sich Sicherheitsgewinne und Erhöhungen der Leistungsfähigkeit erwarten lassen können (FGSV, 1970). Zunächst wird dabei auf die Wirkung von Lage- und Höhenplanelementen eingegangen. Daraufhin erfolgt eine Überlagerung der Entwurfsebenen. Den sich daraus ergebenden Defiziten der räumlichen Linienführung wird aufbauend auf dem Lage- und Höhenplan bereits ein Perspektivbild angefügt. Es wird darauf verwiesen, dass auch der Fahrbahnrand, beispielsweise durch Bepflanzung ausgestattet, den optischen Eindruck der Strecke beeinflussen kann.

Das Vorkommen eines Defizits der räumlichen Linienführung wird im Zuge der RAL-L-2 ausschließlich anhand des qualitativen Abgleichs mit deren grundsätzlichen Charakteristik geführt. Perspektivdarstellungen des räumlichen Bildes sollen stets aus der Fahrerperspektive erfolgen. Aus einer erhöhten Position (Vogelperspektive) werden optische Mängel gegebenenfalls überbewertet (FGSV, 1970).

Die Inhalte der RAL-L-2 wurden später in die weiterentwickelten Entwurfsrichtlinien „Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS)“ integriert. Diese bestanden aus mehreren Teilen. Für die Gestaltung der Querschnitte war der Teil Querschnitte (RAS-Q) (FGSV, 1996) und für die Gestaltung der Linienführung der Teil Linienführung (RAS-L) (FGSV, 1995) gültig. Für die Ermittlung der zu verwendenden Entwurfs- und Betriebsmerkmale wird vor allem die Entwurfsgeschwindigkeit  $V_e$  zugrunde gelegt, welche in Abhängigkeit von der Straßenkategorie, der angestrebten Verkehrsqualität und der Schwierigkeit des Geländes bestimmt wird (FGSV, 1995).

Seit dem Jahr 2008 gelten für den Entwurf von Autobahnen die „Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)“ (FGSV, 2008b). Sie unterscheiden die Autobahnen nach drei Entwurfsklassen, um eine Einheitlichkeit von Autobahnen vergleichbarer Verkehrsbedeutung und Netzfunktion gewährleisten zu können. Die zugeordnete Funktion im Netz wiederum lässt sich anhand der Verbindungsfunktion der zu verknüpfenden Orte bestimmen. Deren Zuordnung wird durch die Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN) möglich und lässt auf die Straßenkategorie schließen. Die Bestimmung der Entwurfsklasse erfolgt in Abhängigkeit von der Straßenkategorie, der Lage zu bebauten Gebieten und der Straßenwidmung (FGSV, 2008b). Die Entwurfsklassen legen die Gestaltungsmerkmale fest (Tabelle 3).

Entwurfsklasse	EKA 1 A	EKA 1 B	EKA 2	EKA 3
Bezeichnung	Fernautobahn	Überregionalautobahn	Autobahnähnliche Straße	Stadtautobahn
Beschilderung	Z 330 StVO (Autobahn)	Z 330 StVO (Autobahn)	Z 331 StVO (Kraftfahrstraße)	Z 330 oder Z 331 StVO
zulässige Höchstgeschwindigkeit	keine	keine	keine	≤ 100 km/h
Regelquerschnitt	RQ 43,5 RQ 36 RQ 31	RQ 43,5 RQ 36 RQ 31	RQ 28	RQ 38,5 RQ 31,5 RQ 25
Mindestradien (min R [m])	900	720	470	280
Mindestlängen von Kreisbögen (min L [m])	75	75	55	55
maximale Längsneigung (max s [%])	4,0	4,5	4,5	6,0
Mindesthalbmesser von Kuppen (min HK [m])	13.000	10.000	5.000	3.000
Mindesthalbmesser von Wannen (min HW [m])	8.800	5.700	4.000	2.600
Mindestlängen von Tangenten (min T [m])	150	120	100	100

Tab. 3: Gestaltungsmerkmale der Entwurfsklassen nach RAA (FGSV, 2008b)

## 2.2.1 Querschnitte

Die RAS-Q definieren Regelquerschnitte, welche in Abhängigkeit von den Verkehrsstärken und der Straßenkategorie angewendet werden. Dabei sollen die Regelquerschnitte RQ 35,5; RQ 29,5; RQ 33 und RQ 26 nur für Autobahnen zum Einsatz kommen (FGSV, 1996). Die Querschnitte sind im Anhang 1 dargestellt.

In den RAA wird dagegen für jede Entwurfsklasse nur ein maßgebender Regelquerschnitt definiert, der nur in der Fahrstreifenanzahl veränderbar ist. Damit soll in Abhängigkeit der Verbindungsbedeutung und der maßgebenden Verkehrsstärken eine einheitliche Gestaltung von Autobahnen gewährleistet werden. Die Darstellungen der Regelquerschnitte der Entwurfsklassen sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

## 2.2.2 Lageplan

Nach den RAS-L sollte die Länge einer Geraden geringer als das 20fache des Betrages der Entwurfsgeschwindigkeit sein. Die Anordnung von einer Geraden zwischen gleichsinnig gekrümmten Kurven sollte vermieden werden. Für den Fall, dass dies nicht eingehalten werden kann, sollte die Mindestlänge der Geraden dem 6fachen des Betrages der Entwurfsgeschwindigkeit entsprechen. Die RAS-L empfehlen weiterhin, dass die Radien von aufeinanderfolgenden Kurven in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen sollten. Dabei sollten die Radienfolgen entsprechend Bild 23 im guten Bereich liegen (FGSV, 1995).

Die RAS-L geben den Mindestradius für eine Kurve, die auf eine Gerade folgt, in Abhängigkeit von der Länge der Geraden an (Tabelle 4).

Die Kurvenmindestradien und die Mindestlänge der Kreisbögen werden nach den RAS-L in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit bestimmt. Für die Entwurfsgeschwindigkeiten zwischen 90 km/h und 120 km/h sind diese Werte in Tabelle 5 aufgeführt.

Nach den RAS-L ist für Übergangsbögen der Klothoidenparameter zwischen  $R/3 \leq A \leq R$  zu wählen (FGSV, 1995).

Die RAA empfehlen Geraden im Lageplan maximal mit einer Länge von  $\max L = 2.000$  m auszubilden. Zwischen gleichsinnig gekrümmten Kurven

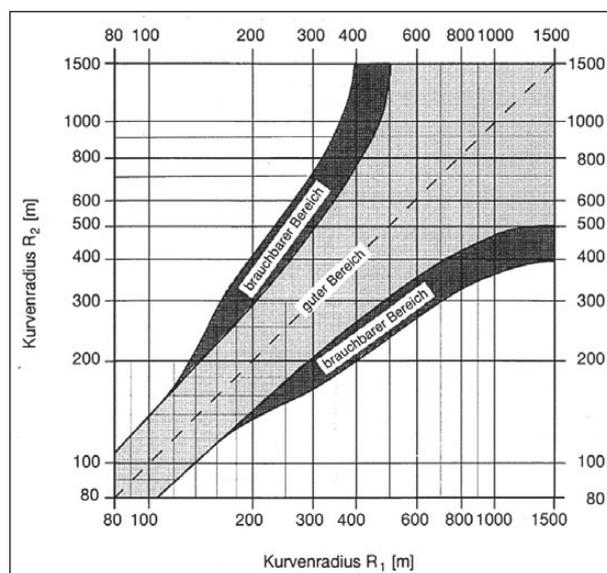


Bild 23: Abstimmung der Radienfolge bei anbaufreien Straßen außerhalb bebauter Gebiete mit maßgebender Verbindungsfunktion (FGSV, 1995)

Länge L [m] der Geraden	min R [m] des Kreisbogens
$L \geq 300$ m	min R > 400 m
$L < 300$ m	min R > L

Tab. 4: Kurvenmindestradien bei Elementfolge Gerade - Klothoide - Kreisbogen nach RAS-L (FGSV, 1995)

$V_e$ [km/h]	min R [m]	min L [m]
90	340	50
100	450	55
120	720	65

Tab. 5: Kurvenmindestradien und Mindestlänge der Kreisbögen nach RAS-L (FGSV, 1995)

sollten kurze Zwischengeraden vermieden werden. Ist dies nicht möglich, sollten die Geraden mindestens  $\min L = 400$  m lang sein (FGSV, 2008b).

Die Entwurfsklassen geben weiterhin Mindestradien und Mindestlängen für die Kreisbögen vor (Tabelle 3). Aufeinanderfolgende Kreisbogenradien sollen, um eine gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit gewährleisten zu können, ein Verhältnis von  $R1 / R2 \leq 1,5$  aufweisen, wenn  $R1 \leq 1.500$  m. Weiterhin sollten Kreisbogenradien im Anschluss an lange Geraden ( $LG > 500$  m) mindestens einen Radius von  $\min R = 1.300$  m einhalten (FGSV, 2008b).

Die RAA empfehlen auch wie die RAS-L, dass bei den Übergangsbögen die Klothoidenparameter

zwischen  $R / 3 \leq A \leq R$  ausgebildet werden (FGSV, 2008b).

**2.2.3 Höhenplan**

Die RAS-L definieren für anbaufreie Straßen außerhalb bebauter Gebiete mit maßgebender Verbindungsfunktion in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit maximale Längsneigungen. Für die Entwurfsgeschwindigkeiten zwischen 90 km/h und 120 km/h sind diese in Tabelle 6 aufgeführt.

Für die Kuppen- und Wannenhalmesser definieren die RAS-L ebenfalls Mindestwerte in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit. Bei den Kuppenmindesthalbmessern unterscheiden sie jedoch noch einmal nach den vorhandenen Haltesichtweiten sowie nach vorhandenen halben und vollen Überholsichtweiten. Die Kuppen- und Wannemindesthalbmesser für die Entwurfsgeschwindigkeiten zwischen 90 km/h und 120 km/h sowie bei Einhaltung der erforderlichen Haltesichtweiten ( $S_h$ ) sind in Tabelle 7 dargestellt.

Die Entwurfsklassen nach den RAA legen hinsichtlich der Gestaltung der Gradienten maximale Längsneigungen, Mindesthalbmesser für die Kuppen und Wannen sowie Mindestlängen für die Tangenten fest (Tabelle 3).

Die RAA weisen darauf hin, dass bei der Wahl des Kuppenhalbmessers auf die Einhaltung der erforderlichen Haltesichtweiten zu achten ist. Weiterhin sind für eine harmonische Linienführung die Wannenhalmesser nicht kleiner als die halben Kuppenhalbmesser zu wählen (FGSV, 2008b).

$V_e$ [km/h]	max s [%]
90	5,0
100	4,5
120	4,0

Tab. 6: Höchstlängsneigungen nach RAS-L (FGSV, 1995)

$V_e$ [km/h]	min $H_k$ [m] (bei $S_h$ )	min $H_w$ [m]
90	5.700	2.400
100	8.300	3.800
120	16.000	8.800

Tab. 7: Kuppen- und Wannemindesthalbmesser nach RAS-L (FGSV, 1995)

**2.2.4 Gestaltung des Fahrbandes**

Eine optisch befriedigende Linienführung der Straße stellt sich nach den RAS-L unter anderem dann ein, wenn sich von den Krümmungen im Lage- und Höhenplan die Wendepunkte in etwa an der gleichen Stelle befinden, wobei von einer gleichen Anzahl an Wendepunkten ausgegangen wird (Bild 24).

Die RAS-L geben weiterhin als maximales Verhältnis  $R / H$  Werte von 1/5 bis 1/10 an.

Nach den RAA wirkt sich auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit eine gute optische Führung positiv aus. Diese wird durch eine harmonische Elementfolge erreicht. Weiterhin soll der Streckenverlauf überschaubar sein, sodass er rechtzeitig erfassbar und eindeutig begriffbar ist (FGSV, 2008b).

Defizite in der räumlichen Linienführung können nach den RAA durch die Einhaltung der Mindestwerte der Entwurfselemente vermieden werden. Weiterhin kann eine optisch befriedigende Linienführung erreicht werden, wenn die Anzahl und analog zu den RAS-L die Lage der Wendepunkte der Krümmungen im Lage- und Höhenplan annähernd übereinstimmen. Kann dies nicht gewährleistet werden, so ist darauf zu achten, dass die Wendepunkte einer Ebene nicht mit den Tangentschnittpunkten der anderen Ebene zusammenfallen. Des Weiteren ist bei der Gestaltung der Linienführung darauf zu achten, dass die Tangentschnittpunkte der Lage- und Höhenplankurven möglichst dicht beieinander liegen (FGSV, 2008b).

Gemäß den RAA kann für folgende Elemente durch die Verwendung von deutlich größeren Werten als

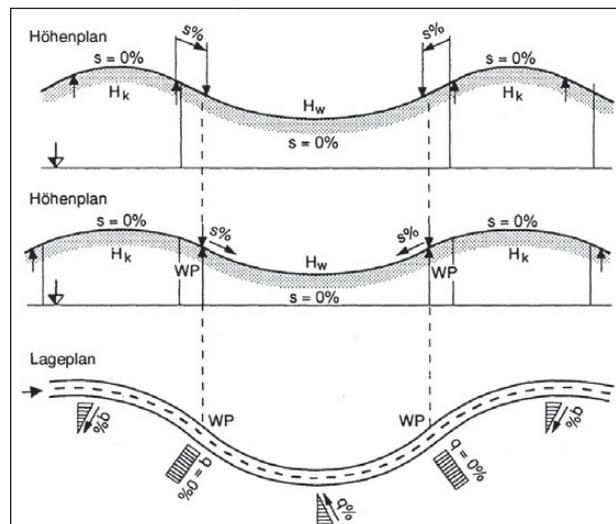


Bild 24: Zuordnung der Elemente in den Lage- und Höhenplänen nach RAS-L (FGSV, 1995)

die Mindestwerte die optische Wirkung der Straße verbessert werden (FGSV, 2008b):

- Kreisbogenradius,
- Länge der Kreisbögen,
- Wannen- und Kuppenhalbmesser sowie
- Tangenten der Wannen- und Kuppenausrundungen.

Weiterhin sollte im Höhenplan die Elementfolge weitgehend der Geländeform folgen. Der Kuppenhalbmesser ist im hügeligen Gelände größer als der Wannenthalbmesser zu wählen. In flachem Gelände ist aus Gründen eines optisch befriedigenden Fahrbahnverlaufs der Wannenthalbmesser deutlich größer als der Kuppenhalbmesser zu wählen (FGSV, 2008b).

### 2.2.5 Defizite in der räumlichen Linienführung

Die RAL-L weisen auf folgende zu vermeidende Defizite in der räumlichen Linienführung hin:

- Knickwirkung im Lageplan (Bild 25),
- Aufwölbung und Abplattung,
- lageplanfremde Abbildung (Knick im Lage- und im Höhenplan),
- Knickwirkung im Höhenplan in der Wanne und in der Kuppe,
- Schlingeln,
- verdeckter Kurvenbeginn,
- Flattern,
- Tauchen und Springen,
- Springen mit Versatz,
- Brettwirkung,
- kurze Zwischengeraden zwischen zwei gleichgerichteten Kurven und
- Widerspruch zwischen Straße und Umfeld (Bild 26).

Die Knickwirkung im Lageplan und im Höhenplan in der Wanne, der verdeckte Kurvenbeginn, das Flattern, das Tauchen und Springen, die Brettwirkung und der Widerspruch zwischen Straße und Umfeld wurden bereits in Kapitel 2.1.3 erläutert.

Der Eindruck einer Aufwölbung, d. h. Vortäuschung einer Kuppe, entsteht, wenn in der Gradienten zwi-

schen zwei Wannenn eine kurze Gerade angeordnet wird (Bild 27). Insbesondere an Brückenbauwerken ist auf deren Auftreten zu achten (FGSV, 1970). In diesem Zusammenhang wird häufig das Defizit Brettwirkung assoziiert, welches deutlicher bei hohen Längsneigungen in Erscheinung tritt. Analog tritt eine Abplattung, d. h. Vortäuschung einer Wanne, auf, wenn in der Gradienten zwischen zwei Kuppen eine kurze Gerade angeordnet wird (Bild 28) (FGSV, 1970). Deren Auftreten wird bereits im Zuge der BAURAB TG (1942) eine starre und harte optische Wirkung bescheinigt.

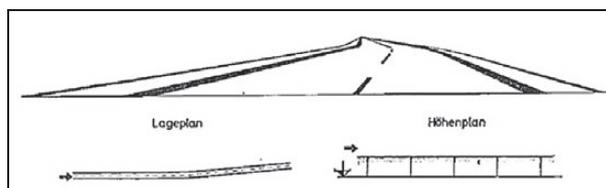


Bild 25: Knick im Lageplan (FGSV, 1970)

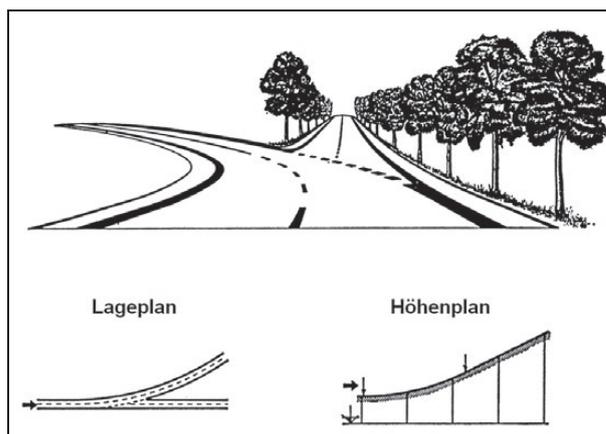


Bild 26: Widerspruch zwischen Straße und Umfeld (FGSV, 1970)

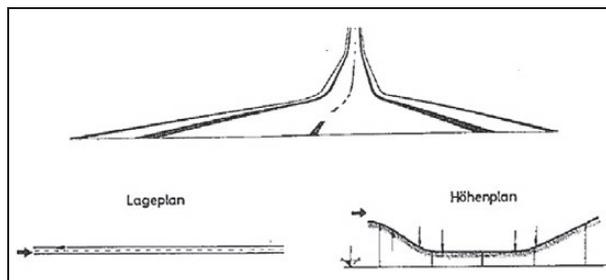


Bild 27: Aufwölbung (FGSV, 1970)

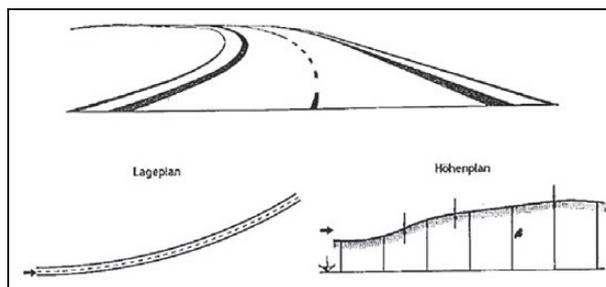


Bild 28: Abplattung (FGSV 1970)

Der Eindruck einer lageplanfremden Abbildung entsteht, wenn in der Gradiente eine kurze Wanne zwischen langen konstanten Längsneigungen angeordnet wird, wobei die Linie im Lageplan gekrümmt ist (Bild 29) (FGSV, 1970).

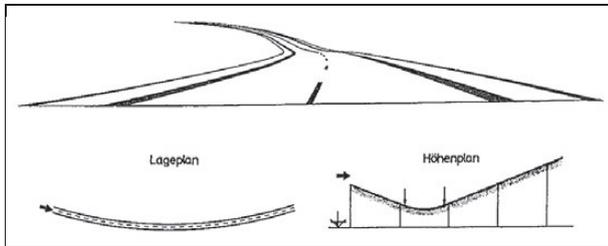


Bild 29: Lageplanfremde Abbildung (Knick im Lage- und im Höhenplan) (FGSV 1970)

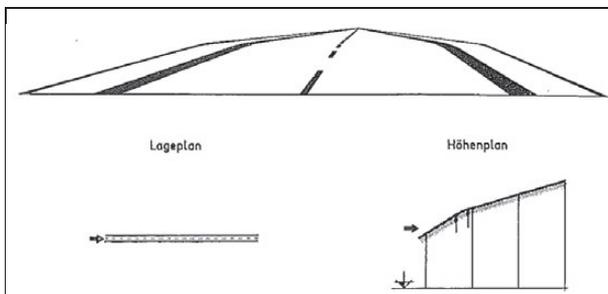


Bild 30: Knickwirkung im Höhenplan in der Kuppe (FGSV 1970)

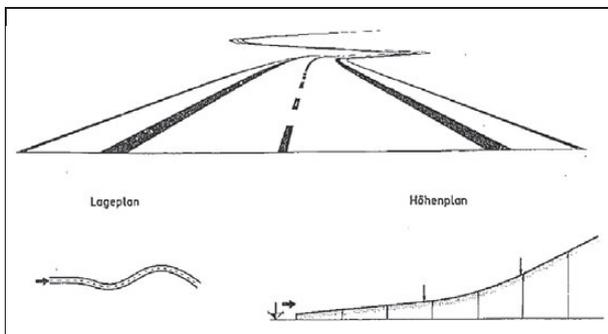


Bild 31: Schlingeln in der Trasse (FGSV 1970)

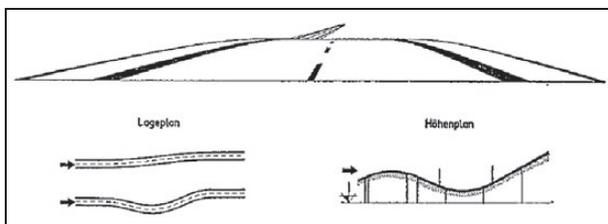


Bild 32: Springen mit Versatz (FGSV 1970)

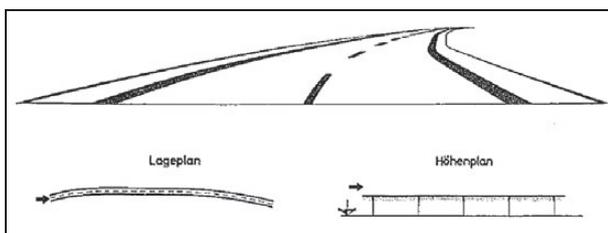


Bild 33: Kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven (FGSV 1970)

Werden im Höhenplan zu kurze Kuppenlängen gewählt, kann der Eindruck eines optischen Knickpunktes entstehen (Bild 30) (FGSV 1970).

Schlingeln entsteht, wenn im Lageplan eine größere Anzahl an Wendepunkten im Vergleich zum Höhenplan vorliegt (Bild 31) (FGSV 1970).

Die RAL-L weisen darauf hin, dass sich der Eindruck des Flatterns mit zunehmender Fahrbahnbreite verstärkt.

Eine besondere Form des Springens ist das Springen mit Versatz. Es entsteht, wenn im Lageplan und im Höhenplan zwei parallele Geraden durch eine Wendelinie verbunden sind, die dem Blick entzogen ist (Bild 32) (FGSV 1970).

Im Lageplan sind kurze Zwischengeraden zwischen zwei gleichgerichteten Kurven zu vermeiden (z. B. Bild 33). Dadurch wird der Linienfluss einer durchgehenden Kurve unterbrochen (FGSV 1970).

In die RAS-L wurden aus den RAL-L folgende Defizite übernommen:

- Knickwirkung im Lageplan und im Höhenplan in der Wanne,
- Abplattung,
- lageplanfremde Abbildung,
- verdeckter Kurvenbeginn,
- Flattern,
- Tauchen und Springen sowie
- Brettwirkung.

Ergänzend zu der aus der Forschung und der RAL-L bekannten Definition, können nach den RAS-L im Lageplan optische Knickpunkte entstehen, wenn kurze Bögen mit kleinen Tangentenlängen zwischen Geraden angeordnet werden. Weiterhin sollte ab dem Übergangsbogenanfang die Richtungsänderung mindestens  $3,5 \text{ gon}$  betragen, um verdeckte Kurvenbeginne zu vermeiden (FGSV 1995).

Im Vergleich zu den RAL-L weisen die RAS-L zusätzlich auf das Defizit Dehnung hin. Dieses wurde bereits im Kapitel 2.1.3 erläutert.

In den RAA werden ausschließlich die Defizite optischer Knickpunkt (Bild 34), Brettwirkung (Bild 35) und Flattern (Bild 36) aufgeführt.

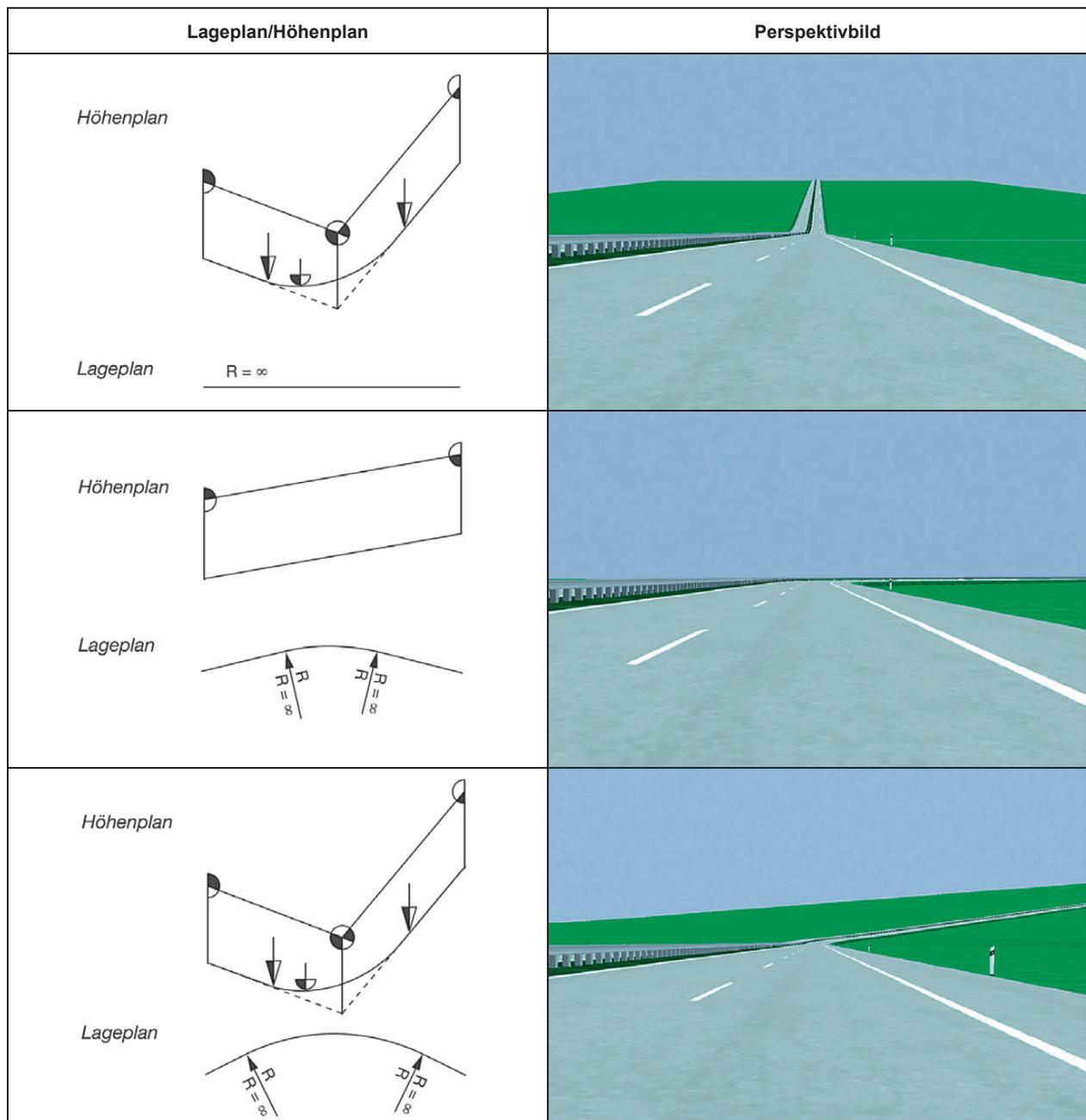


Bild 34: Optischer Knickpunkt (FGSV, 2008b)

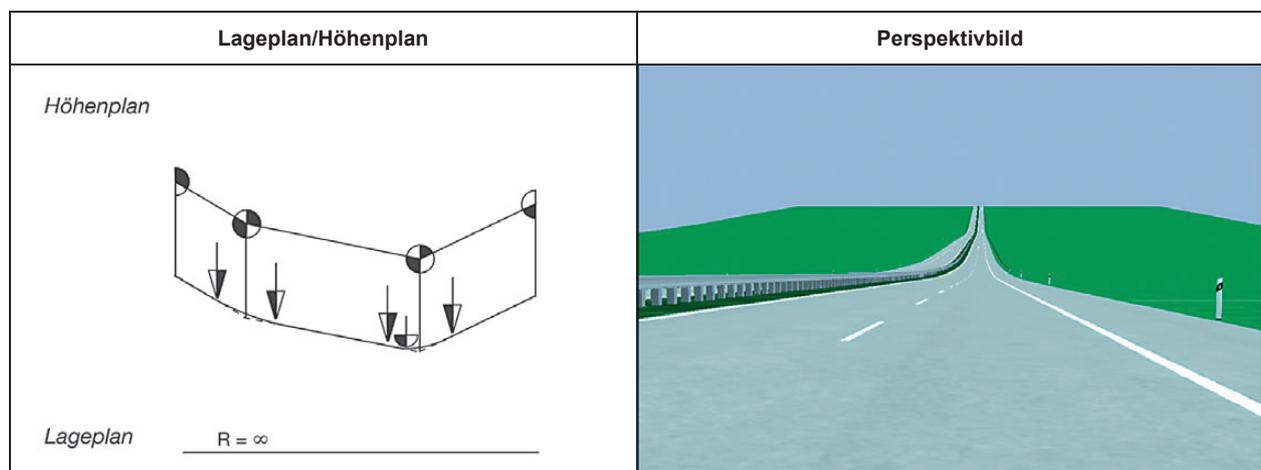


Bild 35: Brettwirkung (FGSV 2008b)

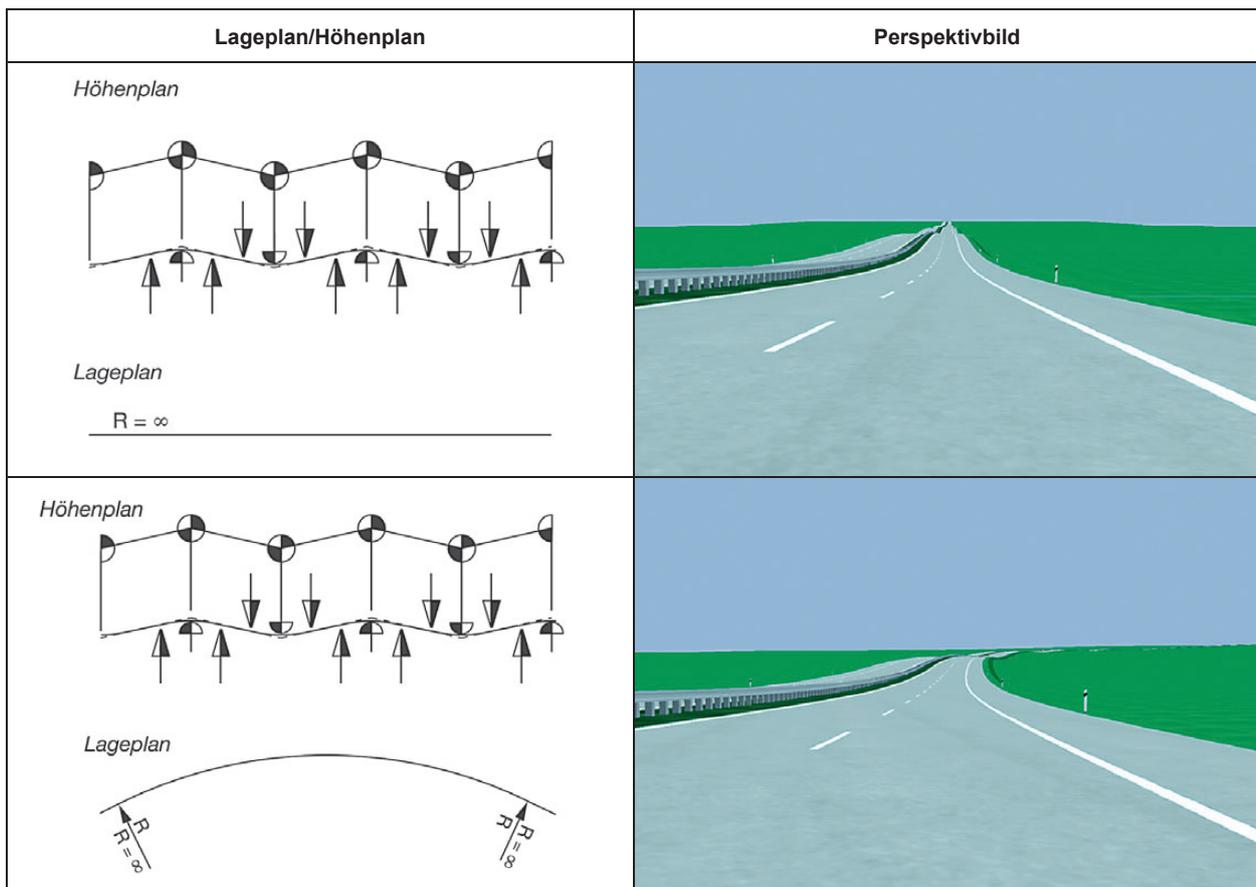


Bild 36: Flattern in der Geraden und in der Kurve (FGSV 2008b)

## 2.2.6 Bewertung und Prüfung der räumlichen Linienführung

### Nationale Regelwerke

Für die Bewertung der räumlichen Wirkung einer Straße werden nach den RAL-L, RAS-L und den RAA Raumelemente definiert (Bild 37 und Bild 38). Diese setzen sich aus jeweils einem Lageplan- und einem Höhenplanelement zusammen. Die perspektivische Wirkung der räumlichen Linienführung kann in einem ersten Schritt annähernd auf der Grundlage der Raumelemente überprüft werden. Für eine umfassende Beurteilung der räumlichen Linienführung sind jedoch die Perspektivbilder zu berücksichtigen. Als perspektivische Darstellung ist die Fahrerperspektive zu wählen (FGSV 2008b).

Für die Prüfung der räumlichen Linienführung anhand von Perspektivbildern bilden die „Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt)“ (FGSV 2008a) die Grundlage. Sie geben Hinweise, wie die räumliche Linienführung einer Straßenverkehrsanlage auf der Grundlage einer Perspektivbildfolge qualitativ überprüft werden kann. Dabei soll die räumliche Linienführung auf gestalterische und sicherheitsrelevante Defizite

kontrolliert werden. Die H ViSt weisen darauf hin, dass unter der Verwendung von Standardraumelementen<sup>2</sup> die Wahrscheinlichkeit, dass Defizite auftreten, geringer ist (FGSV 2008a).

Nach den H ViSt soll die Kontrolle der räumlichen Linienführung nach dem von KÜHN et al. (2007) entwickelten Prüfverfahren erfolgen. Dieses wurde in Kapitel 2.1.4 bereits ausführlich beschrieben. Der Ablauf des Verfahrens ist dem Bild 18 zu entnehmen.

### Internationale Regelwerke

Auch das dänische Entwurfsregelwerk behandelt die Thematik der räumlichen Linienführung. Es wird die lagegleiche Überlagerung von Krümmungsänderungen im Lage- und Höhenplan als wünschenswert erachtet. Der Überlagerung sollte die Randbedingung gesetzt werden, dass zu geringe Höhenplanhalbmesser ( $R_v$ ) bei gleichzeitigen Krümmungen im Lageplan ( $R_h$ ) nicht eindeutige Richtungsänderungen hervorrufen (Bild 39).

<sup>2</sup> „Standardraumelemente entstehen, wenn Beginn und Ende von Kurven im Lageplan mit dem Beginn von Kuppen und Wannen im Höhenplan zusammenfallen“ (FGSV 2008a, S. 11).

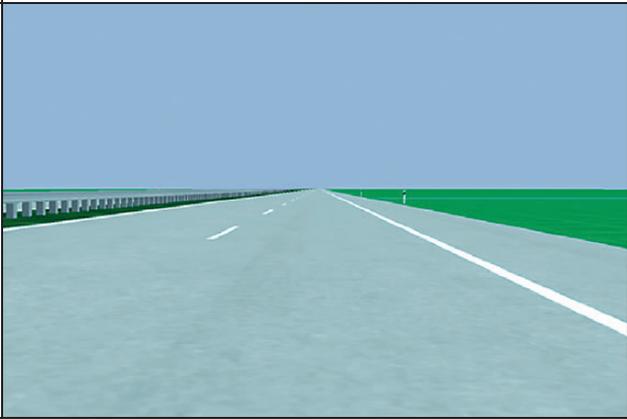
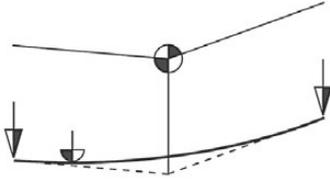
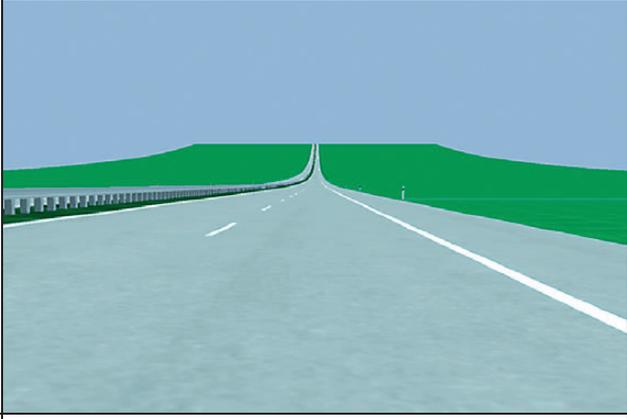
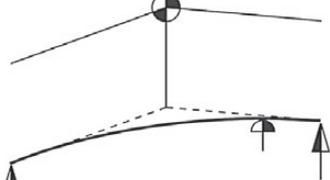
Lageplan/Höhenplan	Perspektivbild
<p style="text-align: center;">Gerade mit konstanter Längsneigung</p> <p>Höhenplan </p> <p>Lageplan <math>R = \infty</math> </p>	
<p style="text-align: center;">gerade Wanne</p> <p>Höhenplan </p> <p>Lageplan <math>R = \infty</math> </p>	
<p style="text-align: center;">gerade Kuppe</p> <p>Höhenplan </p> <p>Lageplan <math>R = \infty</math> </p>	

Bild 37: Raumelemente bei Lageplangeraden (FGSV 2008b)

Demnach stellen Verhältnisse zwischen  $R_v = 6 \cdot R_h$  und  $R_v = 8 \cdot R_h$  in Wannen eine zufriedenstellende Lösung dar. Außerdem wird ausgeführt, dass kurze, enge Wannausrundungen in Geraden verglichen mit großzügigeren Trassierungen einen veränderten optischen Eindruck hervorrufen (Bild 40).

Für die Überlagerung von Lage- und Höhenplan sollten weiterhin folgende Grundregeln berücksichtigt werden:

- Wannen erstrecken sich über einen Anteil von dreiviertel der geplanten Lageplangeraden.
- An Klothoiden sind Höhenplangeraden vorzusehen.
- Horizontale werden von vertikalen Richtungsänderungen überlagert.

Die Linienfindung sollte auch gut in das Landschaftsbild eingeordnet werden. Computersimulier-

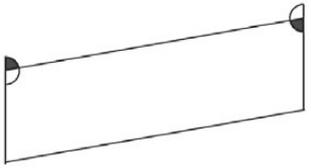
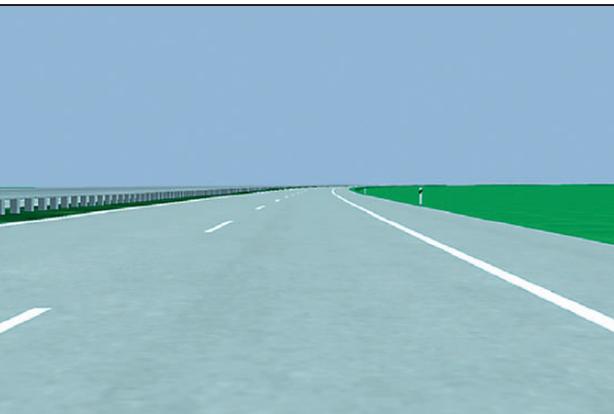
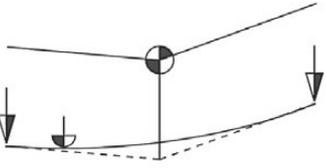
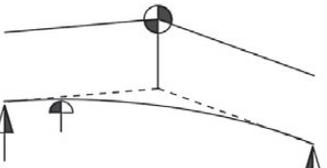
Lageplan/Höhenplan	Perspektivbild
<p data-bbox="295 324 635 353">Kurve mit konstanter Längsneigung</p> <p data-bbox="231 443 343 472">Höhenplan</p>  <p data-bbox="231 622 327 651">Lageplan</p> 	
<p data-bbox="375 788 555 817">gekrümmte Wanne</p> <p data-bbox="223 896 327 925">Höhenplan</p>  <p data-bbox="223 1086 319 1115">Lageplan</p> 	
<p data-bbox="375 1252 555 1281">gekrümmte Kuppe</p> <p data-bbox="223 1377 327 1406">Höhenplan</p>  <p data-bbox="223 1556 319 1585">Lageplan</p> 	

Bild 38: Raumelemente bei Lageplankurven (FGSV 2008b)

te Perspektivbilder können hierbei Hilfestellung geben (VEJDEKTORAT 2012).

In Österreich existieren ebenfalls Trassierungsgrundlagen, welche den Aspekt der räumlichen Linienführung behandeln. Anhand perspektivischer Darstellungen sollen Mängel erkennbar werden. Einschränkungen der Verkehrssicherheit und Verkehrsqualität sowie gestalterische Mängel, welche

durch eine unzureichende räumliche Führung hervorgerufen werden, sollen somit weitestgehend vermieden werden (FSV, 2001). Folgende Defizite können dieser Zielstellung entgegenwirken:

- unausgewogene aufeinanderfolgende Kreisbögen des Lageplans,
- Geraden zwischen gleichgerichteten Lageplankurvenradien,

- optische Knickwirkungen kleiner Lageplanradien bzw. Wannenhalmesser,
- Abschnitte konstanter Längsneigung zwischen zwei Wannenn,
- Flattern sowie
- Tauchen und Springen.

Durch angeordnete Bepflanzung ist eine Verstärkung der Linienführung möglich (FSV, 2001).

In den USA gilt das Entwurfsregelwerk „A Policy on Geometric Design of Highways and Streets“. Neben Ausführungen zum Querschnitt und zur Linienführung im Lage- und Höhenplan werden auch qualitative Anforderungen an dessen Überlagerung gegeben. Demnach sind die Lage- und die Höhenplantrassierung in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander herzustellen, hügelige Abschnitte kombiniert mit langen Geraden zeugen demnach von einem unzureichenden Entwurf. Außerdem werden Kreisbögen in Kuppenlage eine sicherheitsmindernde Wirkung zugeschrieben, insbesondere bei Nacht. Im Vorfeld von Steigungsstrecken sollten keine Kreisbögen mit geringem Kurvenradius angeordnet werden, da verkürzte Sichtbedingungen erwartet werden müssen (AA-AHSTO, 2001).

### 2.2.7 Sichtweiten

Nach den RAA ist für die Gewährleistung der Verkehrssicherheit und der Verkehrsqualität u. a. die Einhaltung der Haltesichtweite erforderlich. Diese ermöglicht dem Fahrer, jederzeit und rechtzeitig bei Gefahr vor einem Hindernis anhalten zu können. Die RAA definieren erforderliche Haltesichtweiten. Diese entsprechen der Strecke, die ein Fahrer benötigt, um vor einem unerwarteten Hindernis auf nasser Fahrbahn rechtzeitig anhalten zu können (FGSV 2008b). Die erforderlichen Haltesichtweiten sind von der Längsneigung und der Geschwindigkeit abhängig (Bild 41).

### 2.2.8 Auswerten von Straßenverkehrsunfällen

Für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen sind Kenntnisse über die wichtigsten Eigenschaften der Unfälle erforderlich. Zu diesen zählen z. B. die Unfallkategorie und der Unfalltyp. Für die Beschreibung und den Vergleich des Unfallgeschehens auf Streckenabschnitten werden weiterhin Angaben zu den Unfallkenngrößen benötigt.

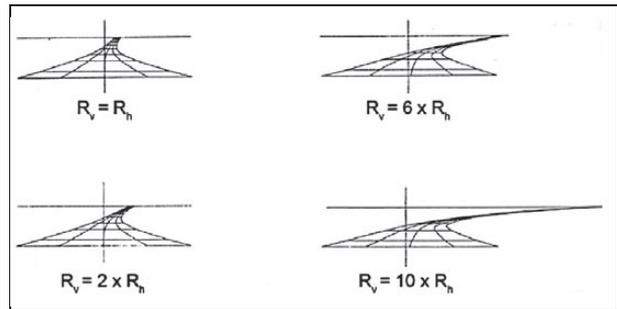


Bild 39: Darstellung der Verhältnisse von  $R_v$  zu  $R_h$  (Vejdirektoratet, 2012)

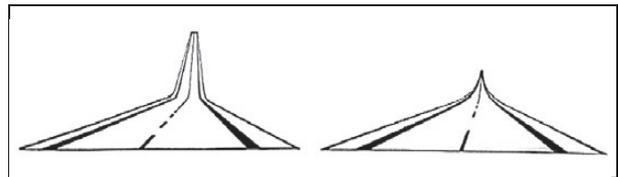


Bild 40: Knick an kurzer (links) verglichen mit langer (rechts) Wannenausrundung (Vejdirektoratet 2012)

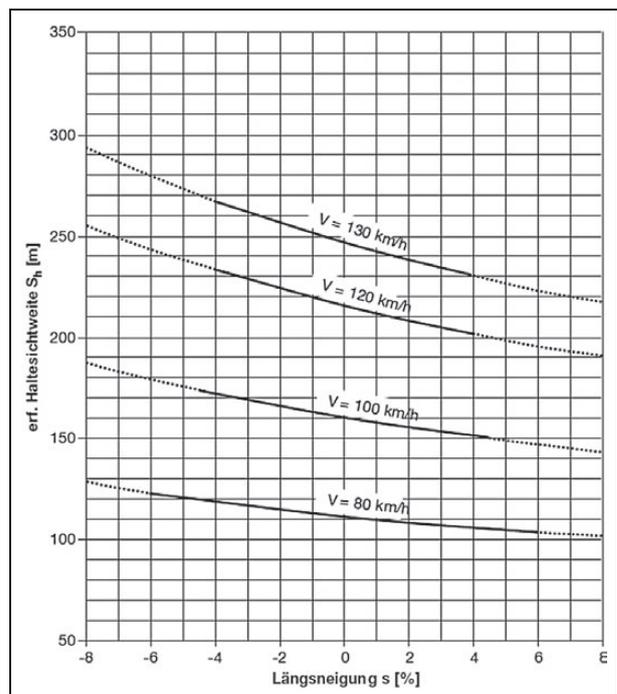


Bild 41: Erforderliche Haltesichtweite nach den RAA (FGSV 2008b)

### Unfallkategorie

Die Unfallkategorie ergibt sich nach der schwersten Unfallfolge, die ein Beteiligter aufgrund des Unfalls erlitten hat oder bei einem Unfall mit Sachschaden nach dem Straftatbestand. Es werden sechs Unfallkategorien unterschieden, welche bundesweit einheitlich sind (Tabelle 8) (FGSV 2012a).

### Unfalltyp

Unter dem Unfalltyp wird die Konfliktsituation verstanden, in deren Folge es zum Unfall gekommen ist (FGSV 2012a). Es können sieben Unfalltypen

Unfall-kategorie	schwerste Unfallfolge	Beschreibung
1	Unfall mit Getöteten U(GT)	mindestens ein getöteter Verkehrsteilnehmer
2	Unfall mit Schwerverletzten U(SV)	mindestens ein schwerverletzter Verkehrsteilnehmer, aber keine Getöteten
3	Unfall mit Leichtverletzten U(LV)	mindestens ein leichtverletzter Verkehrsteilnehmer, aber keine Getöteten und Schwerverletzten
4	schwerwiegender Unfall mit Sachschaden U(SS)	Unfälle mit Sachschaden und Strafbestand oder Ordnungswidrigkeitsanzeige, bei denen mindestens ein Kraftfahrzeug nicht mehr fahrbereit ist
5	sonstiger Unfall mit Sachschaden U(LS)	Sachschadenunfälle mit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Strafbestand oder Ordnungswidrigkeitsanzeige ohne Einfluss berauschender Mittel, bei denen alle Kraftfahrzeuge fahrbereit sind</li> <li>• lediglich geringfügiger Ordnungswidrigkeit (Verwarnung), unabhängig, ob Kraftfahrzeug fahrbereit oder nicht fahrbereit</li> </ul>
6	schwerwiegender Unfall mit Sachschaden U(SS)	alle übrigen Sachschadenunfälle unter Einfluss berauschender Mittel

Tab. 8: Unfallkategorien (nach FGSV 2012a)

Nummer	Bezeichnung
1	Fahrerunfall (F)
2	Abbiege-Unfall (AB)
3	Einbiegen/Kreuzen-Unfall (EK)
4	Überschreiten-Unfall (ÜS)
5	Unfall durch ruhenden Verkehr (RV)
6	Unfall im Längsverkehr (LV)
7	Sonstiger Unfall (SO)

Tab. 9: Unfalltypen (nach FGSV 2012a)

unterschieden werden (Tabelle 9). Eine Kurzbeschreibung der Unfalltypen ist dem Anhang 3 zu entnehmen.

### Unfallkenngrößen

Für die Beschreibung und den Vergleich des Unfallgeschehens auf Streckenabschnitten können Absolutzahlen (z. B. Anzahl der Unfälle) als auch relative Kenngrößen verwendet werden. Absolutzahlen beziehen sich in der Regel auf regional, örtlich und zeitlich abgegrenzte Bereiche. Anhand dieser können Aussagen über die Struktur des Unfallgeschehens getroffen werden. Für die Bewertung des Unfallgeschehens werden Unfallkenngrößen bestimmt (FGSV 2003).

Als Unfallkenngrößen werden vor allem Dichten und Raten ermittelt. Die Dichten beschreiben die Häufigkeit der Unfälle bzw. der dabei entstandenen Kosten, die sich während eines Betrachtungszeitraumes auf einem Streckenabschnitt ereigneten. Sie werden über das Verhältnis der Absolutzahlen des Unfallgeschehens eines Betrachtungszeitraumes zu der Länge des betrachteten Straßenbe-

reichs berechnet. Im Allgemeinen werden Unfalldichten (UD) und Unfallkostendichten (UKD) betrachtet. Über die Unfalldichte wird die durchschnittliche Anzahl an Unfällen, die auf 1 km Streckenlänge in einem Betrachtungszeitraum entfallen, beschrieben (FGSV 2003):

$$UD = \frac{U}{L \times t} \left[ \frac{U}{km \times a} \right] \quad \text{Gl. 2}$$

U Anzahl der Unfälle [U]

L Länge des Streckenabschnittes [km]

t Betrachtungszeitraum [a]

Die Unfallkostendichte gibt die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten an, die auf 1 km Streckenlänge durch Straßenverkehrsunfälle entstanden sind (FGSV 2003):

$$UKD = \frac{UK}{1000 \times L \times t} \left[ \frac{1000 \text{ €}}{km \times a} \right] \quad \text{Gl. 3}$$

UK Unfallkosten [€]

L Länge des Streckenabschnittes [km]

t Betrachtungszeitraum [a]

Die Rate ist ein Maß für das Risiko eines Verkehrsteilnehmers, einen Unfall zu erleiden oder dabei zu verunglücken. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen den Absolutzahlen des Unfallgeschehens und der zugehörigen Fahrleistung. In der Regel werden Unfallraten (UR) und Unfallkostenraten (UKR) ermittelt. Die Unfallraten geben die durch-

schnittliche Anzahl der Unfälle an, die in einem Streckenabschnitt auf eine Fahrleistung von 1 Mio. Kfz × km entfallen (FGSV 2003):

$$UR = \frac{10^6 \times U}{365 \times DTV \times L \times t} \left[ \frac{U}{10^6 \text{ Kfz} \times \text{km}} \right] \quad \text{Gl. 4}$$

U Anzahl der Unfälle [U]

DTV durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke  
 $\left[ \frac{\text{Kfz}}{24 \text{ h}} \right]$

L Länge des Streckenabschnittes [km]

t Betrachtungszeitraum [h]

Die Unfallkostenraten bewerten das Unfallrisiko anhand der Unfallfolgen. Sie beschreiben die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten, die bei einer Fahrleistung von 1000 Kfz × km auf einem Streckenabschnitt durch Straßenverkehrsunfälle entstanden sind (FGSV 2003):

$$UKR = \frac{1000 \times UK}{365 \times DTV \times L \times t} \left[ \frac{\text{€}}{1000 \text{ Kfz} \times \text{km}} \right] \quad \text{Gl. 5}$$

UK Unfallkosten [€]

DTV durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke  
 $\left[ \frac{\text{Kfz}}{24 \text{ h}} \right]$

L Länge des Streckenabschnittes [km]

t Betrachtungszeitraum [h]

Die in den Unfallkostendichten und -raten enthaltenen Unfallkosten (UK) fassen die Anzahl und die Schwere der Unfälle zusammen (FGSV 2012a):

$$UK = n_u \times KS_u \quad \text{Gl. 6}$$

$n_u$  Anzahl der Unfälle

$KS_u$  Unfallkostensatz

Die Unfallkosten messen die volkswirtschaftlichen Verluste, die durch Straßenverkehrsunfälle entstanden sind (FGSV 2003).

## 2.3 Zusammenfassung der Literaturanalyse

Der Entwurf einer Straße erfolgt getrennt nach Querschnitt, Lageplan und Höhenplan. Der Fahrer nimmt jedoch das räumliche Ergebnis der Überlagerung wahr, wobei die Informationsaufnahme vorrangig optisch erfolgt. Eine gute optische Führung der Straße ist daher Voraussetzung für eine ausreichende Fahrsicherheit. Dabei genügen geometrisch fehlerfrei entworfene Lage- und Höhenpläne nicht zwangsläufig den Anforderungen an eine gute räumliche Linienführung. Daher ist diese auf Defizite zu kontrollieren.

Aus der Literaturanalyse geht hervor, dass Defizite in der räumlichen Linienführung vermieden werden können, wenn die Anzahl und die Lage der Wendepunkte der Krümmungen im Lage- und im Höhenplan annähernd übereinstimmen.

Aus der Analyse der Ergebnisse von vorangegangenen Untersuchungen und der Regelwerke gehen zahlreiche Defizite hervor, die in der räumlichen Linienführung einer Straße auftreten können. Für die weiteren Untersuchungen sind dabei folgende sicherheitsrelevante Defizite von Bedeutung:

- Sichtschatten (Tauchen, Springen und Springen mit Versatz),
- Dehnung und Stauchung sowie
- verdeckter Kurvenbeginn.

Weiterhin sind für die weiteren Betrachtungen folgende gestalterische Defizite relevant:

- Knickwirkung im Lageplan,
- Knickwirkung im Höhenplan in der Wanne und in der Kuppe,
- Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan (lageplanfremde Abbildung),
- Brettwirkung,
- kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven,
- Flattern,
- Verzerrung der Längsneigung,
- Aufwölbung und Abplattung sowie
- Schlängeln.

Der Widerspruch zwischen Straße und Umfeld wird im Folgenden nicht betrachtet, da angenommen wird, dass dieses Defizit auf Autobahnen aufgrund von deren Gestaltungsmerkmalen nicht auftreten kann.

Aus der Literatur gehen zahlreiche qualitative und quantitative Verfahren hervor, um die räumliche Linienführung von Landstraßen zu kontrollieren und auf Defizite zu untersuchen. Die räumliche Linienführung von Autobahnen wird derzeit anhand von den nach RAA definierten Raumelementen überprüft. Eine umfassende Kontrolle soll nach den RAA jedoch über Perspektivbilder erfolgen. Sie weisen dabei auf das in den H ViSt aufgeführte Prüfverfahren hin. Dies wurde jedoch auf der Grundlage von Landstraßen erarbeitet. Bei Autobahnen sind dabei insbesondere evtl. auftretende Sichtschatten anders zu bewerten, da die Hauptgefahr der Vortäuschung eines zum Überholen im Fahrstreifen des Gegenverkehrs freien voraus liegenden Fahrraums auf Autobahnen nicht relevant ist. Verdeckte Kurvenbeginne können jedoch gerade bei Autobahnen mit ihren häufig sehr langen Kuppenausrundungen auftreten. Es ist zu vermuten, dass zumindest die bislang in den H ViSt verankerten landstraßenbezogenen Vorausorientierungen hinterfragt werden müssen. Daher liegt es nahe, diese bereits bewährten Prüfkriterien auch bei Autobahnen weiter zu verfolgen. Bereits in ZIMMERMANN (2001) wurde u. a. für die Beurteilung von Verzerrungen durch ungünstige Verhältnisse von Lage- und Höhenplanparametern das Prüfkriterium der relativen sichtbaren Fahrbahnoberfläche entwickelt. Bei der Erstellung der H ViSt wurde dieses Prüfkriterium nicht übernommen, u. a. weil es eine deutlich geringere physisch belegte Objektivität aufweist als die Kriterien, die sich auf die Sichtschattentiefe beziehen, und das fundamental neue Prüfverfahren nicht überfrachtet werden sollte. Außerdem wurde den Defiziten aus Sichtverzerrungen auch in den RAL eine geringere Sicherheitsrelevanz zugeordnet als Sichtschatten-defiziten. Die prinzipielle Tauglichkeit dieses Kriteriums wurde jedoch weder in den Forschungsvorhaben von ZIMMERMANN et al. (2006) bzw. von KÜHN et al. (2007) in Frage gestellt. Insbesondere beim Ausbau von Autobahnen im bewegten Gelände unter Nutzung bestehender Trassen können sich Konstellationen ergeben, in denen z. B. durch die Vergrößerung von Lageplanradien bei topographisch bedingt geringen Wannenausrundungen Sichtverzerrungen entstehen, die zu Überschätzun-

gen der Lageplanradien und damit der fahrbaren Geschwindigkeit führen können.

Im Ergebnis der Literaturanalyse hat sich für die Untersuchungen zur räumlichen Linienführung von Autobahnen die von ZIMMERMANN (2001) und ZIMMERMANN et al. (2006) erarbeitete quantitative Bewertungsmethode als geeignetste herausgestellt. Diese Methode entspricht dem aktuellen Stand der Forschung. Weiterhin werden die Bewertungskriterien, wie von den RAA gefordert, auf der Grundlage von Perspektivbildern erarbeitet. Die Bewertungsmethode wurde jedoch für Landstraßen erarbeitet. Daher muss diese für die folgenden Untersuchungen auf die Bewertung der räumlichen Linienführung von Autobahnen angepasst werden. Für die Untersuchungen zu den gestalterischen Defiziten in der räumlichen Linienführung haben sich zudem für die Ermittlung der Rangreihe der Perspektivbilder der Dominanzpaarvergleich und für die Ermittlung der Grenzwerte der Defizite das Staircase-Verfahren als am geeignetsten herausgestellt.

### 3 Ziel der Untersuchung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die räumliche Linienführung von Autobahnen umfassend untersucht. Dabei sollte ein Verfahren zum sicheren Entwurf, zur Bewertung und zur Kontrolle der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf der Grundlage von quantitativen Parametern entwickelt werden. Dafür sollten als Grundlage messbare Größen für die Defizite der räumlichen Linienführung erfasst bzw. festgelegt werden. Anschließend sollten ihre Grenzwerte ermittelt werden. Anhand des Unfallgeschehens auf ausgewählten Strecken wurde geprüft, ob die Defizite sicherheitsrelevant sind.

Darauf aufbauend sollte eine Methodik entwickelt werden, die planerische Vorgaben zur Verwendung von Standardraumelementen, die zuvor geprüften quantitativen Parameter sowie die aus entwurfs-technischen Vorgaben abgeleiteten und die im Perspektivbild erkennbaren gestalterischen Defizite zusammenführt. Anhand dieser sollten Entwurfsvorgaben für die Gewährleistung einer verkehrssicheren und einer ästhetisch befriedigenden räumlichen Linienführung für Autobahnen abgeleitet werden. Diese Vorgaben sollten als Textvorschlag für die Übernahme in die RAA bei einer späteren Fortschreibung aufgearbeitet werden. Des Weiteren

war zu prüfen, ob die in der Methodik integrierten Prüfschritte in die H ViSt übernommen werden sollten.

Im Ergebnis der Untersuchungen sollten vor allem folgende Fragen beantwortet werden:

- Treten bei Einhaltung und Überlagerung der Mindestwerte im Lage- und Höhenplan nach RAA die aus dem Regelwerk bekannten ästhetischen und / oder sicherheitsrelevanten Defizite auf?
- Führen diese Defizite zu Auffälligkeiten im Unfallgeschehen?
- Treten Defizite in der räumlichen Linienführung beim Neubau mit Einhaltung des Regelwerkes sowie beim Um- und Ausbau mit Restriktionen in unterschiedlichem Maße auf?
- Sind die qualitativen Entwurfsvorgaben unter Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA zu ändern, um Defizite in der räumlichen Linienführung zu vermeiden?
- Können die qualitativen Entwurfsvorgaben unter Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA mit quantitativen Werten ergänzt und präzisiert werden, um solche Defizite in der räumlichen Linienführung zu vermeiden?
- Kann ein allgemeingültiges Prüfverfahren zur Bewertung von Planungen und zur Prüfung der räumlichen Linienführung in das Regelwerk übernommen werden?

## 4 Untersuchungsmethodik

Das Forschungsvorhaben wurde nach der in Bild 42 gezeigten Untersuchungsmethodik bearbeitet:

Zunächst wurde eine umfassende Literaturanalyse durchgeführt.

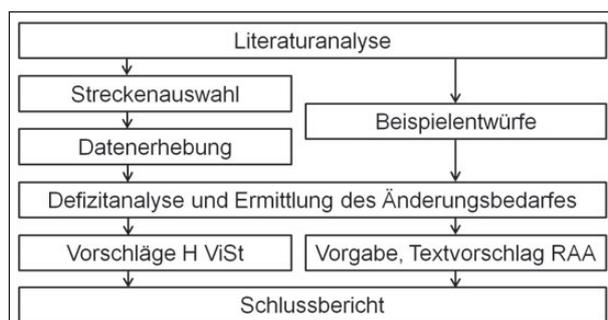


Bild 42: Untersuchungsmethodik

Ein Ziel der Untersuchung war es, zu prüfen, in welchem Umfang und unter welchen Randbedingungen Defizite in der räumlichen Linienführung auf Autobahnen auftreten und ob diese sicherheitsrelevant sind. Daher wurden u.a. Bestandsstrecken auf Defizite in ihrer räumlichen Linienführung untersucht. Dazu wurden aus dem Autobahnnetz geeignete Streckenzüge ausgewählt. Anhand der Untersuchungsstrecken wurden auch die Kriterien überprüft, die zur Kontrolle der räumlichen Linienführung entwickelt werden sollten. Für die Auswahl der Untersuchungsstrecken wurden nach bestimmten Kriterien Untersuchungsstrecken ausgewählt und deren Gestaltungsmerkmale sowie deren Unfalldaten erhoben. Die Unfalldaten dienten dabei zur Identifikation von sicherheitsrelevanten Defiziten, da das Unfallgeschehen ein bewährter Indikator für eine fehlerhafte Straßenverkehrsanlage ist.

Parallel dazu erfolgte die Erstellung von virtuellen Untersuchungsstrecken. Mit deren Hilfe sollten iterativ Grenzwerte ermittelt werden, ab wann Defizite in der räumlichen Linienführung auftreten.

Auf der Grundlage der realen und der virtuellen Untersuchungsstrecken wurden die Defizite in der räumlichen Linienführung von Autobahnen analysiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde anschließend der Änderungsbedarf für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA und des in den H ViSt aufgeführten Prüfverfahrens für Landstraßen ermittelt.

Darauf aufbauend wurde ein Textvorschlag für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA erarbeitet. Des Weiteren wurden für die H ViSt Prüfschritte hinsichtlich der räumlichen Linienführung von Autobahnen vorgeschlagen.

### 4.1 Streckenauswahl

Für die Analyse von Bestandsstrecken auf Defizite in der räumlichen Linienführung mussten zunächst aus dem Autobahnnetz Deutschlands geeignete Streckenzüge ausgewählt werden. Das Kollektiv sollte dabei aus Untersuchungsstrecken bestehen, die Defizite in der räumlichen Linienführung aufweisen (Defizitstrecken), und aus Untersuchungsstrecken, bei denen keine Defizite in der räumlichen Linienführung vorliegen (Vergleichsstrecken). Die Vergleichsstrecken sollten eine räumlich regelgerechte Trassierung aufweisen. Sie dienten zur Prüfung, ob Autobahnen, die nach den Festlegungen der Entwurfsrichtlinien geplant wurden, weniger

bzw. keine Defizite in der räumlichen Linienführung und somit auch weniger Unfälle aufweisen. Die Vergleichsstrecken sollten in der Nähe der restlichen Untersuchungsstrecken liegen, um unter anderem eine Vergleichbarkeit der Fahrzeugkollektive und der sonstigen Randbedingungen gewährleisten zu können.

Der Umfang des Streckenkollektives hing u. a. von der Häufigkeit der vorgefundenen Defizite ab. Um einen ausreichenden Stichprobenumfang an Defiziten und Vergleichsstrecken zu erhalten, wurden mindestens 1.000 km Autobahn ausgewählt.

Defizite in der räumlichen Linienführung wurden bei Strecken in bewegtem Gelände und bei Autobahnen, die vor dem Jahr 1940 fertiggestellt wurden, erwartet. Daher wurden die Untersuchungsstrecken nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Querschnitt: zweibahnig, vier- und sechsstreifig,
- Fertigstellung: bis zum Jahr 1940,
- Topographie: bewegtes Gelände,
- Variation der Defizite in der räumlichen Linienführung (sicherheitsrelevante und gestalterische Defizite),
- guter Zustand der Fahrbahnoberfläche (keine Beeinflussung des Fahrverhaltens durch schlechte Oberflächenbeschaffenheit),
- keine Geschwindigkeitsbeschränkungen (freie Geschwindigkeitsentwicklung möglich),
- Vergleichsstrecken: regelgerechte Strecken und
- gleiche / ähnliche Streckencharakteristik der Vergleichsstrecken im Vergleich zu den Defizitstrecken.

## 4.2 Datenerhebung

Aus den Forschungsvorhaben von LIPPOLD et al. (2010) und LIPPOLD et al. (2011) lagen bereits umfangreiche Strecken- und Unfalldaten von Bundesautobahnen vor. Diese konnten weitgehend genutzt werden. Einige Daten mussten jedoch aktualisiert bzw. um weitere Streckendaten ergänzt werden.

### 4.2.1 Streckengeometrie

Lagen für eine ausgewählte Untersuchungsstrecke die Trassierungsmerkmale noch nicht vor, wurden



Bild 43: Messfahrzeug UNO

diese über Streckenbefahrungen erhoben. Dies erfolgte mit dem Messfahrzeug UNO des Lehrstuhls „Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen“ der Technischen Universität Dresden (Bild 43).

Das Messfahrzeug verfügt unter anderem über ein satellitengestütztes Positionierungssystem (Applanix POS LV 610). Dieses setzt sich aus zwei GPS-Receivern, einem Inertialsystem, einer Prozesseinheit und einem Wegstreckensensor zusammen. Das System kann auch bei GPS-Ausfällen von bis zu 5 Minuten eine genaue Positionsbestimmung gewährleisten. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung beträgt unter optimalen Voraussetzungen 1 dm.

Weiterhin ist das Messfahrzeug mit einem Stereo-Frontkamerasystem ausgestattet. Dieses besteht aus zwei Punlnix-CCD-Kameras, welche eine Auflösung von 4 Megapixeln besitzen. Über diese Kameras kann der gesamte Fahrraum vor dem Fahrzeug erfasst werden. Dabei werden weg- oder zeitbezogen synchron Bilder von dem Fahrraum aufgenommen. Die Kameras sind photogrammetrisch kalibriert und eignen sich somit zur relativen Objektvermessung mit absolutem Koordinatenbezug.

Für die exakte Bestimmung der Trassierungsparameter wurden die Strecken auf jeder Richtungsfahrbahn zweimal befahren (linker Fahrstreifen und rechter Fahrstreifen). Über ein Postprocessing wurde durch das Einrechnen von Korrekturdaten die Positionierungsgenauigkeit verbessert. Im Ergebnis lagen die Fahrbahnrandpunkte in einem Abstand von 1 m vor. Nachfolgend wurden alle Messdaten in eine Datenbank importiert und über die GPS-Zeit synchronisiert. Im Ergebnis wurde eine Fahrbahnmittellinie aus den Fahrbahnrandlinien je Richtungsfahrbahn generiert. Diese bildete die Grundlage für die Nachtrassierung. Die Nachtrassierung erfolgte mit dem Straßenentwurfsprogramm CARD/1. Die Lage- und Höhenplandaten wurden inklusive der aufgenommenen Bilder über das Programm Road-

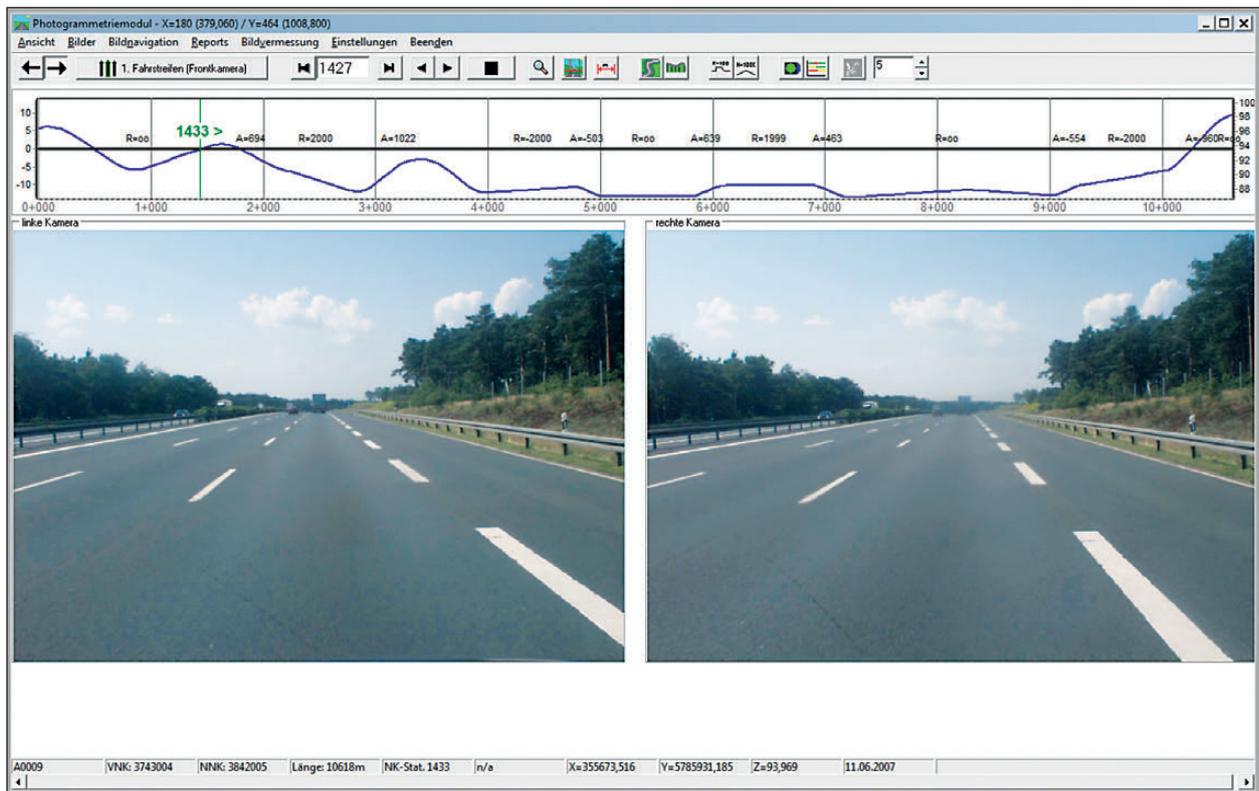


Bild 44: Ansicht aus dem Programm RoadView

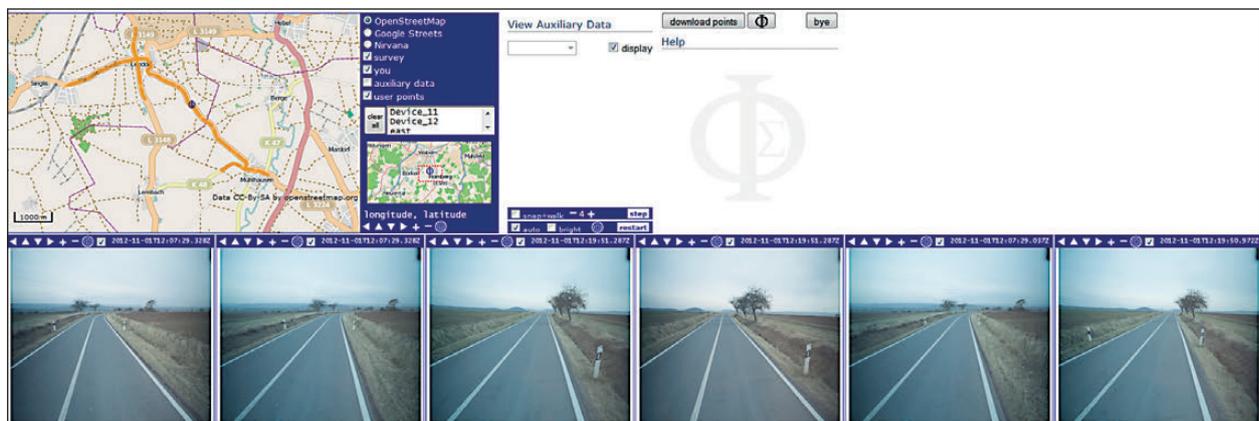


Bild 45: Ansicht aus dem Programm Phoros

View (Bild 44) und über die photogrammetrische Vermessungssoftware „Phoros“ (Bild 45) visualisiert, welche der Lehrstuhl Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen der Technischen Universität Dresden entwickelte.

#### 4.2.2 Unfalldaten

Waren die bereits vorhandenen Unfalldaten veraltet und mussten aktualisiert werden oder lagen sie für die ausgewählten Untersuchungsstrecken noch nicht vor, wurden sie bei den zuständigen Ämtern abgefragt.

### 4.3 Beispielentwürfe

Neben der Untersuchung von realen Bestandsstrecken sollten auch mit Hilfe des Straßenentwurfsprogramms CARD/1 virtuelle Strecken erzeugt werden. Dabei war es zweckmäßig, Linienführungen zu erarbeiten, die die Untersuchungsstrecken realitätsnah abbilden, die aber auch die Variation der vermuteten Bewertungskriterien erlauben. Das Ziel dabei war, iterativ Grenzwerte zu ermitteln, wann und unter welchen Randbedingungen Defizite in der räumlichen Linienführung auftreten. Demnach sollten Abgrenzungen zwischen den verschiedenen Ausprägungen von Defiziten erarbeitet werden, die sich auch quantitativ belegen lassen.

Im Zuge der Streckentrassierung wurden dafür einzelne Entwurfselemente unter Konstanthaltung der anderen Entwurfselemente so lange verändert, bis sich Defizite einstellten bzw. bis Defizite nicht mehr auftraten. Dabei wurde zudem überprüft, ob und in welchem Maße Defizite bei Einhaltung der Mindestwerte der Entwurfselemente nach den RAA oder erst nach der Unterschreitung der Mindestwerte auftreten.

In der Untersuchung wurden bei den sicherheitsrelevanten Defiziten unter anderem folgende erzeugt:

- Sichtschatten (Tauchen, Springen und Springen mit Versatz),
- Dehnung und Stauchung sowie
- verdeckter Kurvenbeginn.

Weiterhin wurden unter anderem folgende gestalterische Defizite untersucht:

- Knickwirkung im Lageplan,
- Knickwirkung im Höhenplan in der Wanne und in der Kuppe,
- Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan,
- Brettwirkung,
- kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven,
- Flattern,
- Verzerrung der Längsneigung,
- Aufwölbung und Abplattung sowie
- Schlängeln.

#### 4.3.1 Sicherheitsrelevante Defizite

##### Verdeckter Kurvenbeginn

Befindet sich in Fahrtrichtung der Beginn einer Kurve im Lageplan hinter dem Hochpunkt einer Kuppe im Höhenplan, liegt ein verdeckter Kurvenbeginn vor. Daher sind für die Erstellung der Beispielentwürfe folgende Entwurfselemente maßgebend:

- Lageplan:
- Gerade und
- Kreisbogen (Länge und Größe des Radius, Rechts- oder Linkskurve, Beginn des Kreisbogens bzgl. des Hochpunktes).
- Höhenplan:

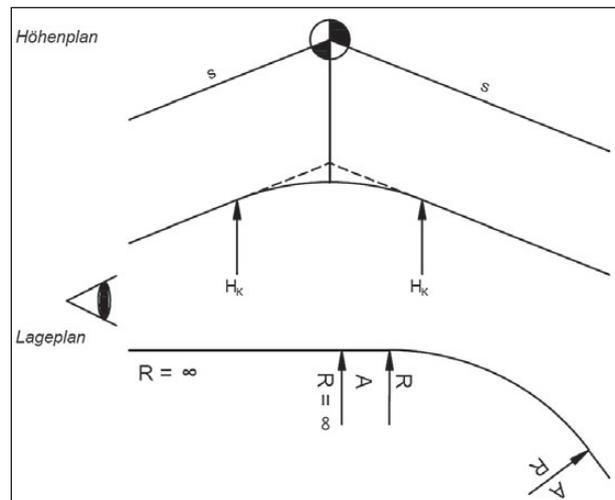


Bild 46: Entwurfselemente des verdeckten Kurvenbeginns

- Kuppenhalbmesser bzw. Tangentenlänge und
- Längsneigungsdifferenz.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Bild 46 verdeutlicht die Überlagerung der Entwurfselemente beim verdeckten Kurvenbeginn.

##### Sichtschatten

Treten in der räumlichen Linienführung Sichtschatten auf, kann in den Streckenabschnitten Tauchen oder Springen vorkommen. Für den Fahrzeugführer ist dabei der Streckenverlauf im Nahbereich nicht einsehbar und erst im Fernbereich wieder erkennbar. Es kommt zum Tauchen, wenn ausschließlich Teilstrecken eines Streckenabschnittes im Sichtschatten liegen. Springen tritt auf, wenn innerhalb des nicht einsehbaren Bereiches zusätzlich Lageplankrümmungsänderungen vorliegen (ZIMMERMANN, 2001). Sind in der Achse und in der Gradienten zwei parallele Geraden durch eine Wendelinie verbunden, die nicht einsehbar ist, liegt eine besondere Form des Springens vor, nämlich das Springen mit Versatz (FGSV 1970).

Für Landstraßen wird in den RAL zusätzlich ein kritischer Sichtschattenbereich definiert. Dieser tritt auf, wenn im Nahbereich das Fahrbahnband über eine Länge von mehr als 75 m verdeckt wird und in weniger als 600 m wieder erkennbar ist sowie der Sichtschattenbereich mehr als 0,75 m tief ist (FGSV 2012b). Für die Untersuchungen zum Sichtschatten wurden auf den erstellten Strecken Sichtweitenberechnungen mit CARD/1 durchgeführt. Diesen liegt u. a. die Definition der kritischen Sichtschatten nach den RAL zugrunde. Es wurde die Übertragbarkeit der angenommenen Parameter auf Autobahnen überprüft.

Die Annahme, dass das Fahrbahnband im Nahbereich über eine Länge von mehr als 75 m verdeckt sein soll ist darin begründet, dass kurze Ausdehnungen von Sichtschattenbereichen eher unkritisch sind. Es wird davon ausgegangen, dass Fahrerentscheidungen nicht auf der Grundlage eines flüchtigen Blickes getroffen werden. Die 75 m entsprechen auch der Grenze zwischen den Zonen „Bereitschaft und Entscheidung“ sowie „Nahorientierung und Handlung“ nach LEUTNER (1974) (Kapitel 2.1.5). Diese Annahme greift unabhängig von der Kategoriengruppe einer Straße und kann auf Autobahnen übertragen werden.

Das Fahrbahnband soll innerhalb von 600 m wieder erkennbar sein. Dieser Wert steht mit der Fernorientierung und der Informationsaufnahme des Fahr-

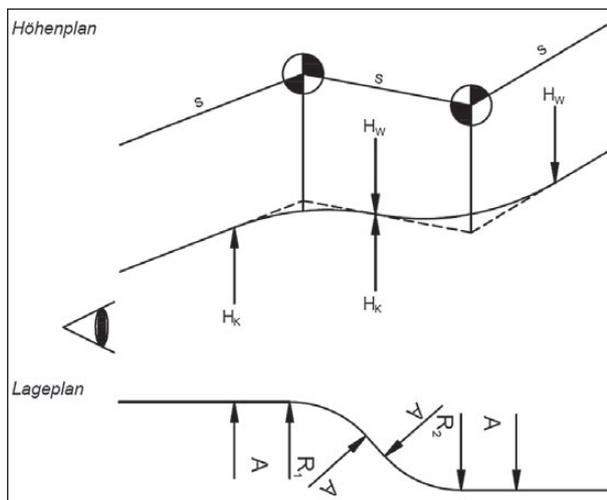


Bild 47: Entwurfselemente des Springens mit Versatz

zeugführers im Zusammenhang. Nach LEUTNER (1974) erfolgt dies bis zu einer Entfernung von 600 m (Kapitel 2.1.5). Diese Annahme hängt somit auch nicht von der Kategoriengruppe einer Straße ab und kann auch auf Autobahnen übertragen werden.

Nach den RAA reicht auf Kuppen für den Nachweis der Haltesichtweite eine Zielpunkthöhe von  $h_z = 1,00$  m aus. Für die Bestimmung der Kuppenmindesthalbmesser wird in den RAA auf der Grundlage von Sicherheitsüberlegungen eine Zielpunkthöhe von  $h_z = 0,50$  m angegeben. Somit ist der Nachweis der Haltesichtweite unter Einhaltung der Kuppenmindesthalbmesser nicht erforderlich (FGSV 2008b). Nach den RAL stellen sich kritische Sichtschatten bei einer Tiefe von 0,75 m ein. Dieser Wert befindet sich genau in der Mitte von den zwei in den RAA angegebenen Werten, er ist auch für die vorliegende Untersuchung sinnvoll.

Die in den RAL festgeschriebene Definition für kritische Sichtschatten kann somit auf Autobahnen übertragen werden.

Für Sichtschatten sind für die Erstellung der Beispielenwürfe folgende Entwurfselemente relevant:

- Lageplan:
  - Gerade und / oder
  - Kreisbögen (Länge und Größe der Radien, Rechts- oder Linkskurve).
- Höhenplan:

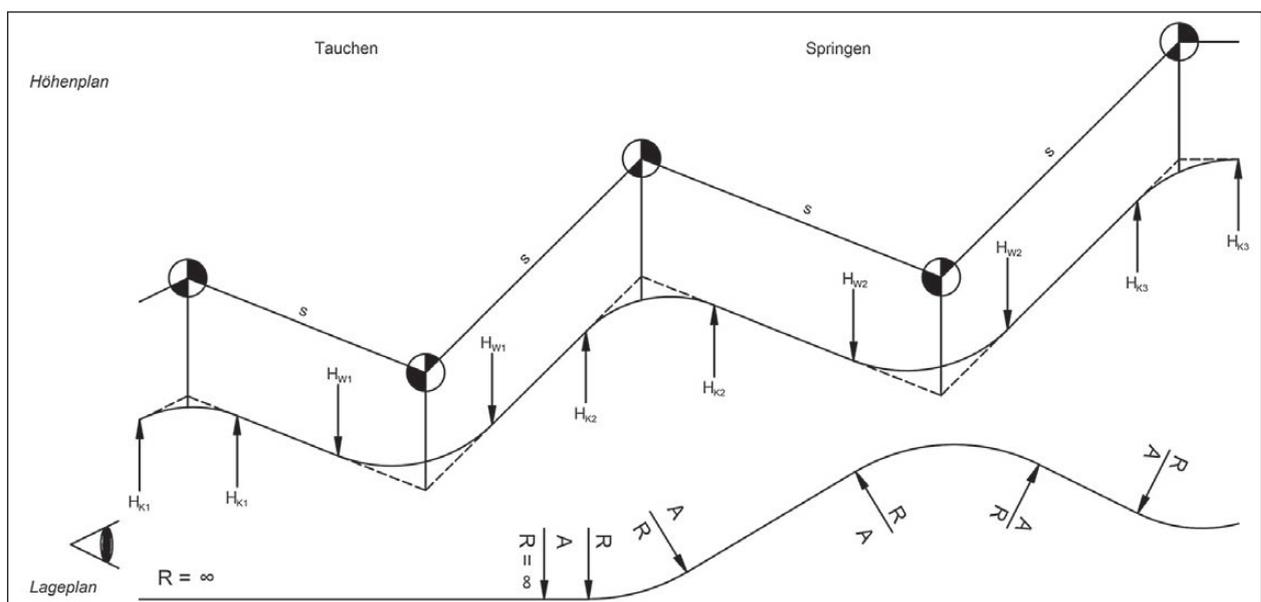


Bild 48: Entwurfselemente des Tauchens und des Springens

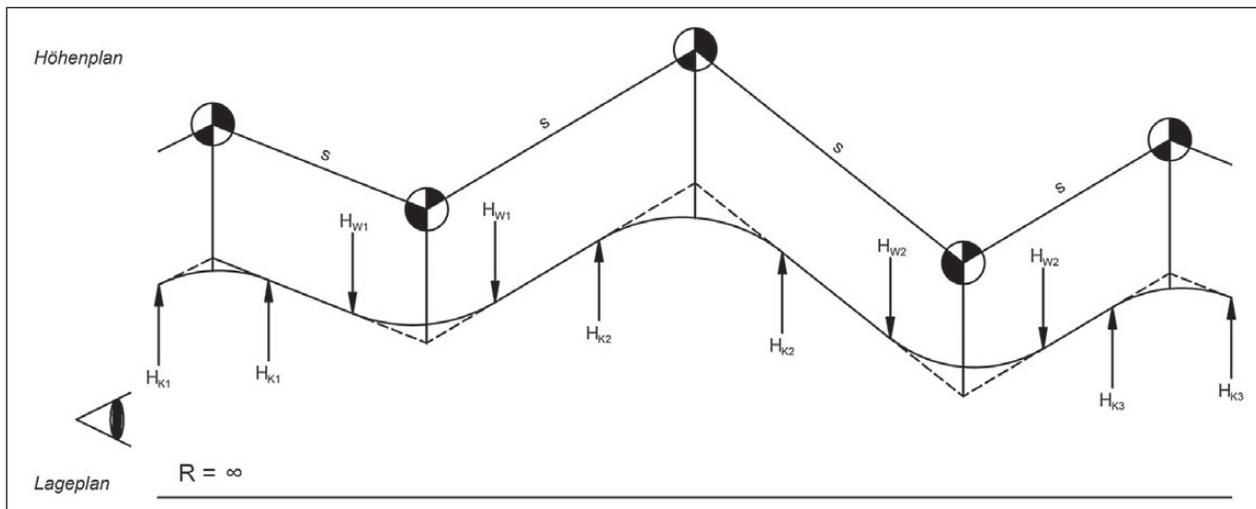


Bild 49: Entwurfselemente des Flatterns

- Kuppen- und Wannenhalbmesser bzw. Tangentiallänge,
- gleiche oder unterschiedliche Halbmesser,
- unterschiedlich lange Abschnitte mit konstanter Längsneigung zwischen Kuppe und Wanne sowie
- Längsneigungsdifferenz.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Die Überlagerung der Entwurfselemente beim Springen und Tauchen werden in Bild 47 und Bild 48 verdeutlicht.

Die sicherheitsrelevanten Defizite „Dehnung“ und „Stauchung“ sind über Perspektivbilder nicht abbildbar bzw. wahrnehmbar. Daher wurden für diese Defizite keine Beispielentwürfe erstellt.

### 4.3.2 Gestalterische Defizite

#### Flattern

Wenn in der Achse über eine lange Gerade oder einen langen Kreisbogen gleichzeitig in der Gradienten mehrere Wannen und Kuppen angeordnet werden, entsteht Flattern (LORENZ, 1971). Dabei dürfen keine Schattenschatten entstehen. Für die Erstellung der Beispielentwürfe sind demnach folgende Entwurfselemente maßgebend, die variiert werden können:

- Lageplan:
  - lange Gerade oder
  - langer Kreisbogen (Länge und Größe des Radius sowie Rechts- oder Linkskurve).

- Höhenplan:
  - Kuppen- und Wannenhalbmesser bzw. Tangentiallänge,
  - gleiche oder unterschiedliche Halbmesser,
  - unterschiedlich lange Abschnitte mit konstanter Längsneigung zwischen Kuppe und Wanne sowie
  - Längsneigungsdifferenz.

- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Bild 49 verdeutlicht die Überlagerung der Entwurfselemente beim Flattern.

#### Knickwirkung im Lageplan

Im Lageplan kann eine optische Knickwirkung entstehen, wenn in der Achse zwischen zwei langen Geraden kurze Bögen mit kleinen Tangentiallängen angeordnet werden (LORENZ, 1971; FGSV 1995). Folgende Entwurfselemente sind für optische Knickwirkungen im Lageplan relevant:

- Lageplan:
  - Länge und Größe des Radius,
  - Rechts- oder Linkskurve.
- Höhenplan: konstante Längsneigung.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Die Überlagerung der Entwurfselemente bei der Knickwirkung im Lageplan wird in Bild 50 verdeutlicht.

#### Knickwirkung im Höhenplan

Im Höhenplan kann eine optische Knickwirkung entstehen, wenn in der Gradienten zwischen zwei

langen Geraden eine kurze Wanne angeordnet wird oder wenn zu kurze Kuppenlängen gewählt werden (LORENZ, 1971; FGSV 1970). Für die Erstellung der Beispielentwürfe sind demnach folgende Entwurfselemente relevant:

- Lageplan: lange Gerade.
- Höhenplan:
  - Kuppen- und Wannenhalmesser bzw. Tangentenlänge sowie
  - Längsneigungsdifferenz.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Bild 51 verdeutlicht die Überlagerung der Entwurfselemente bei der Knickwirkung im Höhenplan.

### Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan

Liegen in der Achse zwischen zwei langen Geraden kurze Bögen mit kleinen Tangentenlängen und in der Gradiente zwischen zwei langen Abschnitten mit konstanter Längsneigung eine kurze Wanne bzw. eine kurze Kuppe vor, kann es zu optischen Knickwirkungen kommen. Für diesen Fall sind folgende Entwurfselemente relevant:

- Lageplan:
  - Länge und Größe des Radius,
  - Rechts- oder Linkskurve.
- Höhenplan:
  - Kuppen- und Wannenhalmesser bzw. Tangentenlänge sowie
  - Längsneigungsdifferenz.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

In Bild 52 wird die Überlagerung der Entwurfselemente verdeutlicht.

### Kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven

Kurze Zwischengeraden zwischen zwei gleichgerichteten Kurven können den Linienfluss einer durchgehenden Kurve unterbrechen (LORENZ, 1971). Für die Erstellung der Beispielentwürfe sind demnach folgende Entwurfselemente relevant:

- Lageplan:
  - Länge und Größe der Radien,
  - zwei gleichgerichtete Kurven nach rechts oder links sowie

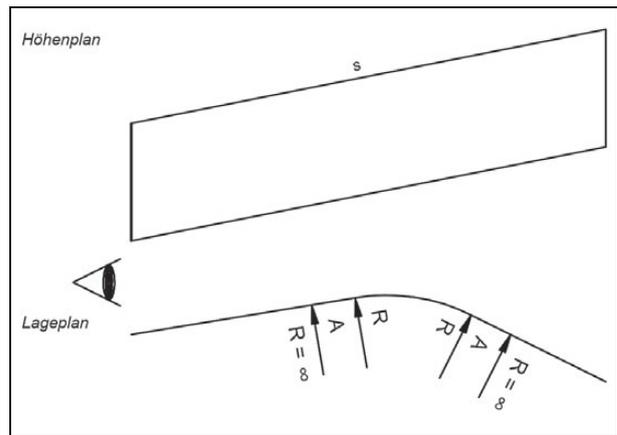


Bild 50: Entwurfselemente der Knickwirkung im Lageplan

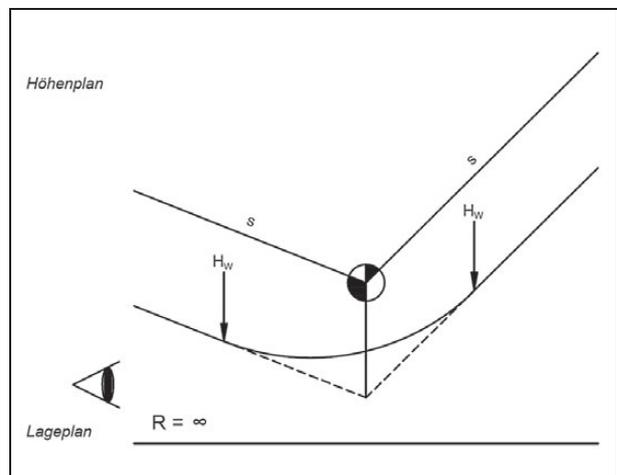


Bild 51: Entwurfselemente der Knickwirkung im Höhenplan

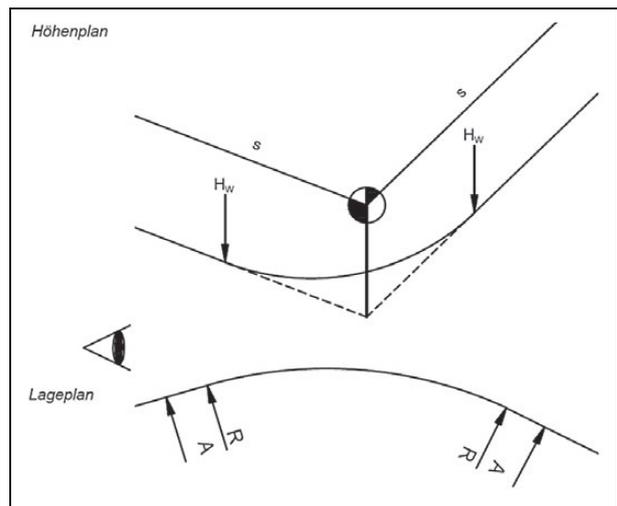


Bild 52: Entwurfselemente der Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan

- Länge der Zwischengeraden.
- Höhenplan: konstante Längsneigung.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Die Überlagerung der Entwurfselemente wird in Bild 53 verdeutlicht.

**Brettwirkung, Aufwölbung und Abplattung**

Im Höhenplan kann es zu einer Brettwirkung kommen, wenn in der Gradiente zwischen zwei gleichsinnig gekrümmten oder geraden Gefällestrrecken eine kurze Gerade (z. B. Brücke) angeordnet wird. Weiterhin kann der Eindruck einer Aufwölbung, d. h. Vortäuschung einer Kuppe, entstehen, wenn zwischen zwei Wannen eine kurze Gerade angeordnet wird. Analog tritt eine Abplattung, d. h. Vortäuschung einer Wanne, auf, wenn zwischen zwei Kuppen eine kurze Gerade angeordnet wird (FGSV 1970). Die Defizite stehen in einem engen Zusammenhang. Daher sind für die Beispielentwürfe für alle Defizite folgende Elemente von Bedeutung:

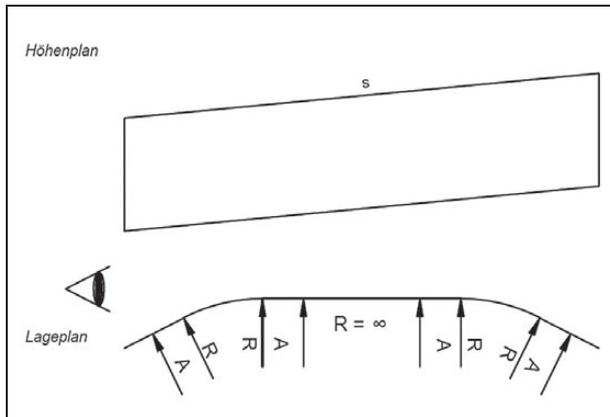


Bild 53: Entwurfselemente für eine kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven

- Lageplan:
  - lange Gerade oder
  - langer Kreisbogen (Länge und Größe des Radius sowie Rechts- oder Linkskurve).
- Höhenplan:
  - Kuppen- und Wannenhalbmesser bzw. Tangentenlänge,
  - Länge des Abschnittes mit konstanter Längsneigung zwischen den Wannen bzw. Kuppen sowie
  - Längsneigungsdifferenzen.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

In Bild 54 wird die Überlagerung der Entwurfselemente bei der Brettwirkung, der Aufwölbung und der Abplattung verdeutlicht.

**Verzerrung der Längsneigung**

Sind gerade Wannen mit einem geringen Halbmesser ausgerundet, kann eine Verzerrung der Längsneigung entstehen (ENGELKE, 1990). Folgende Entwurfselemente sind dabei maßgebend:

- Lageplan:
  - lange Gerade oder
  - langer Kreisbogen (Länge und Größe des Radius sowie Rechts- oder Linkskurve).
- Höhenplan:

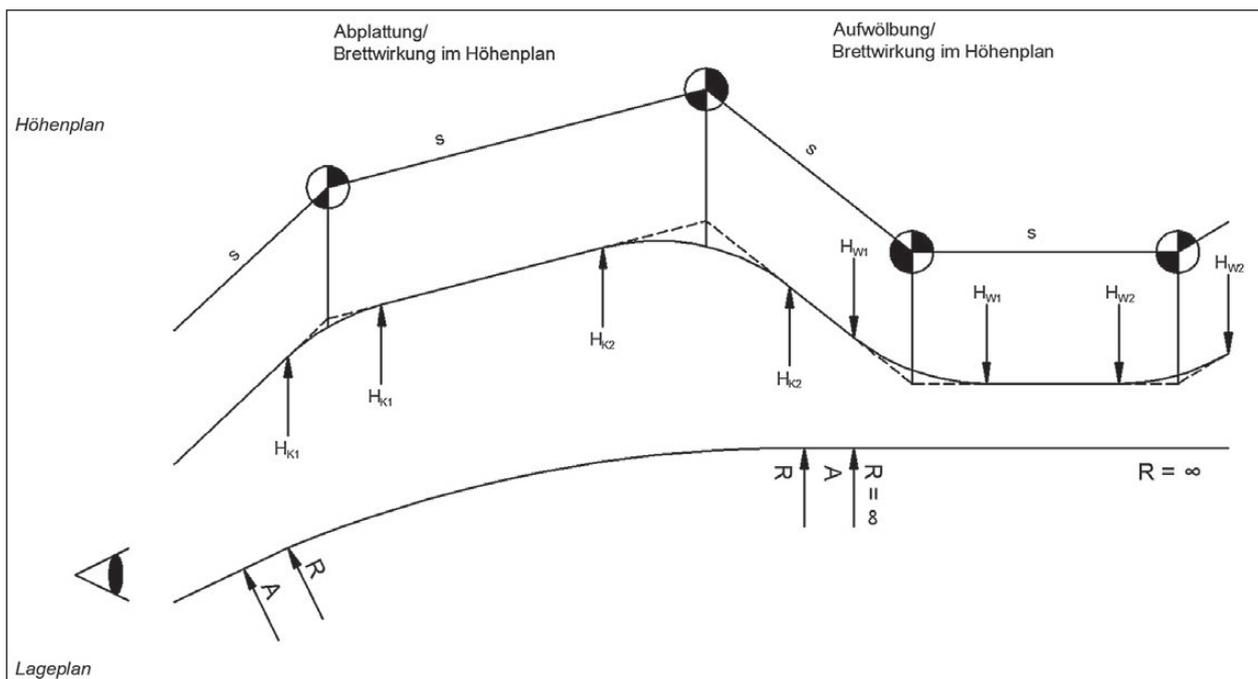


Bild 54: Entwurfselemente der Brettwirkung, der Aufwölbung und der Abplattung

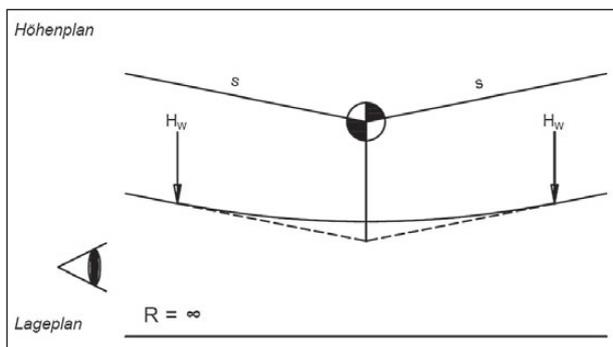


Bild 55: Entwurfselemente der Verzerrung der Längsneigung

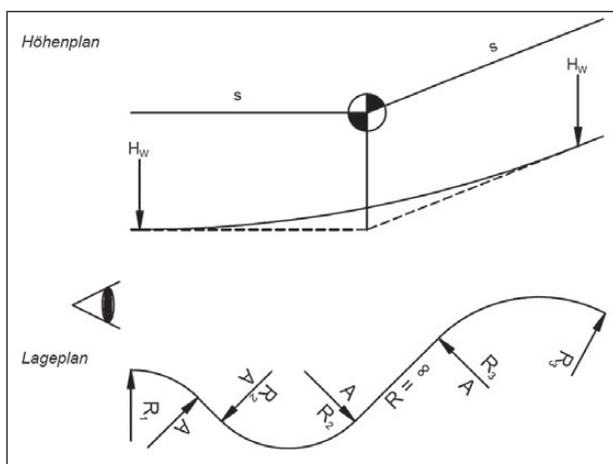


Bild 56: Entwurfselemente des Schälängels

- Wannenhalmmesser bzw. Tangentenlänge und
- Längsneigungsdifferenz.
- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Die Überlagerung der Entwurfselemente wird in Bild 55 verdeutlicht.

### Schälängeln

Der Eindruck des Schälängels entsteht, wenn in der Achse eine größere Anzahl an Wendepunkten im Vergleich zur Gradienten vorliegt (FGSV 1970). Es sind für das Schälängeln folgende Entwurfselemente maßgebend:

- Lageplan:
  - Anzahl der Kreisbögen,
  - Länge und Größe der Radien sowie
  - unterschiedlich lange Geraden zwischen den Kreisbögen.
- Höhenplan:
  - lange Wanne (Wannenhalmmesser bzw. Tangentenlänge, Längsneigungsdifferenz) oder
  - lange konstante Längsneigung.

- Querschnitt: Anzahl der Fahrstreifen.

Die Überlagerung der Entwurfselemente beim Schälängeln wird in Bild 56 verdeutlicht.

### 4.3.3 Weitere Modellannahmen

Die RAA umfassen Autobahnen und autobahnähnliche Straßen von der EKA 1 bis zur EKA 3. Den Entwurfsklassen sind jeweils unterschiedliche Planungsgeschwindigkeiten zugrunde gelegt. Daraus resultiert eine große Spreizung der Mindestwerte für die Entwurfselemente im Lage- und Höhenplan. In der Folge kann es Defizite geben, die bei den sehr großen Elementen von Autobahnen der EKA 1 nicht auftreten, dagegen jedoch bei autobahnähnlichen Straßen (EKA 2) und Stadtautobahnen (EKA 3). Da gemäß den Erkenntnissen aus der Literaturanalyse gestalterische Defizite eher bei kleinen Entwurfparametern auftreten, waren die Startwerte der Entwurfparameter die Mindest- bzw. Maximalwerte für die Entwurfselemente für Straßen der EKA 3. Je nachdem, ob ein Defizit zu erkennen war oder nicht, wurden die Parameterwerte vergrößert bzw. verkleinert. Die kürzeste Elementlänge wurde dabei auf  $L = 50 \text{ m}$  festgelegt. Diese basiert auf folgenden Randbedingungen:

- Die Geschwindigkeit bei Nässe zur Berechnung der Grenzwerte der Entwurfselemente für Straßen der EKA 3 beträgt  $V = 80 \text{ km/h}$  (Kapitel 3.4 der RAA).
- Ein Element, v. a. ein Kreisbogen, soll mindestens zwei Sekunden durchfahren werden können, um als eigenständig wahrgenommen zu werden (FGSV 1984).

Für den Wert des Klothoidenparameters wurde stets ein Drittel des Kreisbogenradius angesetzt. Begründet wird diese Annahme damit, dass bei großen Radien, wie sie bei Autobahnen gegeben sind, vorrangig kleine Klothoidenparameter gewählt werden. Wenn dieser kleiner als der Mindestparameter für Straßen der EKA 3 (min  $A = 90 \text{ m}$ ) war, wurde für den Klothoidenparameter der Mindestparameter gewählt. In der Geraden wurde eine Querneigung von  $q = 2,5 \%$  und in den Kreisbögen eine Querneigung in Abhängigkeit von der Radiengröße gemäß Bild 23 der RAA (Linie der EKA 3) gewählt.

Bei der Erstellung der Perspektivbilder war stets die Längsneigungsdifferenz und nicht die Längsneigung maßgebend. Dies ging aus der Literatur (Kapitel 2.1.4; WEISE et al., 2002) und aus Voruntersu-

chungen hervor. Ein möglicher Einfluss der Seitenraumgestaltung auf die Wahrnehmung der Längsneigungsänderung wurde nicht berücksichtigt. Es wurde somit ausschließlich die Längsneigungsdifferenz betrachtet bzw. variiert, um die Möglichkeiten der Parameterkombinationen überschaubar zu halten.

Für die Überprüfung, ob die Breite des Querschnittes einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Defizite hat, wurden zwei verschiedene Querschnitte gewählt. Da angenommen wurde, dass die Breite der Fahrstreifen keinen merkbaren Einfluss hat, wurden die Querschnitte RQ 25 und RQ 36 gewählt, die sich vorrangig hinsichtlich ihrer Fahrstreifenanzahl voneinander unterscheiden. Der RQ 25 hat je Fahrtrichtung zwei und der RQ 36 hat je Fahrtrichtung drei Fahrstreifen (Anhang 2).

Modellparameter	Modellannahme
Modellierung	Texturmodell
Augpunkthöhe	1,00 m
Augpunktachsabstand	Mitte des rechten Fahrstreifens (in Kurve Blick nach innen gerichtet)
Zielpunkthöhe	0,00 m
Zielpunktachsabstand	Mitte des rechten Fahrstreifens (in Kurve Blick nach innen gerichtet)
Zielpunktentfernung	75,00 m
Brennweite	50,00 mm
Markierung	weiß
Fahrbahnbegrenzungslinien	$B = 0,30$ m
Leitlinien	$B = 0,15$ m Strich-Lücke-Verhältnis = 6 : 12
Schutzplanken	doppelte (RQ 25) bzw. zwei einfache (RQ 36) Distanzschutzplanken
Leitpfosten	schwarz-weiß
Leitpfostenabstand	Gerade: 50,00 m Kurve: < 50,00 m
Fahrbahn	hellgrau (Beton-Optik)
Bankett	hellgrün
Gelände	grün
Himmel	grau-blau, wolzig

Tab. 10: Modellannahmen der Fahrerperspektive

Es wurden für die Erstellung der Perspektivbilder für jedes Defizit ein Bezugspunkt und ein Visualisierungsstandpunkt festgelegt. Diese wurden iterativ gemäß den H ViSt (FGSV 2008a) in einzelnen Schritten mit einer Schrittweite von 50 m ermittelt. Als Startwerte dienten die Ergebnisse von Kühn et al. (2007) (Kapitel 2.1.4).

Für die Erstellung der Perspektivbilder wurden die in den H ViSt (FGSV 2008a) festgelegten Modellannahmen verwendet (Tabelle 1).

Für die Fahrbahn wurde eine helle Textur gewählt, da so ein stärkerer Kontrast zwischen dieser und den Schutzplanken besteht. Nach KÜHN et al. (2007) wird so die Wirkung des Defizits verstärkt.

Der Straßenraum neben der Fahrbahn wurde mit einer ebenen Wiese visualisiert, um Einflüsse von der Straßenraumgestaltung auf die Wahrnehmung des Defizits ausschließen zu können.

Die Wahrnehmung der Perspektivbilder und demnach auch der Defizite der räumlichen Linienführung hängen stark von den Modellannahmen ab. Daher wurden für alle Beispielentwürfe die gleichen Modellannahmen getroffen.

#### 4.4 Defizitanalyse und Ermittlung des Änderungsbedarfes

Im Rahmen der Defizitanalyse wurden von den Defiziten deren

- Auftreten,
- Abhängigkeit von den überlagerten Entwurfselementen und
- Einfluss auf das Unfallgeschehen

untersucht. Dabei wurden quantitative und qualitative Bewertungsverfahren angewendet.

Über die quantitative Bewertung können messbare Größen für sicherheitsrelevante und gestalterische Defizite erfasst werden. Die aus der Literaturanalyse ermittelten möglichen quantitativen Parameter wurden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf Autobahnen überprüft. Dabei wurde vor allem darauf geachtet, dass die Parameter eindeutig mathematisch hergeleitet werden können. Dafür lagen mit der am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erarbeiteten quantitativen Beurteilungsmethode (Quasi-Band) erste Ansätze für Bewertungskriterien auf

der Basis von Perspektivbildern vor (Kapitel 2.1.4, ZIMMERMANN (2001) und ZIMMERMANN et al. (2006)). Diese Methode entspricht einer quantitativen Einzelbildauswertung. Sie stellt die Rohwerte aller quantitativ erfassbaren Effekte dar, wie z. B.

- Sichtschatten,
- verdeckter Kurvenbeginn,
- Größe der relativen sichtbaren Fahrbahnfläche (Sichtverzerrungen) und
- Veränderungen der relativen sichtbaren Fahrbahnfläche (Flattern)

Die Berechnung der Sichtschattentiefe bzw. der relativen sichtbaren Fahrbahnfläche für jeden Perspektivbildstandort in 20 m-Schritten sowie mit einem 20 m-Intervall für die Perspektivbildfolge hat sich in den zurückliegenden Untersuchungen mit dem Fokus auf Landstraßen bewährt und wird auch den H ViSt zugrundegelegt.

Die von ZIMMERMANN et al. (2006) entwickelte quantitative Beurteilungsmethode sollte auf die Bewertung der räumlichen Linienführung von Autobahnen angepasst werden. Für deren Anwendung wurden die über CARD/1 erstellten Lage- und Höhenplandaten sowie die Unfalldaten in ein vom KIT entwickeltes Tool eingegeben, welches das QuaSi-Band berechnet. Für die Anwendung bei Autobahnen war davon auszugehen, dass bei einer Auswertung der Perspektivbildstandorte bzw. der Perspektivbildfolgen in 20 m-Schritten bzw. im 20 m-Intervall eine ausreichende Punktdichte vorliegt. Eine systematische Vergrößerung des Stationsintervalls z. B. auf 50 m wäre vermutlich mit Einbußen in der Genauigkeit verbunden, da auch bei Autobahnen Defizite in der räumlichen Linienführung teilweise nur über kurze Streckenabschnitte vorliegen. Die bekannten Defizite in der räumlichen Linienführung lassen sich anhand der quantitativen Einzelbildauswertung als Momentaufnahme weitgehend erkennen (z. B. an einem einzelnen Balken im QuaSi-Band).

Zur Einschätzung der Bedeutung eines im Perspektivbild festgestellten Mangels war es jedoch notwendig, die Einzelperspektiven auch in ihrem Streckenbezug auszuwerten. Dazu standen bislang lediglich qualitative Ansätze zur Verfügung. Daher sollte im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Weiterentwicklung der bisherigen Ansätze erfolgen. Denkbare Parameter waren z. B. die Streckenausdehnung der Defizite (Anzahl der Einzelperspektiven, über die ein Phänomen auftritt) oder die Ent-

wicklungsgeschwindigkeit eines Phänomens zwischen aufeinanderfolgenden Perspektivbildern. Es war auch zu vermuten, dass die Auswertung mehrerer Bereiche des Perspektivbildes zu weiteren Erkenntnissen führen kann. Weiterhin war die Integration von neu erarbeiteten Kriterien in das vorhandene Berechnungssystem für das QuaSi-Band vorgesehen.

Die Grenzwerte der Defizite sollten über qualitative Kriterien erarbeitet und anhand des Unfallgeschehens auf ausgewählten Strecken überprüft werden.

Als Ergebnis dieses Teils des FE-Vorhabens waren Vorschläge für eine quantitative Beurteilungsmethode für Perspektivbildfolgen und überarbeitete Kriterien für Einzelperspektiven zu erwarten. Weiterhin sollten Ausgabe- und Darstellungsmöglichkeiten erarbeitet werden. Dabei war vorgesehen, die Form des Eigenschaftsbandes „QuaSi-Band“ durch automatisch generierte Markierungen dort zu ergänzen, wo durch die Kriterien für die Perspektivbilder bzw. -bildfolgen Mängel in der räumlichen Linienführung erkennbar sind.

Im Rahmen der qualitativen Bewertung kamen Beispielentwürfe zum Einsatz. Über diese wurden iterativ die Grenzwerte der Defizite in der räumlichen Linienführung ermittelt. Die Beurteilung, ob ein gestalterisches Defizit vorliegt oder nicht, ist subjektiv. Daher sollten die ermittelten Grenzwerte über Befragungen von Probanden abgesichert werden. Dies erfolgte nach dem in Bild 57 dargestellten Ablauf.

Zunächst wurden aus den Beispielentwürfen, die für die Befragung relevanten Bilder ermittelt. Dabei wurden die Bilder ausgewählt, die um den vermuteten Grenzwert schwankten. Anschließend wurde eine Rangreihe der ausgewählten Bilder ermittelt. Dies erfolgte über einen Dominanzpaarvergleich (Kapitel 2.1.6). Dazu wurden für jedes Defizit sechs Perspektivbilder von den zuvor ermittelten relevanten Bildern ausgewählt. Da beim Dominanzpaarvergleich jedes Perspektivbild mit jedem anderen ver-

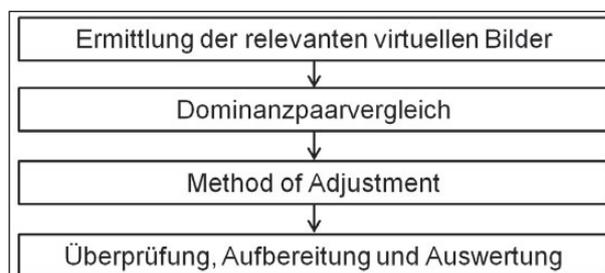


Bild 57: Ablauf der qualitativen Bewertung



Bild 58: Befragungen zum Dominanzpaarvergleich

glichen werden musste, ergaben sich 15 zu bewertende Bildpaare. Eine größere Anzahl hätte die Probanden überfordern können. Die Bildpaare wurden den Probanden an einem Bildschirm für jeweils 5 s präsentiert (Bild 58). Dies unterlag u. a. folgenden Randbedingungen, die bei jeder Befragung konstant gehalten wurden:

- heller, fast leerer Raum,
- nicht abgedunkeltes Fenster, das aber vom Bildschirm verdeckt wurde (Tageslicht),
- großer Bildschirm (LCD-TV, 42 Zoll), der ca. 1,0 m vom Probanden entfernt stand und
- ausschließlich Befragungsunterlagen auf dem Arbeitstisch des Probanden.

Vor der Befragung wurden den Probanden die Hintergründe und der Ablauf der Befragung erläutert. Anschließend wurde auf dem Bildschirm eine Eingangsfolie präsentiert, um die Probanden an den Bildschirm zu gewöhnen. Die Probanden hatten nun noch einmal die Möglichkeit, Fragen wie z. B. zur Funktionsweise zu stellen. Dabei wurden jedoch Fragen zu den Defiziten an sich nicht beantwortet, um den Probanden nicht zu beeinflussen. Darauf folgend mussten die Probanden die Perspektivbilder bewerten und angeben, in welchem Bild das Defizit stärker ausgeprägt ist. Zum Beispiel wurde bei dem Knick im Höhenplan gefragt: Welchen dieser Straßenverläufe finden Sie „knickiger“?

Die Probanden mussten darüber hinaus folgende Fragen zum eigenen soziodemographischen Hintergrund und ihrer Mobilität beantworten:

- Besitzen Sie einen Führerschein?
  - ja
  - nein

- Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich im Jahr?
  - < 6.000 km
  - 6.000 km – 10.000 km
  - 10.000 km – 20.000 km
  - 20.000 km – 30.000 km
  - > 30.000 km
- Wie viele Kilometer verbringen Sie davon auf Autobahnen?
  - keine
  - < 20 %
  - 20 % – 50 %
  - > 50 %
- Von welchem Geschlecht sind Sie?
  - männlich
  - weiblich
- Wie alt sind Sie?
  - < 25 Jahre
  - 25 Jahre – 45 Jahre
  - > 45 Jahre
- Was ist Ihr höchster Bildungsabschluss?
  - kein Abschluss
  - mittlere Reife
  - (Fach-)Abitur
  - Berufsausbildung
  - (Fach-)Hochschulabschluss

Weiterhin hatten die Probanden die Möglichkeit, Anmerkungen zu der Befragung zu geben. Abschließend wurde sich bei den Probanden für deren Teilnahme bedankt.

Im Anhang 4 und im Anhang 5 sind jeweils ein Beispiel für eine Präsentation und einen Fragebogen enthalten.

Aus dem Dominanzpaarvergleich geht hervor, wie häufig das Defizit auf einem Bild im Vergleich zu den anderen stärker wahrgenommen wurde. Die individuellen Häufigkeiten aller Probanden wurden summiert und den Bildern anschließend im Sinne der Auswertungsmethodik „indirekte Rangordnung“ nach ihrer Größe Rangplätze zugeordnet.

Nachdem eine Reihung der Bilder aufgestellt wurde, wurden die Grenzwerte der Defizite ermittelt. Dies erfolgte über eine Expertenbefragung, bei der die Method of Adjustment (Regulierungs-Methode) angewendet wurde. Dabei wurden Experten gebeten, über einen Regler aus einer Auswahl von Bildern das Bild einzustellen, bei dem das entsprechende Defizit gerade noch so zu erkennen ist.

Für die Umsetzung der Expertenbefragung wurden zunächst ergänzend zu den Bildern, die für den Dominanzpaarvergleich verwendet wurden, weitere Perspektivbilder erstellt. Es wurden dabei so viele Bilder erstellt, dass die Spanne von „eindeutig kein Defizit“ bis „eindeutig ein Defizit“ reichte. Weiterhin sollte dem Probanden der Eindruck vermittelt werden, dass er nicht zwischen mehreren Bildern auswählt, sondern er selbst die Parameter variiert. Es sollten somit flüssige Übergänge zwischen den Perspektivbildern bestehen.

Der Straßenraum wurde bei den Perspektivbildern mit einer ebenen Wiese visualisiert, um die Anzahl möglicher Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung des Defizits gering zu halten (siehe Kapitel 4.3.3). Für die Grenzwertfindung ist jedoch interessant, welchen Einfluss Elemente im Straßenraum auf die Wahrnehmung haben. Daher wurden zusätzlich alle Perspektivbilder noch einmal mit einem Wald und Schutzplanken sowie mit einem Straßenschild im Straßenraum ausgegeben (Bild 59 und Bild 60). Weiterhin wurden zusätzlich die Perspektivbilder noch einmal mit einer dunklen Textur für die Fahrbahn erstellt, um einen weiteren möglichen Einflussfaktor bzgl. der Darstellung betrachten zu können (Bild 61).

Die erstellten Perspektivbilder unterliegen aufgrund der zahlreichen Modellannahmen (Darstellung und Anordnung der Ausstattungselemente, Seitenraumgestaltung usw.) vielen möglichen Einflussfaktoren, die von dem eigentlich zu betrachtenden Defizit ablenken können. Daher wurden die Bilder noch einmal in einer abstrakten Form ausgegeben, wobei ausschließlich die Fahrbahnrandlinien und die Achse dargestellt werden. Die abstrakte Darstellung erfolgte in drei verschiedenen Varianten:

- schwarze Linien auf weißem Hintergrund (Bild 62),
- weiße Linien auf schwarzem Hintergrund (Bild 63) sowie



Bild 59: Perspektivbild mit einem Wald und Schutzplanken im Seitenraum

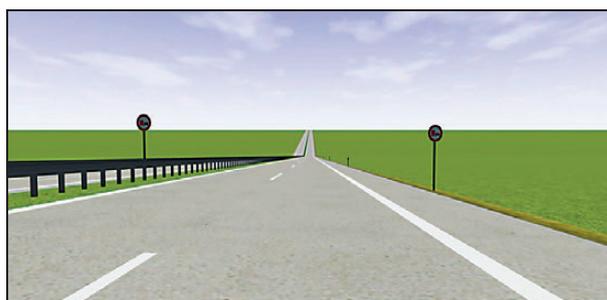


Bild 60: Perspektivbild mit Straßenschildern im Seitenraum

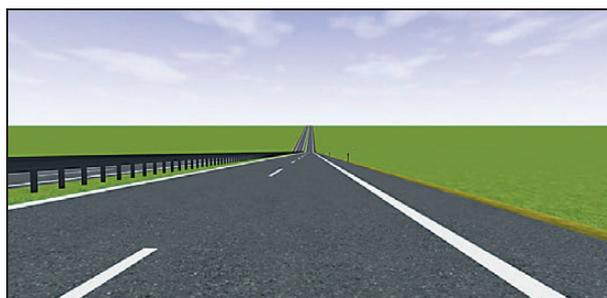


Bild 61: Perspektivbild mit dunkler Textur der Fahrbahn

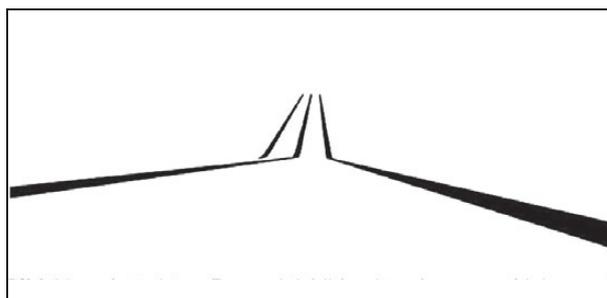


Bild 62: Abstraktes Perspektivbild mit schwarzen Linien auf weißem Hintergrund



Bild 63: Abstraktes Perspektivbild mit weißen Linien auf schwarzem Hintergrund

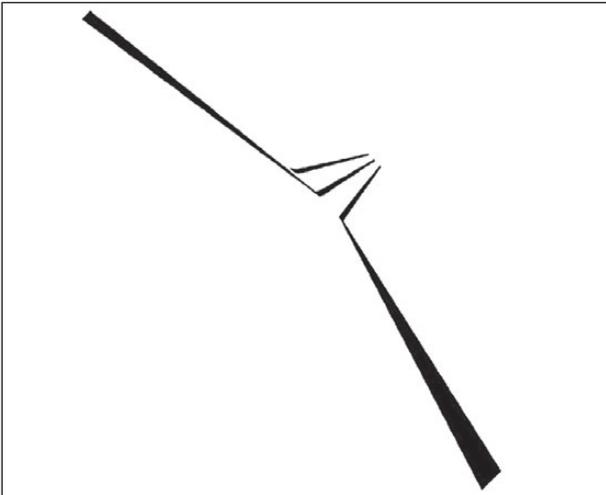


Bild 64: Abstraktes Perspektivbild mit schwarzen Linien auf weißem Hintergrund und Drehung der Darstellung um 45°

- schwarze Linien auf weißem Hintergrund und Drehung der Darstellung um 45° (Bild 64).

Die Befragung erfolgte analog und unter gleichen Randbedingungen zur Befragung zum Dominanzpaarvergleich. Allerdings kamen als Probanden nur Experten in Betracht, d. h. Fachleute des Straßenentwurfs, bei denen sicher war, dass sie ausreichende Kenntnisse über die Thematik von Defiziten in der räumlichen Linienführung haben. Den Probanden wurden ebenfalls vor der Befragung die Hintergründe und der Ablauf der Befragung erläutert. Anschließend wurde auf dem Bildschirm eine Eingangsfolie präsentiert und die Probanden hatten noch einmal die Möglichkeit Fragen zu stellen. Anschließend mussten die Probanden die Perspektivbilder bewerten und über einen Regler den Grenzwert einstellen, ab dem sie das entsprechende Defizit wahrnehmen. Für eine genaue Grenzwertbestimmung wurden für die Regler-Einstellung Übungsdurchgänge durchgeführt, dessen Ergebnisse nicht mit ausgewertet wurden. Weiterhin haben die Probanden für eine Perspektivbild-Gruppe jeweils fünfmal den Grenzwert eingestellt. Für die hinsichtlich der Modellannahmen modifizierten Perspektivbilder und die abstrakten Bilder wurde der Grenzwert jeweils nur einmal eingestellt, um die gesamte Befragungsdauer im Rahmen zu halten und die Ergebnisse nicht durch Ermüdung oder durch eine sinkende Motivation der Probanden zu verfälschen. Weiterhin wurden die Perspektivbild-Gruppen nicht sortiert abgefragt, sondern variiert. Dadurch sollte vermieden werden, dass dem Probanden auffällt, dass einige Perspektivbilder mehrfach abgefragt wurden.

Nach der Grenzwertbestimmung wurden den Probanden auch die oben aufgeführten Fragen zu deren soziodemographischen Hintergrund und deren Mobilität gestellt. Weiterhin hatten die Probanden die Möglichkeit Hinweise zur Befragung zu geben und es wurde sich bei ihnen für deren Teilnahme bedankt.

Dem Anhang 6 und dem Anhang 7 sind jeweils ein Beispiel für eine Präsentation und einen Fragebogen zur Method of Adjustment zu entnehmen.

Die aus den Befragungen resultierten Daten wurden abschließend überprüft, aufbereitet und ausgewertet. Dabei war zu beachten, dass für die Expertenbefragung nur ein geringes Probandenkollektiv zur Verfügung stand. Daher könnten mögliche Ausreißer das Ergebnis der Mittelwertbildung beeinflussen. Es wurden somit für jeden Probanden zunächst die Mediane<sup>3</sup>, die von Ausreißern kaum beeinflusst werden, für folgende zu bewertende Gruppen von Bildern ermittelt:

- unverändertes Perspektivbild (uPB),
- Perspektivbilder mit verändertem Fahrraum (PvF) (Wald oder Schutzplanken im Seitenraum, Fahrbahn mit dunkler Textur) und
- abstrakte Perspektivbilder (aPB) (schwarze Linien auf weißem Hintergrund, weiße Linien auf schwarzem Hintergrund sowie schwarze Linien auf weißem Hintergrund und Drehung der Darstellung um 45°).

Da die Variationen der Gruppen „Perspektivbilder mit verändertem Fahrraum“ und „abstrakte Perspektivbilder“ jeweils nur einmal zu bewerten waren und damit die dazugehörigen Ergebnisse nicht repräsentativ sind, wurden sie zu den Gruppen zusammengefasst.

Aufgrund des geringen Probandenkollektives wird zur Grenzwertbestimmung aus den ermittelten Medianen wieder der Median gebildet, um auch hier mögliche Einflüsse durch Ausreißer zu vermeiden. Der Grenzwert ist nur als Richtwert anzusehen, da das Probandenkollektiv aufgrund seines geringen Umfangs nicht repräsentativ ist. Aus Voruntersuchungen ging jedoch hervor, dass die Method of Adjustment im Rahmen dieser Untersuchungen die sinnvollste Methodik zur Grenzwertbestimmung

<sup>3</sup> „Der Median ist derjenige Wert der sortierten Stichprobe, der genau in der Mitte liegt“ (LANGE / BENDER, 2007, S. e1).

war. Die Inhalte der Voruntersuchungen sind im Anhang 8 erläutert.

Aus der Literaturanalyse konnten keine Erkenntnisse darüber gewonnen werden, ob ein virtuell erstelltes Perspektivbild genauso wie ein reales Bild wahrgenommen wird. Daher sollten aus den Fotos von den Untersuchungsstrecken, die im Rahmen der Streckenbefahrungen aufgenommen wurden, Bilder herausgesucht, auf denen Defizite zu erkennen sind. Da die Fotos über photogrammetrisch kalibrierte Kameras aufgenommen wurden, konnte die dargestellte Situation exakt über CARD/1 nachgebildet werden. Dadurch konnte ein virtuelles Vergleichsbild zu dem realen Bild erstellt werden. Das virtuelle Vergleichsbild wurde anschließend mit dem realen Bild verglichen.

Bei der qualitativen und der quantitativen Bewertung war die notwendige Datentiefe davon abhängig, ob eine grundlegende Überprüfung von lediglich der Trassierungsdaten aus Lage- und Höhenplan oder ob eine detaillierte Überprüfung einschließlich der Querschnittsausbildung, der Böschungen und dem Bewuchs durchgeführt wurde. Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass die detaillierte Ausgestaltung der Böschungen bei den meisten Strecken von relativ geringer Bedeutung für die Aussagen zu quantitativen Beurteilungskriterien war. Die meisten Defizite traten auch bei einer Reduzierung auf das Fahrband auf. Es wurde lediglich im Einzelfall durch eine böschungsbedingte Verdeckung der Fahrbahn im mittleren Entfernungsbereich ein Sichtschatten generiert. Da die Elementlängen auf Autobahnen deutlich größer sind und durch die Anlage von Seitenstreifen die vorhandenen Querschnitte deutlich breiter, war zu vermuten, dass das Durchstoßen von Böschungslinien über mehrere Lage- bzw. Höhenplanelemente hinweg innerhalb der Vorausorientierung quasi ausgeschlossen ist. Da für die Bestandsstrecken und für die virtuellen Strecken keine georeferenzierten Informationen über die Böschungsgestaltung außerhalb der Fahrbahn vorlagen, wurden zunächst die Querprofile mit einem Bezugsgelände berechnet, das sich aus dem Tangenzug des Höhenplanes ergibt. Für Streckenabschnitte, bei denen z. B. Sichtschattenstrecken mit wieder sichtbarem Anschlussbereich (Tauchen) detektiert wurden, musste nachgewiesen werden, ob die Sicht z. B. durch die Böschungsgestaltung auf den wiederauftauchenden Abschnitt verhindert wird. Daher wurde im Rahmen der Untersuchungen der visualisierte Seitenraum für Abschnitte, auf de-

nen sicherheitsrelevante Defizite vorlagen, die im Zusammenhang mit unzureichenden Sichtweiten stehen, mit den aufgenommenen Bildern der Untersuchungsstrecken abgeglichen. Es war weiterhin zu vermuten, dass der Einfluss der vom Mittelstreifen abgewandten Fahrstreifen ebenfalls untergeordnet ist. Letztendlich ergab sich daraus die Frage, ob die Beurteilung der räumlichen Linienführung für die tatsächliche Fahrbahnbreite erfolgen oder querschnittsneutral die Linienführung im Vordergrund stehen sollte.

In diesem Zusammenhang mussten vor allem folgende drei Aspekte betrachtet werden, die bei Landstraßen nicht auftreten bzw. bei denen die Modellfestlegungen unstrittig sind:

- Gestaltung des Mittelstreifens,
- Lage des Augpunktes im Querschnitt und
- Querneigung.

Da sich vor allem die im H ViSt festgelegten quantitativen Prüfkriterien auf nicht sichtbare Bereiche des Fahrtraums und deren Übergänge beziehen, kam deren Berechnung eine große Bedeutung zu. Weiterhin war neben der Augpunktlage und -höhe die Gestaltung des Mittelstreifens zu beachten, sobald der Sichtstrahl zwischen Aug- und Zielpunkt in Linkskurven den Mittelstreifen berührt bzw. von ihm unterbrochen wird. Bei einer Höhe von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von mindestens 90 cm gegenüber der Fahrbahnoberkante kommt dem Mittelstreifen eine wesentliche Bedeutung bei der Erkennbarkeit des vorausliegenden Fahrtraums zu. Unabhängig von den auf den Strecken vorhandenen Mittelstreifenbreiten und Fahrzeugrückhaltesystemen wurde daher in den modellierten Fahrträumen von einem 4 m breiten Mittelstreifen ausgegangen, in dem beidseitig um 0,5 m zurückgesetzte Fahrzeugrückhaltesysteme mit einer Höhe von 0,9 m angeordnet wurden. Entsprechend dem verwendeten Sägezahnprofil wurde die Fläche zwischen diesen beiden Vorderkanten aufgefüllt dargestellt. Entscheidend für die Berechnungsalgorithmen war, dass die Oberflächenmodelle geschlossen waren, so dass undefinierte Durchstoßungen des digitalen Oberflächenmodells vermieden werden konnten.

Bei einbahnigen Landstraßen hat als nahezu einzige Stellgröße die Höhe des Augpunktes über der Fahrbahn einen Einfluss auf die Tiefe von Sichtschatten und die Erkennbarkeit von Kurvenbeginn-

nen. Die Lage des Augpunktes ist von Bedeutung, sobald Hindernisse auf der Kurveninnenseite bestimmend werden. Analog zur bewährten Lage des Augpunktes in Fahrstreifenmitte bei Sichtbetrachtungen wurde dieser Punkt auch bei Analysen der räumlichen Linienführung von Landstraßen herangezogen. Bei der Betrachtung von Autobahnen war vor allem in Verbindung mit dem Mittelstreifen der Abstand des Augpunktes von der Trassierungsachse bzw. dem Fahrzeugrückhaltesystem von großer Bedeutung. Da sich bei Strecken mit ungünstiger Überlagerung der Trassierungselemente erhebliche Einflüsse aus dem Mittelstreifen ableiten lassen, war zu erwarten, dass diese umso größer sind, je näher der Augpunkt am Mittelstreifen liegt. Daher wurde in einem ersten Schritt die Lage des Augpunktes zwischen der Mitte des linken Fahrstreifens und der Leitlinie zwischen den beiden Fahrstreifen variiert.

Bei den Analysen von Landstraßen hinsichtlich der räumlichen Linienführung war die Bedeutung der Querneigung auf das Ergebnis eher gering. Inwieweit dies bei den breiteren Autobahnquerschnitten und vor allem angesichts der Höhendifferenz zwischen den realen Höhen von Augpunkt und Oberkante des Fahrzeugrückhaltesystems ebenfalls zutrifft, war zu diskutieren. In den hier gezeigten ersten Auswertungen wurde zwischen konstantem  $q = 0 \%$  und den nach RAA vorzusehenden Querneignungsverläufen variiert.

Die Ergebnisse der Defizitanalyse sollten schließlich so aufbereitet werden, dass ein Vorschlag für ein Prüfverfahren für die räumliche Linienführung von Autobahnen, welches in die H ViSt integriert werden soll, und Vorschläge für die Überarbeitung der Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA erarbeitet werden konnte.

#### 4.5 Vorschläge H ViSt

Für die Bewertung von Defiziten in der räumlichen Linienführung war es zunächst von Bedeutung, ob es sich um gestalterische oder sicherheitsrelevante Defizite handelte. Diese Einteilung erfolgte im Rahmen der Arbeitsschritte, die unter Kapitel 4.4 beschrieben wurden.

Die Abgrenzung der Defizite, d. h. ob es sich um ein Defizit handelt oder nicht, erfolgte auf der Grundlage der bestehenden Sichtverhältnisse und der sich überlagernden Entwurfs-elemente. Bei den beste-

henden Sichtverhältnissen wurde untersucht, ob diese physisch beeinträchtigen oder lediglich qualitativ ungünstig sind.

Die Einteilung der Defizite nach sicherheitsrelevanten und gestalterischen sowie die Abgrenzung der Defizite stellte die Grundlage für ein ggf. mit unterschiedlichen Qualitätsstufen bzw. Strategien durchzuführendes Prüfverfahren dar. Ein Anhalt dafür bildete das in den H ViSt aufgeführte Prüfverfahren für Landstraßen (Kapitel 2.2.6). Es bestand die Vermutung, dass sich bei Autobahnen im Vergleich zu Landstraßen nicht alle Defizite in gleichem Umfang, gleicher Verteilung und gleicher Parameterausprägung einstellen. Demnach waren bei dem Prüfverfahren für die räumliche Linienführung von Autobahnen im Vergleich zu dem im H ViSt aufgeführten Prüfverfahren für Landstraßen Modifikationen, wie z. B. eine stärkere Einbeziehung von gestalterischen Defiziten, erforderlich. Daher wurde erst mit den endgültigen Ergebnissen der Untersuchungen entschieden, ob das in den H ViSt enthaltene Prüfverfahren für Landstraßen um die relevanten Aspekte für Autobahnen ergänzt wird oder, ob für die Autobahnen ein ergänzendes, paralleles und eigenständiges Prüfverfahren neben das Verfahren für Landstraßen gestellt wird. Die Integrierung in die H ViSt sollte nach der Vorlage der Ergebnisse im Betreuerkreis und in Abstimmung mit dem zuständigen Ausschuss der FGSV „AA 2.2 Landstraßen“ erfolgen.

#### 4.6 Vorgabe, Textvorschlag RAA

Das Kapitel 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA hat vor allem das Ziel, dem planenden Entwurfsingenieur einen schnellen, praxiswirksamen und einfach handhabbaren Anhalt zur Sicherstellung einer regelgerechten räumlichen Linienführung zu geben. Demnach wurde angestrebt, die (quantitativen) Entwurfsvorgaben für die Mindestwerte zur Vermeidung von gestalterischen Defiziten tabellarisch zusammenzufassen. Weiterhin wurde erwartet, dass die Bilder 16 bis 18 aus den RAA (Kapitel 2.2.5, Bild 34 bis Bild 36), welche die gestalterischen Defizite darstellen, um eine Spalte mit quantitativen Angaben analog zu den RAL (FGSV 2012b) ergänzt werden, bei denen solche Defizite nicht mehr auftreten.

Die Ergebnisse des Projektes sowie die herausgearbeiteten Ergänzungen und / oder Änderungen der Inhalte des Kapitels 5.4 der RAA sollten zu einer

Neustrukturierung dieses Kapitels führen. Dabei sollte unter anderem auch geprüft werden, ob weitere regelgerechte Überlagerungs-Darstellungen ergänzend mit aufgenommen oder ob die noch in den RAL-L-2 enthaltenen (Kapitel 2.2.5) und in den RAA mangels wissenschaftlicher Absicherung entfallenen Abbildungsdefizite wieder aufgenommen werden sollten. Weiterhin war es denkbar, eine stärkere Differenzierung nach sicherheitsrelevanten und nach gestalterischen Defiziten vorzunehmen. Dies schafft unter anderem bei der Prüfung von Entwürfen in Sicherheitsaudits einen Bewertungsmaßstab und Bewertungssicherheit.

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens sollte demnach für die RAA ein Textvorschlag für ein vollständig neu konzipiertes Kapitel 5.4 „Räumliche Linienführung“ erarbeitet werden.

## 4.7 Schlussbericht

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden einschließlich der Textvorschläge für die RAA und das H ViSt aufbereitet, zusammengefasst und als Schlussbericht vorgelegt.

# 5 Ergebnisse

## 5.1 Streckenkollektiv

Für die Auswahl an Untersuchungsstrecken wurden alle Autobahnen von Deutschland zusammengetragen, die sich im bewegten Gelände befinden und deren Eröffnung vor dem Jahr 1940 erfolgte. Anschließend wurde überprüft, von welchen Streckenabschnitten bereits die Daten zur Streckengeometrie und die Unfalldaten vorlagen. Die aus diesen Betrachtungen resultierenden Strecken wurden in das Streckenkollektiv aufgenommen (Tabelle 11).

Weiterhin wurden die in Tabelle 12 dargestellten Strecken mit in das Kollektiv aufgenommen, bei denen Defizite in der räumlichen Linienführung vermutet wurden.

Neben den Strecken, bei denen Defizite in der räumlichen Linienführung vermutet wurden, wurden auch Vergleichsstrecken für das Streckenkollektiv ausgewählt (Tabelle 13).

Das Streckenkollektiv umfasst eine Länge von ca. 1.344,4 km.

Strecke	Abschnitt	Länge [km]
A 3	Landesgrenze NRW/RP bis AK Wiesbadener Kreuz	112,5
A 4	AK Chemnitz bis AS Dresden-Flughafen	76,2
A 6	AS Enkenbach-Alsenborn bis AK Frankenthal	33
A 8	AK Stuttgart bis AS Mühlhause	49,6
A 9	AS Berg/Bad Steben bis AS Hormersdorf	99,9
A 72	AS Hof-Nord bis AK Chemnitz	103,3
A 81	AS Mundelsheim bis AS Stuttgart Feuerbach	24,8

Tab. 11: Untersuchungsstrecken, die vor dem Jahr 1940 eröffnet wurden

Strecke	Abschnitt	Länge [km]
A 7	AS Northeim-West bis AS Niederaula	287,1
A 11	AD Barnim bis Landesgrenze D/PL	109

Tab. 12: Weitere Untersuchungsstrecken im bewegten Gelände

Strecke	Abschnitt	Länge [km]
A 71	AK Bamberg bis AK Erfurt	140
A 6	AK Nürnberg Süd bis AK Feuchtwangen/Crailsheim	73
A 93	AD Hochfranken bis AS Regensburg Nord	170
A 14	AD Nossen bis AS Parthenaue	66

Tab. 13: Vergleichsstrecken

## 5.2 Qualitative und quantitative Untersuchungen anhand von Beispielentwürfen

### 5.2.1 Sicherheitsrelevante Defizite

#### Verdeckter Kurvenbeginn

Bei den Untersuchungen zum verdeckten Kurvenbeginn wurden folgende zwei Ansätze verfolgt:

- Berechnung der Erkennbarkeit des Kurvenbeginns anhand des entsprechenden Modells nach Zimmermann (2001) und

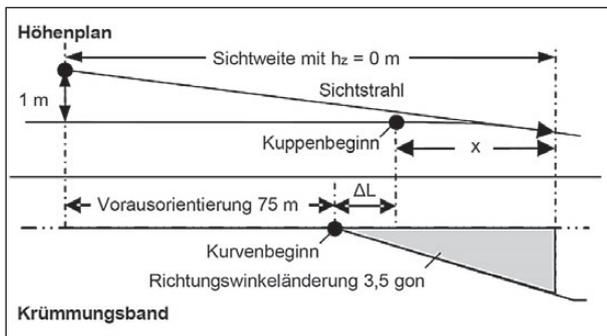


Bild 65: Modell zur Erkennbarkeit des Kurvenbeginns (FGSV 2008a)

- Erstellung von Beispielentwürfen mit CARD/1.

In den HViSt wird ein Modell zur Erkennbarkeit des Kurvenbeginns beschrieben (Bild 65). Dieses basiert auf Untersuchungen von ZIMMERMANN (2001) und ZIMMERMANN et al. (2006) (siehe Kapitel 2.1.4).

Für das in Bild 65 dargestellte Modell gelten folgende Randbedingungen (ZIMMERMANN, 2001; ZIMMERMANN et al., 2006; FGSV 2008a):

- Nahorientierung und Handlung: 75 m (Kapitel 2.1.5),
- Augpunkthöhe: 1,00 m gemäß RAS-L (FGSV 1995),
- Zielpunkthöhe: 0,00 m,
- Mindestrichtungsänderung: 3,5 gon,
- Querneigung:  $q = 0 \%$  und
- Längsneigung:  $s = 0 \%$ .

ZIMMERMANN (2001) und ZIMMERMANN et al. (2006) leiteten auf der Grundlage des Modells folgende Gleichung ab, anhand der die erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn beim Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen berechnet werden kann, um die Erkennbarkeit des Krümmungswechsels gewährleisten zu können (ZIMMERMANN, 2001; ZIMMERMANN, 2014):

$$\Delta L = L_{3,5} - ((L_V + L_{3,5}) - \sqrt{(L_V + L_{3,5})^2 + 2 \times H_K \times 1 m}) \quad \text{Gl. 7}$$

mit

$$L_{3,5} = \sqrt{\frac{3,5 \text{ gon} \times 2 \times \pi \times A^2}{200 \text{ gon}}} \quad \text{Gl. 8}$$

$\Delta L$  Differenz zwischen Kurven- und Kuppenbeginn [m]

$L_{3,5}$  Länge vom Klothoidenansatz bis zum Punkt mit der Richtungswinkeländerung 3,5 gon [m]

$L_V$  Vorausorientierung = 75 m

$H_K$  Kuppenhalbmesser [m]

$A$  Klothoidenparameter [m]

Das Modell zur Berechnung der Erkennbarkeit des Kurvenbeginns nach ZIMMERMANN (2001) wurde im Rahmen von Untersuchungen zur räumlichen Linienführung von Landstraßen entwickelt. Der Entwurf von Landstraßen und der Entwurf von Autobahnen unterscheiden sich aus geometrischer Sicht vorrangig in der Dimensionierung der Entwurfselemente. Das Modell ist wegen der richtliniengemäßen Mindestrichtungsänderung von Klothoiden von 3,5 gon nur von dem Klothoidenparameter und dem Kuppenhalbmesser abhängig. Der anschließende Lageplanradius ist bei der Verwendung von regelkonformen Klothoiden nicht relevant. Daher kann das Modell auch für den Entwurf von Autobahnen und somit auch für die Berechnung der erforderlichen Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn beim Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen angewendet werden. Auf der Grundlage des Modells kann das Defizit „verdeckter Kurvenbeginn“ analog zu den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL; FGSV 2012b) wie folgt definiert werden: „Ein verdeckter Kurvenbeginn liegt dann vor, wenn aus einer Entfernung von 75 m vor dem Kurvenbeginn im Lageplan die voraus liegende Straßenoberfläche nicht mindestens bis zu dem Punkt einsehbar ist, an dem eine Richtungsänderung von 3,5 gon im Lageplan vorliegt. Daher ist zu gewährleisten, dass der Beginn des für den Fahrer unsichtbaren Teils der Kuppe vom Fahrer weiter entfernt liegt als der Punkt der relevanten Richtungsänderung“ (FGSV 2012b, S. 44). Um die Erkennbarkeit des Kurvenbeginns gewährleisten zu können, sind daher nach Gleichung 7 und Gleichung 8 die in Tabelle 14 Verschiebungen erforderlich. Die Werte wurden sinnvoll auf 5er-Schritte gerundet. Die ungerundeten Ergebnisse sind dem Anhang 12 zu entnehmen.

Neben den Berechnungen der Erkennbarkeit des Kurvenbeginns wurden auch Beispielentwürfe anhand der Straßenentwurfssoftware CARD/1 erstellt. Dazu wurden fiktive Achsen mit der Elementfolge Gerade – Klothoide – Kreisbogen und Gradienten

HK [m]	A [m]							
	150	200	250	300	350	400	450	500
3.000	25	45	65	85	100	120	135	155
4.000	15	35	55	75	95	115	130	150
5.000		25	50	70	90	110	125	145
6.000		15	40	60	85	105	120	140
7.000			30	55	75	95	115	135
8.000			20	45	70	90	110	130
9.000			10	40	65	85	105	125
10.000				30	55	80	100	120
11.000				20	45	70	95	115
12.000				5	40	65	90	110
13.000		keine Verschiebung erforderlich			30	55	80	105
14.000					20	50	75	100
15.000					5	40	70	95
16.000						30	60	90
17.000						20	55	80
18.000						10	45	75

Tab. 14: Erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn bei Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen [m]

mit dem Element Kuppe angelegt. Anhand des Moduls „Sichtweiten berechnen“<sup>4</sup> wurde anschließend ein Sichtweitenband erzeugt (Zielpunkthöhe: 0,75 m). In diesem wurde ggf. auch der verdeckte Kurvenbeginn angezeigt.<sup>5</sup>

Über die Beispielentwürfe wurden mögliche Zusammenhänge zwischen der Erkennbarkeit des Kurvenbeginns und der Richtung des Kreisbogens (Rechts- oder Linkskurve), dem Kuppenhalbmesser, der Längsneigungsdifferenz und dem Querschnitt (Anzahl der Fahrstreifen) untersucht. Weiterhin wurden die berechneten Verschiebungen des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn überprüft und ermittelt, ab wann Kurven durch Leitpfosten erkannt werden können.

Es wurden 251 Perspektivbilder erstellt. Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- Lageplan:
  - Radius:  $R = 450 \text{ m}$  bis  $1.500 \text{ m}$ ,

- Rechts- und Linkskurve sowie

- Beginn des Kreisbogens bzgl. des Hochpunktes in Abhängigkeit der Erkennbarkeit der Kurve.

- Höhenplan:

- Kuppenhalbmesser:  $H_K = 3.000 \text{ m}$  bis  $27.000 \text{ m}$  und

- Längsneigungsdifferenz:  $\Delta s = 4 \%$ ,  $6 \%$ ,  $8 \%$ .

- Querschnitt: RQ 25 und RQ 36.

Für den Klothoidenparameter wurde stets ein Drittel des Kreisbogenradius gewählt. Eine vollständige Auflistung der untersuchten Parameterkombinationen und die dazugehörigen Bilder sind dem Anhang 11 zu entnehmen.

Für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Erkennbarkeit des Kurvenbeginns und der Richtung des Kreisbogens, dem Kuppenhalbmesser, der Längsneigungsdifferenz und dem Querschnitt wurden mehrere Achsen mit verschiedenen Parametern bzgl. des Querschnitts, der Kurvenrichtung und der Größe des Radius und jeweils eine dazugehörige Gradienten mit einer bestimmten Längsneigungsdifferenz angelegt. Der Kurvenbeginn (Beginn der Klothoide) lag dabei analog des Modells nach ZIMMERMANN (2001) am Kuppen-

<sup>4</sup> Die Berechnung erfolgte anhand der 2D-Sichtweitenberechnung. Diese erfolgt über das Tangentenverfahren und ist ein gradientenbasiertes Verfahren (IGM, 2015).

<sup>5</sup> CARD/1 berechnet den verdeckten Kurvenbeginn auf der Grundlage des entsprechenden Modells nach den H ViSt (IGM, 2015).

Richtung	Linkskurve				Rechtskurve
	$\Delta s$ [%]	4	4	6	8
RQ	RQ 36	RQ 25	RQ 25	RQ 25	RQ 25
R [m]	$H_k$ [m]	$H_k$ [m]	$H_k$ [m]	$H_k$ [m]	$H_k$ [m]
750	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
1.050	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000
	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000
	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
1.350	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000
	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
	17.000				
	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000
	23.000	23.000	23.000	23.000	23.000
	verdeckter Kurvenbeginn nach CARD/1				
	verdeckter Kurvenbeginn nach CARD/1, Kurvenbeginn erahnbar				
	kein verdeckter Kurvenbeginn nach CARD/1				

Tab. 15: Auftreten des verdeckten Kurvenbeginns in Abhängigkeit der Kurvenrichtung, der Längsneigungsdifferenz, des Querschnitts, der Radiengröße und des Kuppenhalbmessers

beginn. Der Kuppenhalbmesser wurde so lange variiert, bis die Kurve erahnt werden konnte und bis nach CARD/1 kein verdeckter Kurvenbeginn mehr auftrat. Ein Auszug aus den Ergebnissen ist Tabelle 15 zu entnehmen. Die vollständige Tabelle ist im Anhang 11 dargestellt. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der verdeckte Kurvenbeginn unabhängig von der Längsneigungsdifferenz, vom Querschnitt und von der Kurvenrichtung auftritt. Hinsichtlich der Kurvenrichtung kann die Kurve in Rechtskurven im Vergleich zu Linkskurven eher erahnt werden. Nach CARD/1 sind jedoch die gleichen Kuppenhalbmessern unabhängig von der Kurvenrichtung erforderlich, um verdeckte Kurvenbeginne zu vermeiden. Demnach ist das Auftreten von verdeckten Kurvenbeginnen ausschließlich von der Radiengröße und dem Kuppenhalbmesser abhängig.

Für die Überprüfung der berechneten erforderlichen Verschiebungen des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn (Tabelle 14) wurden die entsprechenden Parameterkombinationen stichprobenartig in CARD/1 nachtrassiert und anhand der Sichtweiten-

bänder analysiert. Für alle Kombinationen wurde eine Linkskurve und eine Längsneigungsdifferenz von  $\Delta s = 4\%$  angenommen. Die Ergebnisse sind in Anhang 13 dargestellt. Aus diesen geht hervor, dass bei den berechneten Verschiebungen auch in den Sichtweitenbändern überwiegend keine verdeckten Kurvenbeginne angezeigt werden. Es traten nur vereinzelt verdeckte Kurvenbeginne auf. In diesen Fällen konnte die Kurve jedoch durch die Leitpfosten (Pfostenhöhe = 1,0 m) erahnt werden.

Alle in Tabelle 14 aufgeführten erforderlichen Verschiebungen des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn wurden noch einmal unter dem Aspekt überprüft, dass ein verdeckter Kurvenbeginn nach CARD/1 vorliegt, die Kurve im Perspektivbild jedoch durch erkennbare Leitpfosten (Pfostenhöhe = 1,0 m) erahnt werden kann. Dabei wurde stets eine Linkskurve und eine Längsneigungsdifferenz von  $\Delta s = 4\%$  angenommen. Aus der Untersuchung haben sich die in Tabelle 16 dargestellten erforderlichen Verschiebungen ergeben. Die dazugehörigen Perspektivbilder sind dem Anhang 11 zu entnehmen.

$H_k$ [m]	A [m]								
	150	200	250	300	350	400	450	500	
3.000		20	50	70	80	95	125	135	
4.000		15	40	55	60	80	115	120	
5.000		10	35	40	50	65	95	105	
6.000		5	25	25	35	50	80	90	
7.000			15	15	25	30	60	75	
8.000			5	5	15	20	45	60	
9.000						10	30	40	
10.000	keine Verschiebung erforderlich							15	25
11.000									5

Tab. 16: Erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn bei Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen zum Erahnen der Kurve [m]

Die erforderlichen Verschiebungen zum Erahnen der Kurve sind dabei, wie bereits angenommen, geringer. Die Differenzen zwischen den erforderlichen Verschiebungen des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn zur Vermeidung von verdeckten Kurvenbeginnen nach dem Modell von ZIMMERMANN (2001) und zum Erahnen der Kurve (Anhang 14) sind jedoch überwiegend unterschiedlich. Mit zunehmenden Kuppenhalbmessern nehmen die Differenzen zunächst zu und ab einem bestimmten Halbmesserwert wieder ab.

### Sichtschatten (Tauchen, Springen und Springen mit Versatz)

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Sichtschatten werden v. a. über Tabellen dargestellt. Diese enthalten Abkürzungen, die zu den entsprechenden Elementen der Achse und der Gradiente gehören. In Bild 66 sind die Parameterbezeichnungen dargestellt.

Sichtschatten treten bei entsprechender Streckencharakteristik nach Kuppen auf (siehe Kapitel 4.3.1). Daher wurde angenommen, dass in Bezug auf die Auftretenswahrscheinlichkeit von Sichtschatten, sich die Defizite Springen und Tauchen nicht unterscheiden. Es wurde demnach zunächst das Defizit Tauchen untersucht. Anschließend wurden stichprobenartig Untersuchungen zum Defizit Springen durchgeführt und die daraus erarbeiteten Ergebnisse mit denen des Defizits Tauchen verglichen.

Die Parameter der Elemente der Achse und der Gradiente wurden zwischen folgenden Werten variiert:

- Achse: Gerade ( $R = \infty$ ) oder  $R = 280$  m ( $A = 93,3$  m),

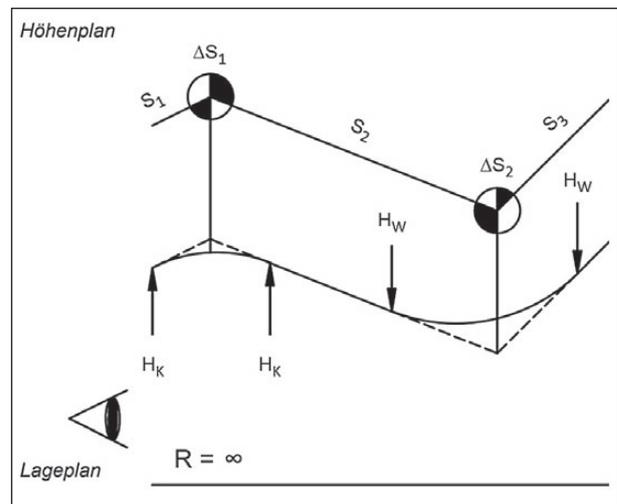


Bild 66: Parameterbezeichnungen Sichtschatten

- Gradiente:
  - Kuppenhalbmesser:  $H_k = 3.000$  m bis  $13.600$  m (Intervallschritte:  $100$  m),
  - Wannenthalbmesser:  $H_w = 2.600$  m bis  $6.700$  m (Intervallschritte:  $100$  m),
  - Abstand der Tangentschnittpunkte:  $300$  m oder  $400$  m,
  - Längsneigung:  $2\%$ ,  $4\%$ ,  $6\%$ .

Es wurde angenommen, dass die Größe, die Länge und die Ausrichtung (Rechts- oder Linkskurve) des Radius keinen Einfluss auf die Ausprägung der Sichtschatten haben. Daher wurden für diese Parameter beliebige Werte angenommen.

In der Gradiente liegt bei den Defiziten Tauchen und Springen die Elementfolge Kuppe – Wanne und somit zwei Tangentschnittpunkte und drei Tangen-

ten vor. Der Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten wurde zwischen 300 m und 400 m variiert. Kleinere Abstände sind nicht sinnvoll, da sich die Ausrundungstangenten der Kuppen bzw. Wannen überschneiden würden. Größere Abstände wären ebenfalls nicht sinnvoll, da in diesem Fall der Streckenverlauf nicht laut Definition (Kapitel 4.3.1) innerhalb von 600 m wieder erkennbar wäre. Bei den Längsneigungen der Tangenten wurden alle  $n = 27$  ( $n = 3^3$ ) möglichen Kombinationen trassiert und untersucht.

Die Ermittlung der Grenzwerte für das Auftreten von kritischen Sichtschatten erfolgte iterativ. Unter der Annahme

- eines Querschnitts,
- eines Achselements,
- einer Folge von Längsneigungen,
- eines Abstands der Tangentenschnittpunkte und
- eines Kuppenhalbmessers

wurde der Wannenhalmesser vom kleinsten Wert ( $H_W = 2.600$  m) beginnend schrittweise vergrößert, bis kein kritischer Sichtschatten mehr auftrat bzw. sich die Tangenten der Kuppe und der Wanne überschneiden. Im letzteren Fall wäre eine Vergrößerung des Abstandes der Tangentenschnittpunkte erforderlich gewesen. Dies war jedoch nicht sinnvoll, da das Fahrbahnband in diesem Fall erst mit einer größeren Entfernung als 600 m sichtbar geworden wäre.

Die Untersuchungen zu den Einflüssen des Querschnitts und der Lageplanelemente wurden anhand folgender Parameterkombination der Gradienten, welche beliebig gewählt wurde, durchgeführt:

- Längsneigung: 2 %, - 4 %, 2 % und
- Abstand der Tangentenschnittpunkte: 400 m.

Im Ergebnis wurden keine Einflüsse des Querschnitts und der Lageplanelemente (Bild 67, Bild 68) auf das Auftreten von kritischen Sichtschatten festgestellt (Anhang 15).

- Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Mindesttangentiallängen nach RAA und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 400 m

In Tabelle 17 sind die erforderlichen Wannenhalmesser zur Vermeidung von kritischen Sichtschatten in Abhängigkeit von dem Kuppenhalbmesser und der Längsneigung dargestellt. Die Tabelle stellt

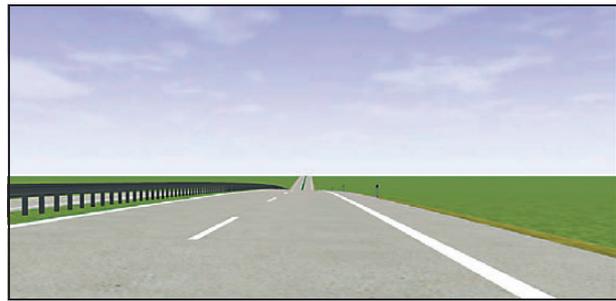


Bild 67: Tauchen mit  $H_K = 6.500$  m,  $H_W = 6.400$  m (LINKE, 2015)



Bild 68: Springen mit  $H_K = 6.500$  m,  $H_W = 6.400$  m (LINKE, 2015)

einen Ausschnitt der Untersuchungsergebnisse dar. Eine vollständige Auflistung ist dem Anhang 16 zu entnehmen. Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass die Längsneigung einen Einfluss auf das Auftreten von kritischen Sichtschatten hat. Zwischen den Längsneigungsdifferenzen-Gruppen (Tabelle 17, farbige Markierung) gibt es jedoch keine Unterschiede. Es sind stets die gleichen Wannenhalmesser erforderlich. Mit zunehmender Längsneigungsdifferenz  $\Delta s_2$  ist bereits bei kleineren Kuppenhalbmessern ein größerer Wannenhalmesser als  $H_W = 2.600$  m erforderlich, um kritische Sichtschatten vermeiden zu können. Ab welchem Kuppenhalbmesser eine größere Wanne als  $H_W = 2.600$  m erforderlich ist, variiert jedoch zwischen den Längsneigungsdifferenzen  $\Delta s_1$ . Ab dem Punkt, wo größere Wannenhalmesser als  $H_W = 2.600$  m erforderlich sind, nimmt mit zunehmendem Kuppenhalbmesser der Wert des erforderlichen Wannenhalmessers auch zu.

Die Tangentiallänge, der Halbmesser und die Längsneigungsdifferenzen sind voneinander abhängig (Anhang 5 der RAA). Daher ist je nach Mindesttangentiallänge der EKA nach den RAA und je nach Längsneigungsdifferenz ein unterschiedlicher Mindesthalbmesser für Kuppen und Wannen erforderlich (Tabelle 18). Die Ergebnisse aus Anhang 16 wurden dementsprechend angepasst, um Aussagen zu dem Auftreten von kritischen Sichtschatten bei den EKA treffen zu können.

$\Delta s_1 / \Delta s_2$ [%] $s_1 / s_2 / s_3$ [%] $H_K$	8 / 4 6 / - 2 / 2 $H_W$	8 / 6 6 / - 2 / 4 $H_W$	8 / 6 4 / - 4 / 2 $H_W$	8 / 8 6 / - 2 / 6 $H_W$	8 / 8 4 / - 4 / 4 $H_W$	8 / 8 2 / - 6 / 2 $H_W$
3.000	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
3.100	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
3.200	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
3.300	2.600	2.600	2.600	3.200	3.200	3.200
3.400	2.600	2.600	2.600	3.900	3.900	3.900
3.500	2.600	2.600	2.600	4.200	4.200	4.200
3.600	2.600	2.600	2.600	4.600	4.600	4.600
3.700	2.600	2.600	2.600	4.800	4.800	4.800
3.800	2.600	2.600	2.600	5.000	5.000	5.000
3.900	2.600	2.600	2.600	5.100	5.100	5.100
4.000	2.600	3.200	3.200	5.300	5.300	5.300
4.100	2.600	3.800	3.800	5.400	5.400	5.400

Tab. 17: Erforderliche Wannenhalmmesser zur Vermeidung kritischer Sichtschatten in Abhängigkeit des Kuppenhalmmessers und der Längsneigung, Abstand der Tangentenschnittpunkte: 400 m (nach LINKE, 2015)

$\Delta s$ [%]	4	6	8	10	12
T [m]					
100	5.000	3.333	2.500	2.000	1.667
120	6.000	4.000	3.000	2.400	2.000
150	7.500	5.000	3.750	3.000	2.500

Tab. 18: Erforderliche Halmmesser in Abhängigkeit der Tangentlänge und der Längsneigungsdifferenz

- Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von min  $T = 100$  m und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 400 m

In Anhang 17 ist eine Tabelle dargestellt, die die erforderlichen Wannenhalmmesser unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 100$  m enthält. Eine Mindesttangentiallänge von  $T = 100$  m ist nach den RAA für Straßen der EKA 2 und der EKA 3 erforderlich. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass unter Einhaltung der Maximal- bzw. Mindestparameter bzgl. der Längsneigung und den Halmmessern kritische Sichtschatten auftreten können. In diesem Fall ist je nach Längsneigung der entsprechende Kuppen- und Wannenhalmmesser anzupassen. Unabhängig von der Längsneigung und vom Kuppenhalmmesser ist jedoch maximal ein Wannenhalmmesser von  $H_W = 6.700$  m erforderlich, um kritische Sichtschatten vermeiden zu können.

- Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von min  $T = 120$  m und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 400 m

Die erforderlichen Wannenhalmmesser unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 120$  m sind in Anhang 18 aufgelistet. Nach den RAA ist diese Tangentiallänge für Straßen der EKA 1 B und als Ausnahme bei Um- und Ausbaumaßnahmen für Straßen der EKA 1 A einzuhalten. Unter Berücksichtigung der Höchstlängsneigung und der Mindesthalmmesser von Kuppen und Wannenhalmmessern nach den RAA (Tabelle 3) können kritische Sichtschatten bei Straßen der EKA 1 B nur bei sehr kleinen Längsneigungsdifferenzen ( $\Delta s_1 = 4$  %,  $\Delta s_2 = 4$  %) auftreten. Bei Kuppen von  $H_K = 10.000$  m ist mindestens eine Wanne von  $H_W = 6.000$  m erforderlich. Mit zunehmendem Kuppenhalmmesser nimmt auch der Wert des erforderlichen Wannenhalmmessers zu. Auf Straßen der EKA 1 A können unter Einhaltung der festgelegten Parameter nach den RAA keine kritischen Sichtschatten auftreten.

- Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von min  $T = 150$  m und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 400 m

Die erforderlichen Wannenhalmmesser unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 150$  m sind in Anhang 19 aufgelistet. Nach den RAA ist diese Tangentiallänge für Straßen der EKA 1 A einzuhalten. Werden die Höchstlängsneigung und die Mindesthalmmesser von Kuppen und Wannenhalmmessern nach den RAA (Tabelle 3) eingehalten, können auf Straßen der EKA 1 A keine kritischen Sichtschatten auftreten.

$\Delta s_1 / \Delta s_2$ [%]	4 / 6	6 / 6	6 / 8	8 / 6
$s_1 / s_2 / s_3$ [%]	2 / - 2 / 4	4 / - 2 / 4	4 / - 2 / 6	6 / - 2 / 4
$H_K$	$H_W$	$H_W$	$H_W$	$H_W$
3.000	0	0	2.000	500
3.100	400	0	2.100	1.000
3.200	900	400	2.200	1.400
3.300	1.200	900	-	1.500
3.400	1.600	1.300	-	1.800
3.500	1.800	1.600	-	2.000
3.600	2.000	1.800	-	2.100
3.700	2.200	2.100	-	2.200
3.800	2.400	2.200	-	2.300
3.900	2.600	2.400	-	-
4.000	2.700	2.500	-	-
4.100	2.800	2.600	-	-

Tab. 19: Differenzen zwischen den erforderlichen Wannenhalmessern bei einem Tangentenschnittpunktabstandes von 400 m und 300 m (nach LINKE, 2015)

- Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Mindesttangentiallängen nach RAA und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 300 m

Im Rahmen der Untersuchungen wurde auch der Abstand der Tangentenschnittpunkte variiert. In Anhang 20 sind die erforderlichen Wannenhalmesser zur Vermeidung von kritischen Sichtschatten dargestellt, die auf der Grundlage eines Tangentenschnittpunktabstandes von 300 m berechnet wurden. Im Vergleich zu den Ergebnissen, die auf der Grundlage eines Tangentenschnittpunktabstandes von 400 m berechnet wurden (Anhang 16), sind bereits bei kleineren Kuppenhalmessern größere Wannen als  $H_W = 2.600$  m erforderlich, um kritische Sichtschatten zu vermeiden. Die Differenz zwischen den erforderlichen Wannenhalmessern auf der Grundlage eines Tangentenschnittpunktabstandes von 400 m und 300 m ist stets unterschiedlich. Dies verdeutlicht beispielhaft Tabelle 19. Aus den Differenzen wird jedoch deutlich, dass mit zunehmendem Kuppenhalmesser auch die Differenz größer wird. Der erforderliche Wannenhalmesser steigt somit überproportional mit einem zunehmenden Kuppenhalmesser an. Der Anstieg ist jedoch auch nicht einheitlich.

Aus den Ergebnissen ergab sich weiterhin, dass weniger erforderliche Wannenhalmesser berechnet werden konnten, da es eher zu Überschneidungen zwischen den Tangenten der Kuppe und der Wanne kam. Alle anderen Zusammenhänge sind analog zu den Ergebnissen mit einem Tangentenschnittpunktabstand von 400 m.

Für die Analyse der erforderlichen Wannenhalmesser unter Berücksichtigung der für die EKA relevanten Mindesttangentiallängen, wurden die Ergebnisse wieder durch die in Tabelle 18 berechneten erforderlichen Halmesser angepasst.

- Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $\min T = 100$  m und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 300 m

Dem Anhang 21 sind die erforderlichen Wannenhalmesser unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $\min T = 100$  m zu entnehmen. Werden die nach den RAA geforderten Parameter für die Höchstlängsneigung und die Mindesthalmesser von Kuppen und Wannen für die Straßen der EKA 2 und der EKA 3 eingehalten, können für diese Straßen vor allem bei Längsneigungsdifferenzen von  $\Delta_s = 4$  % und  $\Delta_s = 6$  % kritische Sichtschatten auftreten. Es müssen somit je nach Längsneigung der entsprechende Kuppen- und Wannenhalmesser angepasst werden. Dabei nimmt mit zunehmendem Kuppenhalmesser auch der erforderliche Wannenhalmesser zu. Unabhängig von der Längsneigung und vom Kuppenhalmesser ist der größte erforderliche Wannenhalmesser  $H_W = 6.500$  m.

- Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $\min T = 120$  m und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 300 m

Die erforderlichen Wannenhalmesser unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 120$  m sind in Anhang 22 aufgelistet. Unter Einhaltung der Höchstlängsneigung und der Mindesthalmesser von Kuppen und Wannen für die Straßen der EKA 1 A und der EKA 1 B können für diese Straßen keine kritischen Sichtschatten auftreten.

- Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $\min T = 150$  m und einem Abstand zwischen den Tangentenschnittpunkten von 300 m

Die erforderlichen Wannenhalmesser unter Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 150$  m sind in Anhang 23 aufgelistet. Unter Einhaltung der Höchstlängsneigung und der Mindesthalmesser von Kuppen und Wannen für die Straßen der EKA 1 A können für diese Straßen keine kritischen Sichtschatten auftreten.

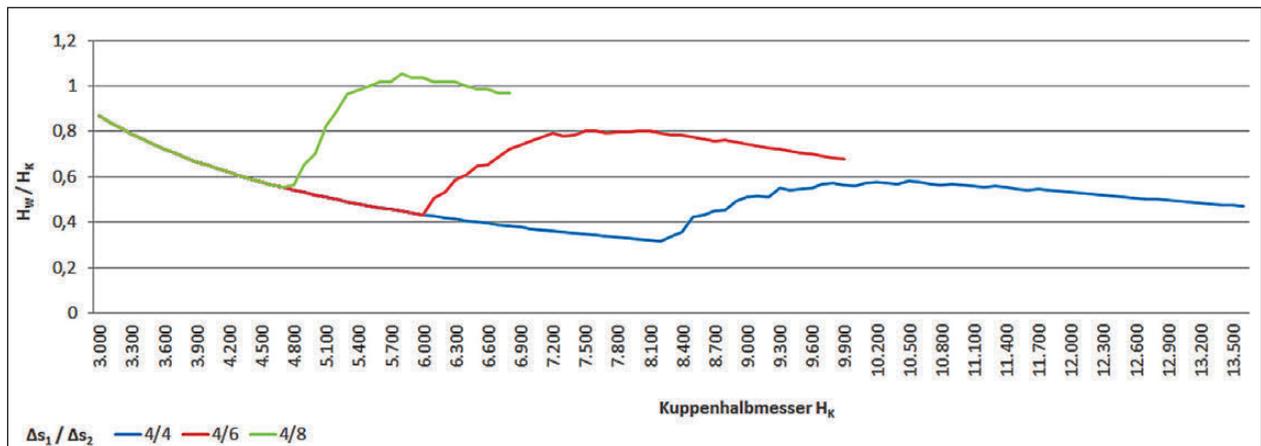


Bild 69: Verhältnisse  $H_W / H_K$  in Abhängigkeit des Kuppenhalbmessers, Auszug der Ergebnisse zu der Untersuchung ohne Berücksichtigung von Mindesttangentiallängen und einem Tangentschnittpunktabstand von 400 m (LINKE, 2015)

Untersuchung	$H_W / H_K$			absolute Anzahl n
	< 0,5	$0,5 \leq H_W / H_K < 1$	$\geq 1$	
ohne Berücksichtigung min $T^*$ , $\Delta TS^{**} = 400$ m	10,74	60,91	28,36	596
ohne Berücksichtigung min T, $\Delta TS = 300$ m	0,49	60,49	39,02	205
mit Berücksichtigung T = 100 m, $\Delta TS = 400$ m	1,57	54,72	43,70	508
mit Berücksichtigung T = 100 m, $\Delta TS = 300$ m	0,00	46,55	53,45	116
mit Berücksichtigung T = 120 m, $\Delta TS = 400$ m	1,79	43,30	54,91	448

\* Mindesttangentiallänge  
\*\* Tangentschnittpunktabstand

Tab. 20: Relative Häufigkeiten der Verhältniszahlen zwischen Wannen- und Kuppenhalbmesser in [%] (nach LINKE, 2015)

- Verhältnis zwischen Wannen- und Kuppenhalbmesser

Aus den Untersuchungsergebnissen ließen sich keine direkten Grenzwerte zur Vermeidung von kritischen Sichtschatten ableiten. Daher wurden die Verhältniszahlen zwischen den Wannen- und Kuppenhalbmessern gebildet. Dies erfolgte nicht für die Untersuchungen, bei denen eine Mindesttangentiallänge von  $T = 150$  m berücksichtigt wurde, sowie bei der Untersuchung, bei der eine Mindesttangentiallänge von  $T = 120$  m und ein Abstand zwischen den Tangentschnittpunkten von 300 m eingehalten wurde. Für Straßen der EKA 1 A und EKA 1 B traten unter diesen Annahmen keine kritischen Sichtschatten auf. Daher mussten diese nicht weiter analysiert werden. Die für die restlichen Untersuchungen dazugehörigen Verhältnistabellen sind den Anhängen Anhang 24 bis Anhang 28 zu entnehmen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass mit zunehmendem Kuppenhalbmesser der Verhältniszahl zunächst abfällt, anschließend stark ansteigt und daraufhin noch einmal abfällt. Mit zunehmenden Längsneigungsdifferenzen nehmen die Anstiege der Funktionen zu. Weiterhin

sind größere Maximalwerte zu verzeichnen. Diese Zusammenhänge sind in Bild 69 beispielhaft für die Untersuchung dargestellt, in der keine Mindesttangentiallängen berücksichtigt wurden und ein Tangentschnittpunktabstand von 400 m angenommen wurde.

In Tabelle 20 sind die relativen Häufigkeiten aller Verhältniszahlen zwischen Wannen- und Kuppenhalbmesser aufgeführt. Es wurden demnach keine Halbmesser und Längsneigungen herausgefiltert, die für eine bestimmte EKA einzuhalten sind. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Verhältnisse überwiegend größer gleich 0,5 sind. Der Anteil an Verhältnissen zwischen 0,5 und 1 sowie größer gleich 1 ist annähernd gleich bzw. bewegt sich um 50 %.

In Bild 70 und Bild 71 sind für die Untersuchungen, bei denen eine Mindesttangentiallänge berücksichtigt wurde, die Summenlinien zu den Verhältniszahlen dargestellt. Daraus geht hervor, dass bei kleinen Verhältnissen zwischen Wannen- und Kuppenhalbmesser nur wenige kritische Sichtschatten vermieden werden können. Je nachdem, wie hoch

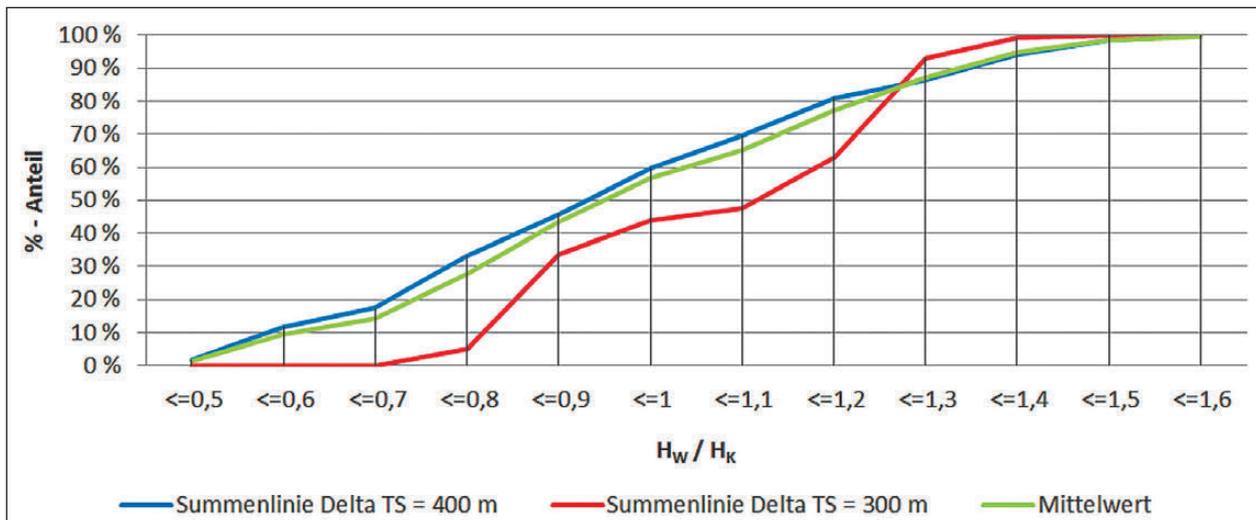


Bild 70: Summenlinie für die relativen Häufigkeiten der Verhältniswerte  $H_W / H_K$  der Untersuchung mit Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 100$  m (LINKE, 2015)

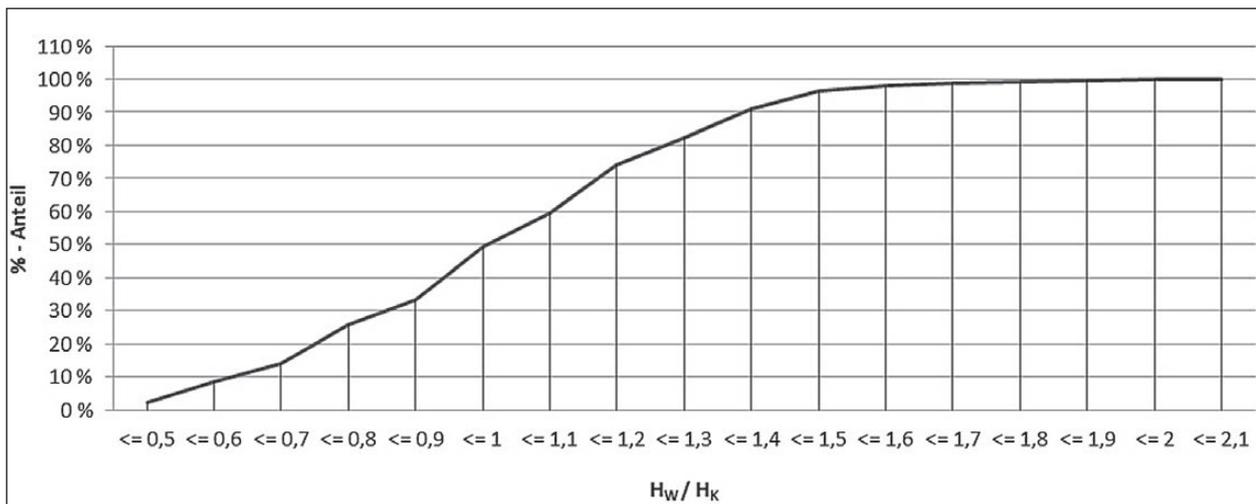


Bild 71: Summenlinie für die relativen Häufigkeiten der Verhältniswerte  $H_W / H_K$  der Untersuchung mit Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 120$  m und einem Tangentenschnittpunktabstand von 400 m (LINKE, 2015)

der Anteil an zu vermeidenden Sichtschatten sein soll, ist auch ein entsprechend hohes Verhältnis berücksichtigen.

- Befragung von Probanden

Die Grenzwerte der kritischen Sichtschatten wurden quantitativ ermittelt und unterlagen somit keinen subjektiven Eindrücken. Daher wurden keine Befragungen durchgeführt.

## 5.2.2 Gestalterische Defizite

### Flattern

Bei dem Defizit Flattern wurde zunächst die Kombination mit einer langen Geraden in der Achse untersucht. Für diese wurde eine Länge von  $L = 2.000$  m angenommen.

Die Parameter der Elemente der Gradienten wurden zwischen folgenden Werten variiert:

- Halbmesser: 2.600 m bis 15.000 m,
- Tangentiallänge: 50 m bis 520 m,
- Länge der Zwischengeraden: 0 m, 50 m, 100 m sowie
- Längsneigungsdifferenz: 2 % bis 12 %.

In Bezug auf die Halbmesser wurden neben gleichen Wannens- und Kuppenhalbmessern über einen Abschnitt auch unterschiedliche Wannens- im Vergleich zu Kuppenhalbmessern untersucht. Zur Vereinfachung wurden jedoch nicht unterschiedliche Wannens- bzw. Kuppenhalbmesser innerhalb eines Abschnittes verwendet.

Achse und Querschnitt	H <sub>w</sub> [m]	T von H <sub>w</sub> [m]	H <sub>k</sub> [m]	T von H <sub>k</sub> [m]	Δ <sub>s</sub> [%]	ZG [m]
Gerade mit L = 2.000 m und RQ25	5.000	100	5.000	100	4	0
	5.000	100	5.000	100	4	50
	5.000	50	10.000	100	2	0
	5.000	50	7.500	75	2	0
	4.000	80	6.000	120	4	0
	7.500	75	7.500	75	2	0
	7.500	75	10.000	100	2	0
	5.500	110	5.500	110	4	0
	11.000	110	11.000	110	2	0
	12.000	120	12.000	120	2	0
	13.000	130	13.000	130	2	0
	1.350	54	1.350	54	8	100
	2.500	50	2.500	50	4	100
	2.500	50	5.000	100	4	50
8.800	352	13.000	520	8	0	
15.000	150	15.000	150	2	0	
13.000	260	13.000	260	4	0	
Gerade mit L = 2.000 m und RQ36	88.00	352	13.000	520	8	0
	13.000	130	13.000	130	2	0
	15.000	150	15.000	150	2	0
	13.000	260	13.000	260	4	0
Legende: H <sub>w</sub> Wannenhalmmesser T Tangentenlänge H <sub>k</sub> Kuppenhalmmesser ds Längsneigungsdifferenz ZG Zwischengerade zwischen Kuppe und Wanne						

Tab. 21: Parameterkombinationen des Defizits Flattern

Die 100 untersuchten Parameterkombinationen sind dem Anhang 29 und die relevanten dazugehörigen Perspektivbilder dem Anhang 11 zu entnehmen.

Als Bezugspunkt wurde analog zu KÜHN et al. (2007) der der ersten Wanne voraus liegende Neigungswechsel gewählt. Der Visualisierungsstandpunkt befindet sich 300 m vor dem Bezugspunkt.

Bei jeder Parameterkombination wurde untersucht, ob Sichtschatten vorliegen. Dieses Kriterium grenzt das Defizit Flattern von dem Defizit Sichtschatten ab. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass ausschließlich bei 21 Kombinationen keine Sichtschatten vorhanden waren und das Defizit Flattern abgebildet werden konnte (Tabelle 21). Weiterhin konnte kein System zwischen den Parametern ermittelt werden, wann der Übergang zwischen den Defiziten Flattern und Sichtschatten erfolgt. Auch konnten keine Zusammenhänge innerhalb der Parameterkombinationen festgestellt werden, die sich für eine

RQ	H <sub>w</sub> [m]	H <sub>k</sub> [m]	Δ <sub>s</sub> [%]	ZG [m]	Bild-Nr.
25	8.800	13.000	8	0	001091001
25	15.000	15.000	2	0	001092001
25	13.000	13.000	4	0	001093001
36	8.800	13.000	8	0	002002001
36	15.000	15.000	2	0	002006001
36	13.000	13.000	4	0	002007001

Tab. 22: Bilder für Dominanzpaarvergleich Flattern, Präsentation 1

RQ	H <sub>w</sub> [m]	H <sub>k</sub> [m]	Δ <sub>s</sub> [%]	ZG [m]	Bild-Nr.
25	5.000	5.000	4	0	001020001
25	5.000	5.000	4	50	001034001
25	4.000	6.000	4	0	001050001
25	5.500	5.500	4	0	001070001
25	2.500	2.500	4	100	001088001
25	2.500	5.000	4	50	001090001

Tab. 23: Bilder für Dominanzpaarvergleich Flattern, Präsentation 2

Grenzwertermittlung des Defizits Flatterns eignen. Daher wurde ausschließlich ein Dominanzpaarvergleich mit ausgewählten Bildern, zwischen denen Zusammenhänge vermutet wurden, durchgeführt, um allgemeine Aussagen über die Wahrnehmung zu treffen.

- Dominanzpaarvergleich

Für den Dominanzpaarvergleich wurden zwei Präsentationen mit je sechs Bildern angefertigt (Tabelle 22 und Tabelle 23). Die Bilder sind im Anhang 30 noch einmal dargestellt.

Der Fragebogen zur Präsentation 1 wurde von 44 Probanden beantwortet. Dabei setzt sich das Probandenkollektiv wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 72,7 %
  - weiblich: 27,3 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 45,5 %
  - 25 - 45 Jahre: 50 %
  - > 45 Jahre: 4,5 %

- höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 59,1 %
  - Berufsausbildung: 6,8 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 34,1 %
- 100 % im Besitz eines Führerscheins

Demnach besteht das Kollektiv vorrangig aus männlichen jungen Erwachsenen bzw. Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Mit 54,5 % fahren die meisten Probanden weniger als 6.000 km Auto im Jahr. Es fahren weiterhin

- 6.000 km bis 10.000 km: 20,5 %,
- 10.000 km bis 20.000 km: 18,2 % und
- 20.000 km bis 30.000 km: 6,8 %.

Die Probanden sind zu 45,5 % weniger als 20 %, zu 34,1 % 20 % bis 50 % und zu 20,4 % mehr als 50 % der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

In der Summe ergaben sich aus der Befragung die in Tabelle 24 aufgeführten Häufigkeiten, d. h. wie oft das jeweilige Bild im Vergleich zu den anderen als welliger empfunden wurde.

Aus der Befragung geht hervor, dass bei gleichen Entwurfparametern in der Gradienten das Defizit Flattern bei einem breiteren Querschnitt stärker wahrgenommen wird. Dieser Effekt trat nicht bei der Parameterkombination  $H_W = 8.800$  m,  $H_K = 13.000$  m und  $s = 8$  % auf (Tabelle 24). Werden aus den Ergebnissen ausschließlich die herausgefiltert, bei denen die Querschnitte bei gleichen Gradientenparametern verglichen werden sollten, ergeben sich die in Tabelle 25 aufgeführten Häufigkeiten. Aus diesen wird es noch einmal deutlicher, dass das Defizit Flattern bei gleichen Gradientenparametern mit einem breiteren Querschnitt stärker wahrgenommen wird (Bild 72).

Aus den Ergebnissen lassen sich keine Schlussfolgerungen über die Wahrnehmung des Defizits mit zunehmenden Werten der Halbmesser bzw. der Längsneigung treffen. Es kann ausschließlich abgeleitet werden, dass bei großen Halbmessern in Kombination mit geringen Längsneigungen das Defizit Flattern stärker wahrgenommen wird (Tabelle 24 und Bild 73).

RQ	$H_W$ [m]	$H_K$ [m]	$\Delta s$ [%]	ZG [m]	Häufigkeiten
25	8.800	13.000	8	0	93
25	15.000	15.000	2	0	112
25	13.000	13.000	4	0	100
36	8.800	13.000	8	0	89
36	15.000	15.000	2	0	131
36	13.000	13.000	4	0	132
Bilder gleich empfunden					2
keine Angaben					1
<b>Summe</b>					<b>660</b>

Tab. 24: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zum Flattern – Präsentation 1

RQ	$H_W$ [m]	$H_K$ [m]	$\Delta s$ [%]	ZG [m]	Häufigkeiten
25	8.800	13.000	8	0	21
25	15.000	15.000	2	0	18
25	13.000	13.000	4	0	15
36	8.800	13.000	8	0	22
36	15.000	15.000	2	0	24
36	13.000	13.000	4	0	29
Bilder gleich empfunden					2
keine Angaben					1
<b>Summe</b>					<b>132</b>

Tab. 25: Vergleich zwischen den RQ bei gleichen Gradientenparametern

Die Perspektivbilder der Präsentation 2 wurden von 45 Probanden beantwortet. Das Probandenkollektiv setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 71,1 %
  - weiblich: 28,9 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 44,5 %
  - 25 - 45 Jahre: 51,1 %
  - > 45 Jahre: 4,4 %
- höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 57,8 %
  - Berufsausbildung: 6,7 %

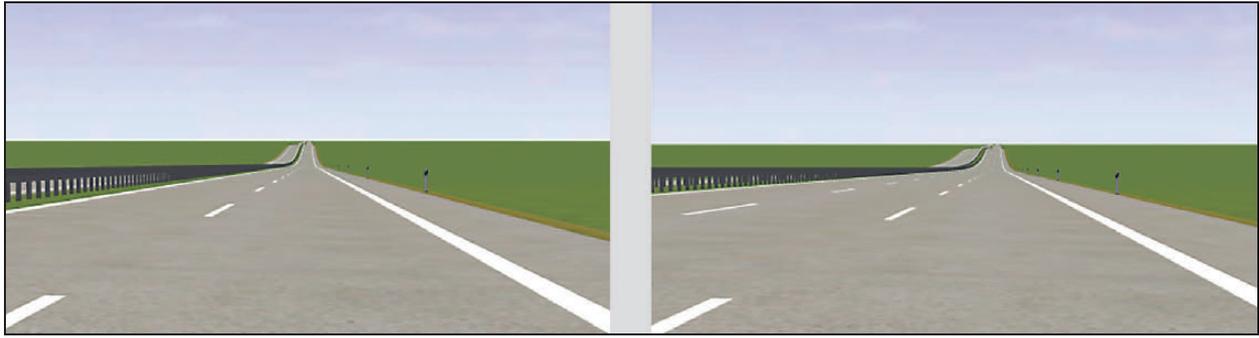


Bild 72: RQ 25 (links) und RQ 36 (rechts) mit  $H_W = H_K = 13.000$  m,  $s = 4$  %



Bild 73: RQ 25 mit  $H_W = 8.800$  m,  $H_K = 13.000$  m,  $s = 8$  % (links) und  $H_W = H_K = 15.000$  m,  $s = 2$  % (rechts)

RQ	$H_W$ [m]	$H_K$ [m]	$\Delta s$ [%]	ZG [m]	Häufigkeiten
25	5.000	5.000	4	0	116
25	5.000	5.000	4	50	99
25	4.000	6.000	4	0	93
25	5.500	5.500	4	0	103
25	2.500	2.500	4	100	105
25	2.500	5.000	4	50	144
Bilder gleich empfunden					15
keine Angaben					0
<b>Summe</b>					<b>675</b>

Tab. 26: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zum Flattern – Präsentation 2

- (Fach-)Hochschulabschluss: 35,5 %

- 100 % im Besitz eines Führerscheins.

Das Probandenkollektiv setzt sich daher überwiegend aus männlichen jungen Erwachsenen bzw. Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Die Probanden fahren mit 53,3 % weniger als 6.000 km Auto im Jahr. Außerdem fahren

- 6.000 km bis 10.000 km: 17,8 %,

- 10.000 km bis 20.000 km: 22,2 % und
- 20.000 km bis 30.000 km: 6,7 %.

Davon sind

- 42,2 % weniger als 20 %,
- 37,8 % zwischen 20 % bis 50 % und
- 20 % mehr als 50 %

der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

Aus den Ergebnissen der Befragung resultieren die in Tabelle 26 aufgeführten Bewertungen der zu bewertenden Bilder. Es lassen sich jedoch keine sinnvollen Zusammenhänge ableiten.

Bei den Untersuchungen zum Flattern in der Geraden konnten für die Grenzwertermittlung keine sinnvollen Kombinationen in Bezug auf die Entwurfsparameter ermittelt werden. Daher wurden keine Untersuchungen zur Method of Adjustment durchgeführt und die Annahme getroffen, dass der gleiche Effekt auch bei dem Flattern in der Kurve (langer Kreisbogen) auftritt.

### Knickwirkung im Lageplan

Die Knickwirkung im Lageplan kann sowohl in einer Rechts- als auch in einer Linkskurve auftreten. Aus ersten Untersuchungen ging hervor, dass die Dar-



Bild 74: Verdeckte Linkskurve durch passive Schutzeinrichtungen



Bild 75: Rechtskurve mit RQ 36, R = 720 m, A = 240 m und L = 75 m

RQ	R [m]	A [m]	Bild-Nr.
25	280	93,33	109001001
25	900	300	124001001
25	1.300	433,33	135001001
25	600	200	127001001
25	500	166,67	128001001
25	1.100	366,67	134001001

Tab. 27: Bilder für Dominanzpaarvergleich Knickwirkung im Lageplan

stellung der Knickwirkung im Lageplan in der Linkskurve und damit auch deren Grenzwertermittlung nicht sinnvoll ist, da die Linkskurve durch die passiven Schutzeinrichtungen verdeckt wird (Bild 74).

Daher wurden ausschließlich Untersuchungen zur Knickwirkung im Lageplan in der Rechtskurve durchgeführt. In der Gradienten wurde eine konstante Längsneigung angeordnet. Bei dem Achsentwurf wurde der Radius zwischen  $R = 200$  m und  $R = 1.300$  m variiert. Die Länge des Radius entsprach stets der nach den RAA vorgesehenen Mindestlänge (EKA 3: min L = 55 m). Für den Klothoidenparameter wurde stets ein Drittel des Kreisbogenradius gewählt. Als Querschnitt wurde ausschließlich der RQ 25 angenommen, da bei der Anwendung eines RQ 36 nach den RAA größere Mindestparameter gefordert werden. Deren Werte sind so groß, dass

keine Knickwirkung im Lageplan erzeugt werden kann (Bild 75).

Es wurden 35 Parameterkombinationen untersucht. Diese sind im Anhang 31 dargestellt. Dem Anhang 11 sind die dazugehörigen Perspektivbilder zu entnehmen.

Als Bezugspunkt wurde entsprechend der Ergebnisse von KÜHN et al. (2007) der Kurvenmittelpunkt gewählt. Der Visualisierungsstandpunkt befindet sich 200 m vor dem Kurvenmittelpunkt.

- Dominanzpaarvergleich

Es wurde eine Präsentation mit sechs Bildern für den Dominanzpaarvergleich erarbeitet (Tabelle 27). Die Perspektivbilder sind im Anhang 32 noch einmal dargestellt.

Der Fragebogen zum Dominanzpaarvergleich wurde von 63 Probanden ausgefüllt. Das Probandenkollektiv setzt sich wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 71,4 %
  - weiblich: 28,6 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 36,5 %
  - 25 - 45 Jahre: 52,4 %
  - > 45 Jahre: 11,1 %
- höchster Bildungsabschluss
  - mittlere Reife: 3,2 %
  - (Fach-)Abitur: 38,1 %
  - Berufsausbildung: 4,8 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 50,8 %
  - keine Angabe: 3,1 %
- Besitz eines Führerscheins
  - ja: 93,7 %
  - nein: 6,3 %

Das Probandenkollektiv bestand überwiegend aus männlichen jungen Erwachsenen bzw. Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Mit 39,7 % fahren die meisten Probanden weniger als 6.000 km Auto im Jahr. Es fahren zudem

RQ	R [m]	A [m]	Häufigkeiten	Rang
25	280	93,33	230	1
25	900	300	131	4
25	1.300	433,33	85	6
25	600	200	185	3
25	500	166,67	212	2
25	1.100	366,67	101	5
Bilder gleich empfunden			0	
keine Angaben			1	
<b>Summe</b>			<b>945</b>	

Tab. 28: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zum Defizit Knick im Lageplan

- 23,8 % zwischen 6.000 km und 10.000 km,
- 27 % zwischen 10.000 km und 20.000 km und
- 3,2 % zwischen 20.000 km und 30.000 km.

Es wurden von 6,3 % der Probanden keine Angaben gemacht. Weiterhin sind die Probanden zu

- 4,8 % nicht,
- 31,7 % weniger als 20 %,
- 33,3 % zwischen 20 % bis 50 % und
- 23,8 % mehr als 50 %

der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs. Von 6,4 % der Probanden wurden zu dieser Thematik keine Angaben gemacht.

Aus der Befragung ergaben sich in der Summe für die Perspektivbilder die in Tabelle 28 aufgeführten Häufigkeiten.

Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, dass mit kleiner werdendem Radius eine stärkere Knickwirkung empfunden wurde. Demnach wurde die Rangreihe aufsteigend mit größer werdendem Radius definiert (Tabelle 28).

- Method of adjustment

Das Kollektiv der Perspektivbilder wurde auf der Grundlage von 30 verschiedenen Parameterkombinationen erstellt. Die Radien wurden im Bereich von  $R = 100$  m bis  $R = 1.500$  m variiert, wobei folgende Intervallschritte gewählt wurden:

- $\Delta R = 100$  m ( $R = 100$  m bis  $R = 500$  m und  $R = 700$  m bis  $R = 1.500$  m) und

Bilder-Gruppe	R [m]
uPB	620
PvF	660
aPB	580

Tab. 29: Radiengrößen, die als Grenzwert bzgl. der Knickwirkung im Lageplan angegeben wurden

- $\Delta R = 10$  m ( $R = 550$  m bis  $R = 700$  m).

Für alle 30 Parameterkombinationen wurden die in Kapitel 4.3.2 erläuterten Varianten erstellt (siehe Anhang 11) und in eine Präsentation eingearbeitet. Weiterhin wurde ein Fragebogen erarbeitet.

Es haben 12 Probanden die erstellten Perspektivbilder bewertet. Das Probandenkollektiv setzt sich dabei wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 58,3 %
  - weiblich: 41,7 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 16,7 %
  - 25 - 45 Jahre: 83,3 %
  - höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 58,3 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 41,7 %
- 100 % im Besitz eines Führerscheins

Das Probandenkollektiv besteht überwiegend aus männlichen Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-) Hochschulabschluss besitzen. Die Probanden fahren zu

- 41,7 % weniger als 6.000 km
- 16,6 % zwischen 6.000 km und 10.000 km und
- 41,7 % zwischen 10.000 km und 20.000 km

Auto im Jahr. Es sind 16,7 % weniger als 20 %, zu 50 % 20 % bis 50 % und zu 33,3 % mehr als 50 % der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

Die in Tabelle 29 angegebenen Radiengrößen gingen aus der Befragung als Grenzwerte für das Defizit der Knickwirkung im Lageplan hervor, d. h. ab welchem Radius gerade so ein Knick wahrgenommen werden kann. Die absoluten Häufigkeiten sind dem Anhang 33 zu entnehmen.

Bei der Bewertung der Grenzwerte ist zu beachten, dass für den Wert des Klothoidenparameters stets ein Drittel des Kreisbogenradius angesetzt wurde. Begründet wird diese Annahme damit, dass bei großen Radien, wie sie bei Autobahnen gegeben sind, vorrangig kleine Klothoidenparameter gewählt werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Verwendung von größeren Klothoidenparametern erst bei kleineren Radien eine Knickwirkung wahrgenommen wird.

Nach Tabelle 29 liegt eine Knickwirkung im Lageplan ab einer Radiengröße von  $R = 620$  m vor. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Veränderungen im Fahrraum einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Defizits haben. Es wird bereits bei größeren Radien ( $R = 660$  m) ein Knick wahrgenommen. Bei den abstrakten Perspektivbildern wird erst später ( $R = 580$  m) eine Knickwirkung im Lageplan empfunden. Die Grenzwerte der Bilder-Gruppen PvF und aPB weichen stark ( $\Delta R = 40$  m) von der Bilder-Gruppe uPB ab. Diese liegt jedoch zwischen beiden Gruppen. Dieser kann unter dem Vorbehalt, dass er ausschließlich als Richtwert anzusehen ist, als Mindestradius angegeben werden, um Knickwirkungen im Lageplan zu vermeiden. Mit  $R = 620$  m liegt der Grenzwert weit höher als die in der RAA angegebenen Mindestradien für Straßen der EKA 3 und der EKA 2. Er ist jedoch geringer als die Mindestradien für Straßen der EKA 1 A und der EKA 1 B. Bei dem Entwurf von Straßen der EKA 3 und der EKA 2 ist daher aus Gründen einer ausgewogenen räumlichen Linienführung auf einen Mindestradius von  $R = 620$  m zu achten, wenn eine Überlagerung von einer konstanten Längsneigung in der Gradiente und einer Elementfolge Gerade – Radius – Gerade in der Achse vorliegt.

### Knickwirkung im Höhenplan

Die Untersuchungen zur Knickwirkung im Höhenplan zeigten, dass ausschließlich eine Grenzwertermittlung für die Knickwirkung mit einer Wanne sinnvoll ist. Die Knickwirkung mit einer Kuppe ist für Autobahnen unter Einhaltung der Entwurfsparemeter nach den RAA nicht darstellbar (Bild 76).

Aus diesem Grund wurde ausschließlich die Knickwirkung mit einer Wanne untersucht. Dafür wurden in der Achse eine  $L = 2.000$  m lange Gerade angeordnet und folgende Parameter variiert:

- Wannenhalmmesser: 1.667 m bis 14.000 m,
- Tangentenlänge: 26 m bis 600 m,



Bild 76: Kuppe mit  $T = 100$  m und  $H_K = 1.667$  m

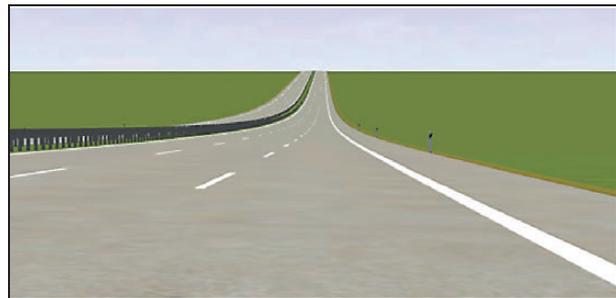


Bild 77: Wanne mit RQ 36,  $H_W = 8.800$  m,  $T = 352$  m und  $\Delta s = 8$  %

- Längsneigungsdifferenz: 2 % bis 12 % und
- Querschnitt: RQ 25 oder RQ 28.

Der RQ 36 wurde nicht noch einmal separat untersucht, da mit dessen Anwendung auch größere Mindestparameter nach den RAA gefordert werden. Deren Werte sind so groß, dass keine Knickwirkung im Höhenplan erzeugt werden kann (Bild 77).

Es wurden 65 Parameterkombinationen untersucht. Diese sind dem Anhang 34 und die dazugehörigen Perspektivbilder dem Anhang 11 zu entnehmen.

Der Neigungswechsel der Wanne wurde analog zu KÜHN et al. (2007) als Bezugspunkt gewählt. Der Visualisierungsstandpunkt befand sich 350 m vor dem Neigungswechsel der Wanne.

Für die Grenzwertermittlung wurden die in Tabelle 30 aufgeführten Parameterkombinationen ausgewählt.

- Dominanzpaarvergleich

Für den Dominanzpaarvergleich wurden zwei Präsentationen mit je sechs aus den relevanten Parameterkombinationen ausgewählten Bildern erarbeitet (Tabelle 30, Präsentation 1: grüne Markierung, Präsentation 2: rote Markierung). Die Bilder sind im Anhang 35 noch einmal dargestellt.

Der Fragebogen zur Präsentation 1 wurde von 44 Probanden beantwortet. Dabei setzt sich das Probandenkollektiv wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 72,7 %
  - weiblich: 27,3 %

RQ	H <sub>w</sub> [m]	T [m]	Δs [%]	Bild-Nr.
25	1.667	100	12	003001001
25	2.000	120	12	003002001
25	2.333	140	12	003003001
25	2.500	150	12	003004001
25	2.600	156	12	003005001
25	2.667	160	12	003006001
25	3.000	180	12	003007001
25	3.333	200	12	003008001
25	2.000	80	8	004001001
25	2.250	90	8	004002001
25	2.500	100	8	004003001
25	2.750	110	8	004005001
25	3.000	120	8	004006001
25	3.250	130	8	004007001
25	3.500	140	8	004008001
25	3.750	150	8	004009001
25	2.600	52	4	005001001
25	3.500	70	4	005002001
25	4.500	90	4	005003001
25	5.000	100	4	005004001
25	5.500	110	4	005005001
25	6.000	120	4	005006001
25	6.500	130	4	005007001
25	7.000	140	4	005008001
25	7.000	70	2	006003001
25	8.000	80	2	006004001
25	9.000	90	2	006005001
25	10.000	100	2	006006001
25	11.000	110	2	006007001
25	12.000	120	2	006008001
25	13.000	130	2	006009001
25	14.000	140	2	006010001

Tab. 30: Relevante Parameterkombinationen des Defizits Knickwirkung im Höhenplan

- Alter
  - < 25 Jahre: 45,5 %
  - 25 - 45 Jahre: 50 %
  - > 45 Jahre: 4,5 %
- höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 59,1 %
  - Berufsausbildung: 6,8 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 34,1 %
- 100 % im Besitz eines Führerscheins

Demnach besteht das Kollektiv vorrangig aus männlichen jungen Erwachsenen bzw. Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Mit 54,5 % fahren die meisten Probanden weniger als 6.000 km Auto im Jahr. Es fahren

- 20,5 % zwischen 6.000 km und 10.000 km,
- 18,2 % zwischen 10.000 km und 20.000 km und
- 6,8 % zwischen 20.000 km und 30.000 km

Auto im Jahr. Weiterhin sind die Probanden zu 45,5 % weniger als 20 %, zu 34,1 % 20 % bis 50 % und zu 20,5 % mehr als 50 % der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

Aus der Befragung ergaben sich in der Summe die in Tabelle 31 aufgeführten Häufigkeiten, d. h. wie oft auf dem jeweiligen Bild im Vergleich zu den anderen eine stärkere Knickwirkung empfunden wurde.

RQ	H <sub>w</sub> [m]	T [m]	Δs [%]	Häufigkeiten
25	2.000	120	12	146
25	2.500	150	12	119
25	3.000	180	12	84
25	2.250	90	8	139
25	3.000	120	8	117
25	3.500	140	8	51
Bilder gleich empfunden				4
keine Angaben				0
<b>Summe</b>				<b>660</b>

Tab. 31: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zur Knickwirkung im Höhenplan – Präsentation 1

Innerhalb einer Längsneigungsdifferenzen-Gruppe wurde stets mit kleiner werdendem Wannenhalmmesser eine stärkere Knickwirkung empfunden. Daher werden die Perspektivbilder für die Method of Adjustment in Längsneigungsdifferenzen-Gruppen unterteilt und nach der Größe des Wannenhalmmessers sortiert.

Die Perspektivbilder der Präsentation 2 wurden von 45 Probanden bewertet. Das Probandenkollektiv setzt sich dabei wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 71,1 %
  - weiblich: 28,9 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 44,5 %
  - 25 - 45 Jahre: 51,1 %
  - > 45 Jahre: 4,4 %
- höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 57,8 %
  - Berufsausbildung: 6,7 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 35,5 %
- 100 % im Besitz eines Führerscheins

Das Probandenkollektiv besteht überwiegend aus männlichen jungen Erwachsenen bzw. Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Die Probanden fahren mit 53,3 % weniger als 6.000 km Auto im Jahr.

Es fahren

- 17,8 % zwischen 6.000 km und 10.000 km,
- 22,2 % zwischen 10.000 km und 20.000 km und
- 6,7 % zwischen 20.000 km und 30.000 km

Auto im Jahr. Es sind 42,2 % weniger als 20 %, zu 37,8 % 20 % bis 50 % und zu 20 % mehr als 50 % der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

In Tabelle 32 sind die aufsummierten Häufigkeiten für die Bilder angegeben.

Analog zur Präsentation 1 geht auch aus diesen Ergebnissen hervor, dass innerhalb einer Längsneigungsdifferenzen-Gruppe stets mit kleiner werden-

RQ	H <sub>w</sub> [m]	T [m]	Δs [%]	Häufigkeiten
25	3.500	70	4	187
25	5.500	110	4	149
25	6.500	130	4	132
25	7.000	70	2	89
25	9.000	90	2	83
25	12.000	120	2	33
Bilder gleich empfunden				2
keine Angaben				0
<b>Summe</b>				<b>675</b>

Tab. 32: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zur Knickwirkung im Höhenplan – Präsentation 2

dem Wannenhalmmesser eine stärkere Knickwirkung empfunden wurde. Daher werden auch diese Perspektivbilder für die Method of Adjustment in Längsneigungsdifferenzen-Gruppen unterteilt und nach der Größe des Wannenhalmmessers sortiert.

- Method of adjustment

Für die Untersuchungen anhand der Method of Adjustment wurde zunächst das Kollektiv an Perspektivbildern erweitert. Es wurden für die in Tabelle 33 gekennzeichneten Parameterkombinationen Perspektivbilder erstellt.

Die erstellten Perspektivbilder wurden anschließend entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4.4 modifiziert (siehe Anhang 11). Für die Probandenbefragung wurden schließlich für alle Perspektivbilder eine Präsentation und ein dazugehöriger Fragebogen erarbeitet.

An der Befragung haben 12 Probanden teilgenommen. Das Kollektiv setzt sich wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 67 %
  - weiblich: 33 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 25 %
  - 25 - 45 Jahre: 75 %
- höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 58 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 42 %

T [m]	$\Delta s$ [%]		
	12	8	4
350	X		
330	X	X	
310	X	X	
290	X	X	
270	X	X	
250	X	X	
240	X		
230	X	X	X
220	X	X	
210	X	X	X
200	X	X	
190	X	X	X
180	X	X	
170	X	X	X
160	X	X	X
150	X	X	X
140		X	X
130	X	X	X
120			X
110	X	X	X
100			X
90	X	X	X
80			X
70	X	X	X
50	X	X	X
30		X	X

Tab. 33: Parameterkombinationen zum Knick im Höhenplan für die Method of Adjustment

- 100 % im Besitz eines Führerscheins

Das Probandenkollektiv besteht überwiegend aus männlichen Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-) Hochschulabschluss besitzen.

Die Probanden fahren zu

- 42 % weniger als 6.000 km
- 25 % zwischen 6.000 km und 10.000 km und
- 33 % zwischen 10.000 km und 20.000 km

Auto im Jahr. Es sind 42 % weniger als 20 %, zu 33 % 20 % bis 50 % und zu 25 % mehr als 50 % der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

Bilder-Gruppe	$\Delta s$ [%]	T [m]	$H_w$ [m]
uPB	12	210	3.500
PvF	12	220	3.667
aPB	12	210	3.500
uPB	8	190	4.750
PvF	8	200	5.000
aPB	8	170	4.250
uPB	4	140	7.000
PvF	4	140	7.000
aPB	4	120	6.000

Tab. 34: Tangentenlängen, die als Grenzwert bzgl. der Knickwirkung im Höhenplan angegeben wurden

$H_w$ [m]	$\Delta s$ [%]		
	12	8	4
<b>3.500</b>	210	140	70
<b>4.750</b>	285	190	95
<b>7.000</b>	420	280	140
n	Ergebnisse der Bilder-Gruppe der unveränderten Perspektivbilder (uPB)		

Tab. 35: Tangentenlängen in Abhängigkeit des Wannenhalmessers und der Längsneigungsdifferenz

$\Delta s$ [%]	T [m]	$H_w$ [m]
12	210	3.500
8	190	4.750
4	140	7.000

Tab. 36: Grenzwerte des Defizits Knickwirkung im Höhenplan

Aus der Untersuchung gingen die in Tabelle 34 angegebenen Tangentenlängen hervor, ab welchen gerade so ein Knick im Höhenplan wahrgenommen wurde. Die absoluten Häufigkeiten sind dem Anhang 36 zu entnehmen.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass mit zunehmender Längsneigungsdifferenz bereits bei größeren Tangentenlängen eine Knickwirkung wahrgenommen wird. Dieser Zusammenhang soll noch einmal durch die Tabelle 35 verdeutlicht werden. Diese stellt die Ergebnisse der Bilder-Gruppe der unveränderten Perspektivbilder dar. Auf der Grundlage der aus den Untersuchungen resultierenden Grenzwerte der Wannenhalmesser wurden die dazugehörigen Tangentenlängen in Abhängigkeit der Längsneigungsdifferenz berechnet.

Aus der Befragung ergab sich auch, dass die Gestaltung des Fahrraums einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Knickwirkung hat. Es wird bereits bei größeren Wannenhalmessern ein Knick wahrgenommen. Bei den abstrakten Perspektivbildern wird im Vergleich zu den unveränderten Perspektivbildern erst später, d. h. bei kleineren Halbmessern ein Knick wahrgenommen. Die angegebenen Tangentenlängen weichen jedoch sowohl bei der Bildergruppe PvF als auch bei der Gruppe aPB gar nicht oder nur gering von der Gruppe der unveränderten Perspektivbilder ab. Der Einfluss ist somit unerheblich. Daher sind die Ergebnisse von den unveränderten Perspektivbildern relevant (Tabelle 36).

Die Grenzwerte des Defizits Knickwirkung im Höhenplan, d. h. die in Tabelle 36 aufgeführten Mindesttangentiallängen und Mindesthalbmesser von Wannern, liegen je nach Entwurfsklasse der RAA höher als die in den RAA festgelegten (Tabelle 3). Daher ist bei dem Entwurf von Autobahnen darauf zu achten, dass bei der Elementkombination von Gerade im Lageplan und Wanne im Höhenplan auf ausreichende Tangentiallängen bzw. Wannenhalmesser je nach Längsneigungsdifferenz angeordnet werden. Als Richtwerte werden die in Tabelle 36 aufgeführten Werte empfohlen.

### Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan

Die Untersuchungen zur Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan wurden differenziert nach der Rechts- und der Linkskurve im Lageplan durchgeführt. Es wurde dabei zwischen folgenden Parameterwerten variiert:

- Radius: 250 m bis 500 m,
- Längsneigungsdifferenz: 4 % bis 12 %,
- Wannenhalmesser: 1.600 m bis 7.000 m und
- Tangentiallänge des Wannenhalmessers: 52 m bis 200 m.

Als Klothoidenparameter wurde stets ein Drittel des Kreisbogenradius gewählt. Für die Längsneigungsdifferenz wurde  $\Delta s = 2 \%$  nicht betrachtet, da sich die daraus ergebenden Perspektivbilder nicht wesentlich von denen der Knickwirkung im Lageplan unterscheiden (Bild 78).

Die Länge des Radius betrug stets die nach den RAA vorgesehene Mindestlänge (EKA 3: min  $L = 55$  m), da gemäß den Erkenntnissen aus der Literaturanalyse eine Knickwirkung eher bei kleinen Entwurfsparametern auftritt. Weiterhin wurde für den



Bild 78: Rechtskurve in der Wanne mit:  $\Delta s = 2 \%$ ,  $H_W = 10.000$  m ( $T = 100$  m),  $R = 280$  m,  $A = 93,33$  m



Bild 79: Rechtskurve in der Wanne mit: RQ 25,  $\Delta s = 12 \%$ ,  $R = 250$  m,  $A = 90$  m,  $H_W = 3.333$  m ( $T = 200$  m)



Bild 80: Rechtskurve in der Wanne mit: RQ 31,5,  $\Delta s = 12 \%$ ,  $R = 250$  m,  $A = 90$  m,  $H_W = 3.333$  m ( $T = 200$  m)



Bild 81: Rechtskurve in der Wanne mit: RQ 36,  $\Delta s = 12 \%$ ,  $R = 720$  m,  $A = 240$  m,  $L = 75$  m,  $H_W = 8.800$  m ( $T = 352$  m)



Bild 82: Rechtskurve in der Kuppe mit:  $\Delta s = 12 \%$ ,  $H_K = 1.666,67$  m ( $T = 100$  m),  $R = 280$  m,  $A = 93,33$  m

Querschnitt ausschließlich der RQ 25 angenommen. Bei der Anordnung eines RQ 31,5 (EKA 3) konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der auftretenden Phänomene wahrgenommen werden (Bild 79, Bild 80). Nach den RAA werden bei der Anwendung eines RQ 36 größere Werte der Mindestparameter gefordert. Diese sind so groß, dass kein Defizit dargestellt werden kann (Bild 81).

Aus den Untersuchungen ging hervor, dass analog zur Knickwirkung im Höhenplan bei der Anordnung einer Kuppe in der Gradiente unter Einhaltung der Entwurfsparameter nach den RAA kein Defizit dargestellt werden kann (Bild 82). Daher wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Für die Rechts- und die Linkskurve wurden jeweils 168 Parameterkombinationen untersucht. Die angenommenen Entwurfsparameter sind dem Anhang 37 und die dazugehörigen Perspektivbilder dem Anhang 11 zu entnehmen.

Als Bezugspunkt wurde der Neigungswechsel der Wanne gewählt. Der Visualisierungsstandpunkt befindet sich 300 m vor dem Bezugspunkt.

Bei der Überlagerung von einem Kreisbogen in der Achse und einer Wanne in der Gradiente tritt nicht ausschließlich eine Knickwirkung auf. Es kann auch das Phänomen der Aufwölbung wahrgenommen werden, d. h. Vortäuschung einer Kuppe (Bild 83).

Es wurde angenommen, dass das Phänomen der Aufwölbung durch die Wanne und vor allem durch die Anrampung der Fahrbahnränder in der Kurve entsteht. Daher wurden folgende Annahmen für die Querneigung im Kurvenbereich untersucht:

- durchgängige Querneigung von  $q = 2,5 \%$  in Richtung Kurveninnenseite (Bild 84),
- negative Querneigung von  $q = -6,0 \%$  (Bild 85),
- negative Querneigung von  $q = -2,5 \%$  (Bild 86),
- einseitige Querneigung von  $q = 2,5 \%$  in Richtung Kurveninnenseite (kein Dachprofil) (Bild 87) und
- einseitige Querneigung von  $q = 6,0 \%$  in Richtung Kurveninnenseite (kein Dachprofil) (Bild 88).

Die Perspektivbilder mit den unterschiedlichen Querneigungen im Kurvenbereich machen deutlich, dass die Aufwölbung u. a. durch die Anrampung der Fahrbahnränder entsteht. Wird im Kurvenbereich



Bild 83: Linkskurve in der Wanne mit:  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )



Bild 84: Linkskurve in der Wanne mit durchgängiger Querneigung von  $q = 2,5 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )

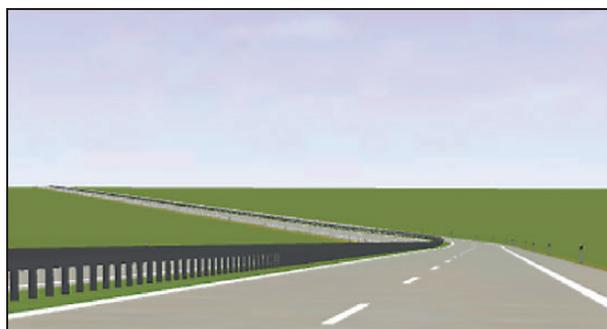


Bild 85: Linkskurve in der Wanne mit negativer Querneigung von  $q = -6,0 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )



Bild 86: Linkskurve in der Wanne mit negativer Querneigung von  $q = -2,5 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )

ausschließlich eine Querneigung von  $q = 2,5 \%$  angeordnet, ist der Effekt der Aufwölbung nicht so stark ausgeprägt. Dies liegt auch bei einer einseitigen Querneigung vor. Wird im Kurvenbereich eine

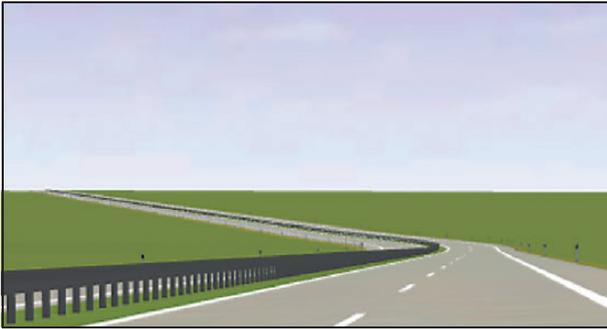


Bild 87: Linkskurve in der Wanne mit einseitiger Querneigung von  $q = 2,5 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ ,  $RQ 25$ ,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )

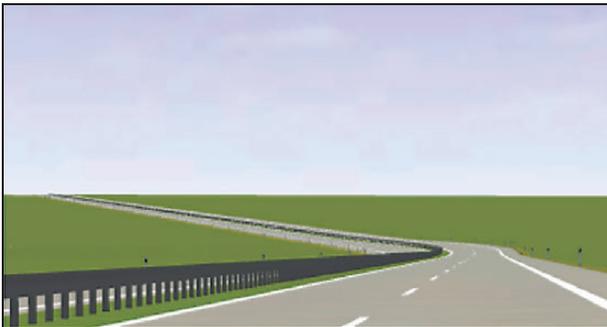


Bild 88: Linkskurve in der Wanne mit einseitiger Querneigung von  $q = 6,0 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ ,  $RQ 25$ ,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )

negative Querneigung angeordnet, kann keine Aufwölbung mehr wahrgenommen werden. Aus Gründen der Verkehrssicherheit ist die Anordnung einer Querneigung von  $q = 2,5 \%$  im Kreisbogen je nach EKA der RAA erst ab größeren Radien möglich. Einseitige Querneigungen sollten nach den RAA nur in besonderen Fällen, wie z. B. im Bereich von Mittelstreifenüberfahrten oder Tunneln, angeordnet werden (FGSV 2008b). Daher stellt diese Maßnahme im Allgemeinen keine sinnvolle Lösung dar. Negative Querneigungen von  $q = -6,0 \%$  sind nach den RAA unzulässig. Es können jedoch Querneigungen von  $q = -2,5 \%$  unter der Voraussetzung, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit beschränkt wird, vorgesehen werden.

Für das Defizit Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan ist es nicht möglich, für den Dominanzpaarvergleich eine Frage zu formulieren, bei der die Probanden verstehen, nach welchem Kriterium sie die ihnen gezeigten Perspektivbilder bewerten sollen. Daher wurde für die Grenzwertermittlung ausschließlich die Method of Adjustment mit den erstellten Perspektivbildern durchgeführt.

- Method of adjustment

Für die Befragung wurden die Perspektivbilder nach ihren Radien und ihren Längsneigungsdifferenzen

unterschieden. Es ergaben sich daraus jeweils für die Rechts- und die Linkskurve 21 zu bewertende Bildgruppen mit je 8 Bildern. Innerhalb einer Gruppe wurden die Bilder aufsteigend nach dem Wert des Wannenhalmessers sortiert, da sich mit einem zunehmenden Wert des Wannenhalmessers die Phänomene verstärken. Für dieses Defizit wurden keine Perspektivbilder mit einem veränderten Fahrraum und auch keine abstrakten Perspektivbilder erstellt. Die Anzahl an zu bewertenden unveränderten Perspektivbildern war bereits sehr hoch, so dass durch weitere zu bewertende Bilder die Gefahr einer Überforderung der Probanden bestand. Weiterhin war das Defizit schwer zu definieren bzw. für dieses eine Frage zu formulieren. Daher wäre ein Vergleich zwischen den Ergebnissen zu den Perspektivbildern mit einem veränderten Fahrraum und den unveränderten Perspektivbildern nicht sinnvoll, da zu viele Einflussgrößen vorliegen. Auch für die Bewertung der abstrakten Perspektivbilder konnte aufgrund der Komplexität des Defizits keine sinnvolle Fragestellung formuliert werden. Daher war auch dafür eine Befragung nicht sinnvoll. Es wurden somit für die unveränderten Perspektivbilder eine Präsentation und ein dazugehöriger Fragebogen erarbeitet.

Abweichend von der in Kapitel 4.4 beschriebenen Methodik, wurden den Probanden die Phänomene des Defizits erläutert. Sie sollten anschließend angeben, ab wann die Phänomene auftreten.

Die Befragung wurde mit 13 Probanden durchgeführt. Das Probandenkollektiv setzte sich dabei wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 69,2 %
  - weiblich: 30,8 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 7,7 %
  - 25 - 45 Jahre: 76,9 %
  - > 45 Jahre: 15,4 %
- höchster Bildungsabschluss
  - mittlere Reife: 7,7 %
  - (Fach-)Abitur: 15,4 %
  - (Fach-)Hochschulabschluss: 76,9 %
- 100 % im Besitz eines Führerscheins

$\Delta s$ [%]	R [m]	$H_w$ [m]	T [m]
4	250	5.500	110
4	280	5.500	110
4	300	5.500	110
4	350	5.500	110
4	400	6.000	120
4	450	6.000	120
4	500	6.500	130
8	250	3.000	120
8	280	2.750	110
8	300	3.000	120
8	350	3.000	120
8	400	3.000	120
8	450	3.000	120
8	500	3.000	120
12	250	2.500	150
12	280	2.500	150
12	300	2.500	150
12	350	2.500	150
12	400	2.500	150
12	450	2.500	150
12	500	2.500	150

Tab. 37: Grenzwerte für die Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan – Linkskurve ( $A = R/3$ )

$\Delta s$ [%]	R [m]	$H_w$ [m]	T [m]
4	250	6.000	120
4	280	6.500	130
4	300	6.000	120
4	350	6.500	130
4	400	6.000	120
4	450	5.500	110
4	500	6.000	120
8	250	3.000	120
8	280	2.750	110
8	300	3.000	120
8	350	3.250	130
8	400	3.000	120
8	450	3.000	120
8	500	3.000	120
12	250	2.500	150
12	280	2.333	140
12	300	2.333	140
12	350	2.500	150
12	400	2.333	140
12	450	2.333	140
12	500	2.500	150

Tab. 38: Grenzwerte für die Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan – Rechtskurve ( $A = R/3$ )

Das Probandenkollektiv besteht überwiegend aus männlichen Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Die Probanden fahren zu

- 15,4 % weniger als 6.000 km
- 7,7 % zwischen 6.000 km und 10.000 km und
- 76,9 % zwischen 10.000 km und 20.000 km

Auto im Jahr. Es sind 23 % weniger als 20 %, zu 38,5 % 20 % bis 50 % und zu 38,5 % mehr als 50 % der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

Die Ergebnisse der Befragung sind im Anhang 38 aufgeführt. Aus diesen lassen sich für die Radien- und Längsneigungsdifferenzen-Gruppen die in Tabelle 37 und Tabelle 38 aufgeführten Grenzwerte ableiten, d. h. ab dem Halbmesser, bei dem zuerst ein Defizit erkannt wurde.

$\Delta s$ [%]	$H_w$ [m]	T [m]
4	< 6.000	< 120
8	< 3.000	< 120
12	< 2.500	< 150

Tab. 39: Grenzwerte zur Vermeidung der Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan

Aus den Grenzwerten geht hervor, dass das Defizit unabhängig von der Richtung der Kurve, d. h. Rechts- oder Linkskurve, und der Größe des Radius auftritt. Die entsprechenden Tangentenlängen unterscheiden sich überwiegend gar nicht oder um  $\Delta T = 10$  m. Die Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan ist vorrangig von der Längsneigungsdifferenz abhängig. Demnach können die in Tabelle 39 aufgeführten Wannenhalmmesser und Tangentenlängen als Richtwerte angenommen werden, ab wann keine Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan auftritt. Die Richtwerte entsprechen dabei dem

arithmetischen Mittel aus den jeweiligen Grenzwerten je Längsneigungsdifferenzen-Gruppe.

Nach den RAA beträgt der Mindesthalbmesser für Wannen für Straßen der EKA 3  $H_W = 2.600$  m. Demnach treten die Phänomene Aufwölbung und Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan bei der Überlagerung von einem Kreisbogen und einer Wanne fast immer auf. Um diese abschwächen zu können, sollten somit der Wannenhalbmesser und/ oder die Längsneigungsdifferenz verringert werden.

### Kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven

Es wurden zu 82 verschiedenen Parameterkombinationen Perspektivbilder erstellt, bei denen die Wahrnehmung von kurzen Zwischengeraden untersucht wurde. Dabei wurden in der Achse folgende Parameter variiert:

- Größe der Radien: 280 m, 500 m,
- Länge der Radien: 55 m, 100 m und
- Länge der Zwischengeraden: 100 m bis 1.000 m (Intervallschritte: 100 m).

Für beide Radien wurde in einem Untersuchungsschritt zur Vereinfachung stets die gleiche Größe und Länge angenommen. Als Klothoidenparameter wurde stets ein Drittel des Kreisbogenradius gewählt. Eine vollständige Auflistung der Parameterkombinationen ist dem Anhang 39 und die dazugehörigen Perspektivbilder dem Anhang 11 zu entnehmen.

Als Bezugspunkt wurde der Kurvenmittelpunkt der ersten Kurve gewählt. Der Visualisierungsstandpunkt wurde iterativ ermittelt und betrug 75 m vor dem Kurvenmittelpunkt.

Durch die erstellten Perspektivbilder wird deutlich, dass auf Autobahnen kurze Zwischengeraden zwischen zwei gleichgerichteten Kurven den Linienfluss einer durchgehenden Kurve nicht unterbrechen. Es ist weder bei kurzen im Vergleich zu langen Zwischengeraden (Bild 89, Bild 90) noch bei kurzen im Vergleich zu langen Radien (Bild 89, Bild 91) die zweite Kurve gut wahrnehmbar.

Die Größe der Radien hat ausschließlich einen Einfluss auf die Wahrnehmung der ersten Kurve (Bild 89, Bild 92). Mit kleiner werdendem Radius wirkt diese wie ein Knick. Dieser Zusammenhang wurde bei den Defiziten der Knickwirkung untersucht.



Bild 89: Kurze Zwischengerade mit  $R = 500$  m,  $L_R = 55$  m, Länge der Zwischengerade: 100 m



Bild 90: Kurze Zwischengerade mit  $R = 500$  m,  $L_R = 55$  m, Länge der Zwischengerade: 1.000 m



Bild 91: Kurze Zwischengerade mit  $R = 500$  m,  $L_R = 100$  m, Länge der Zwischengerade: 100 m



Bild 92: Kurze Zwischengerade mit  $R = 280$  m,  $L_R = 55$  m, Länge der Zwischengerade: 100 m



Bild 93: Kurze Zwischengerade mit Linkskurve,  $R = 500$  m,  $L_R = 55$  m, Länge der Zwischengerade: 100 m



Bild 94: Kurze Zwischengerade mit RQ 36,  $R = 500$  m,  $L_R = 55$  m, Länge der Zwischengerade: 100 m

Bei Linkskurven ist der Straßenverlauf durch die passiven Schutzeinrichtungen im Mittelstreifen verdeckt (Bild 93). Bei dieser Elementkombination konnten somit auch kein gestalterisches Defizit verzeichnet werden.

Auch der Querschnitt hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der zweiten Kurve. Daher wird auch bei zweibahnig sechsstreifigen Autobahnen der Linienfluss einer durchgehenden Kurve nicht durch eine kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven unterbrochen (Bild 94).

### Aufwölbung

Für das Defizit Aufwölbung wurden die in Tabelle 40 aufgeführten Parametervariationen untersucht. Die dazugehörigen Perspektivbilder sind dem Anhang 11 zu entnehmen. Der Visualisierungsstandort befand sich dabei analog zu dem Ergebnis der Untersuchungen von KÜHN et al. (2007) 100 m vor dem ersten Neigungswechsel. Dadurch ist auch bei langen Tangenten die Zwischengerade gut sichtbar.

Aus der Untersuchung ging hervor, dass eine Aufwölbung immer auftritt, wenn sich im Höhenplan eine Gerade zwischen zwei Wannen befindet und diese Elementfolge für den Fahrer vollständig sicht-

Element	Bereich	Schrittweite
Radius $R$ [m] (Links- und Rechtskurve)	280 400 – 1.000 1.000 – 10.000 10.000 – 20.000 $\infty$	- 100 1.000 2.500 -
Länge der Zwischengeraden im Höhenplan $L_{ZG}$ [m]	0 – 1.000	50
Tangentenlänge des Halbmessers $T$ [m]	75 100 – 250	- 50
Längsneigungsdifferenz $\Delta s$ [%]	2 – 6	2

Tab. 40: Untersuchte Parametervariationen zum Defizit Aufwölbung (nach LORENZ, 2015)

bar ist. Mit der Variation der Parameter ändert sich ausschließlich die Ausprägung der Aufwölbung. Daher war eine Grenzwertermittlung für das Defizit Aufwölbung nicht erforderlich und es fanden keine Probandenbefragungen statt.

Die Auswertung der Perspektivbilder ergab, dass die Längsneigungsdifferenz einen Einfluss auf die Ausprägung des Defizits hat. Mit zunehmender Längsneigungsdifferenz wird eine Aufwölbung der Fahrbahn stärker wahrgenommen (Bild 95, Bild 96).

Die Länge der Zwischengeraden hat auch einen Einfluss auf die Ausprägung des Defizits. Bei einer Geraden in der Achse wird bei einer Länge von  $L_{ZG} = 100$  m eine stärkere Aufwölbung wahrgenommen als bei einer Länge von  $L_{ZG} = 50$  m. Wird die Zwischengerade jedoch noch größer, nimmt die Stärke der Ausprägung wieder ab. Das Defizit kann jedoch auch bei einer Länge von  $L_{ZG} = 1.000$  m wahrgenommen werden (LORENZ, 2015). Die Grenze zwischen der Zu- und Abnahme der Ausprägung konnte nicht bestimmt werden (Bild 97 – Bild 99).

Bei einem Kreisbogen in der Achse nimmt zunächst auch die Ausprägung mit zunehmender Länge der Zwischengeraden zu. Bei einem kleinen Radius und langen Zwischengeraden ist die zweite Wanne für den Fahrer nicht mehr sichtbar. In diesem Fall wird keine Aufwölbung sondern eine Steigung im Bereich der Zwischengeraden wahrgenommen. Bis zu einem Radius von  $R = 1.000$  m und einer Zwischengeradenlänge von  $L_{ZG} = 750$  m kann die zweite Wanne von dem Fahrer nicht mehr wahrgenommen werden (Bild 100, Bild 101) (LORENZ, 2015). Es gilt der Zusammenhang: Je kleiner der Radius, desto eher kann mit zunehmender Zwischengeradenlänge die zweite Wanne von dem Fahrer nicht mehr eingesehen werden.

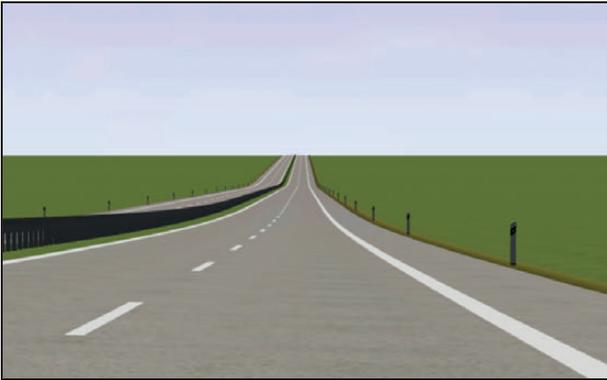


Bild 95: Aufwölbung mit den Parametern  $\Delta s = 2\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m,  $L_{ZG} = 400$  m (nach LORENZ, 2015)

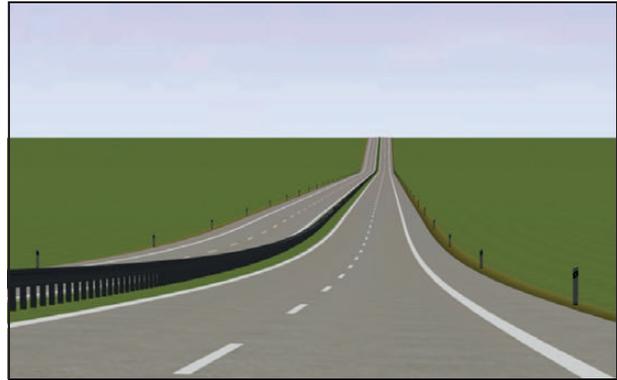


Bild 99: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 1.000$  m,  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)

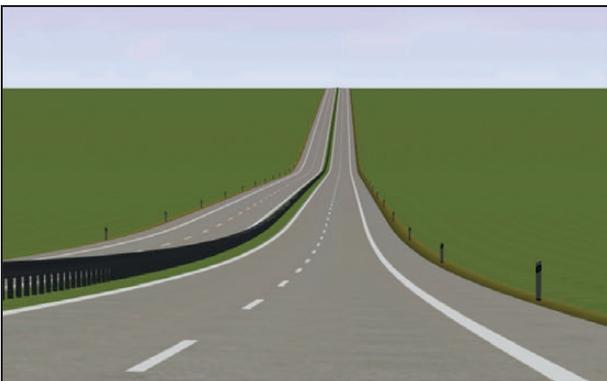


Bild 96: Aufwölbung mit den Parametern  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m,  $L_{ZG} = 400$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 100: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 400$  m,  $R = +1.000$  m,  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)

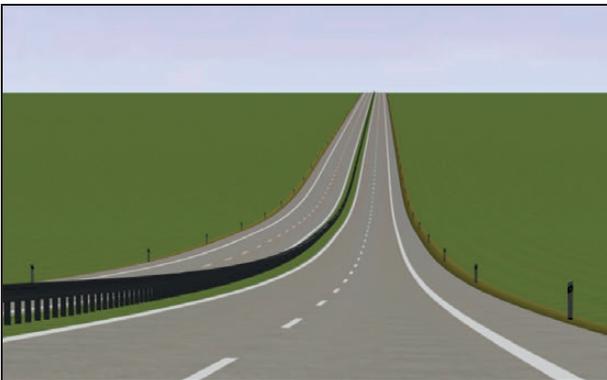


Bild 97: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 50$  m,  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 101: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 750$  m,  $R = +1.000$  m,  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 98: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 250$  m,  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)

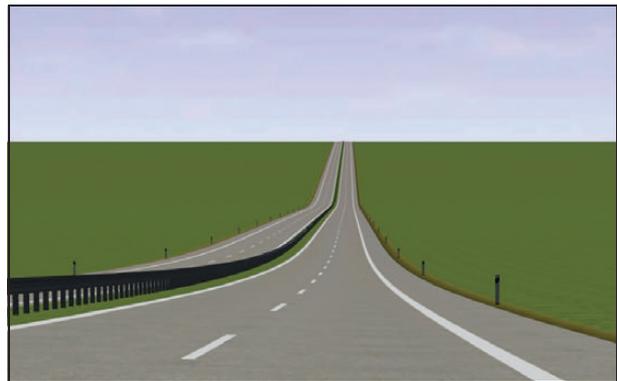


Bild 102: Aufwölbung mit den Parametern  $T = 100$  m,  $L_{ZG} = 400$  m,  $\Delta s = 6\%$ , RQ 25 (nach LORENZ, 2015)

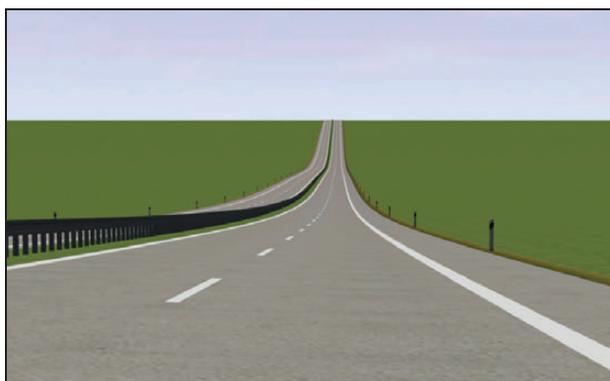


Bild 103: Aufwölbung mit den Parametern  $T = 250$  m,  
 $L_{ZG} = 400$  m,  $\Delta s = 6$  %, RQ 25 (nach LORENZ, 2015)

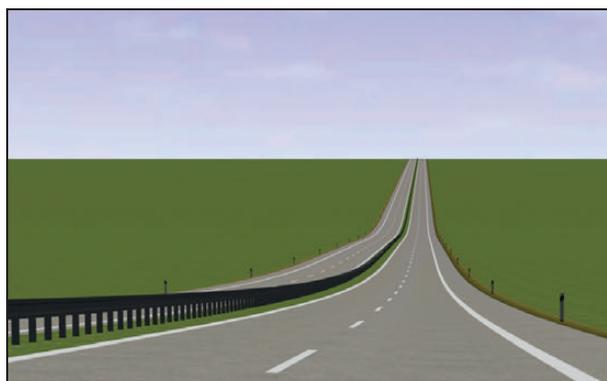


Bild 107: Aufwölbung mit den Parametern RQ 25,  $L_{ZG} =$   
 $200$  m,  $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)

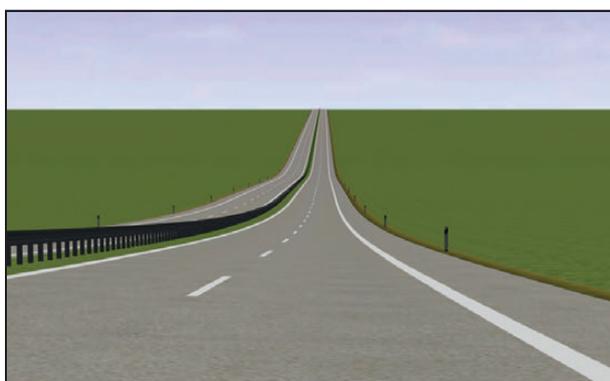


Bild 104: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 200$  m,  
 $\Delta s = 6$  %, RQ 25,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)

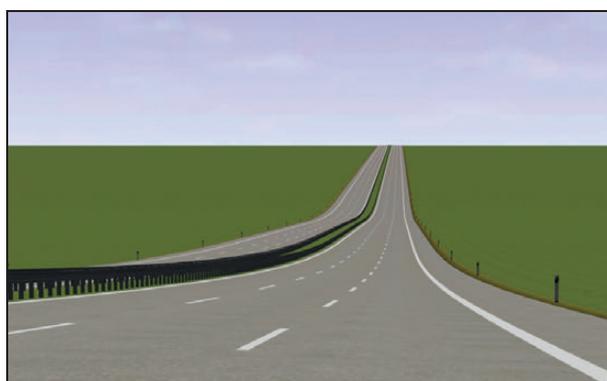


Bild 108: Aufwölbung mit den Parametern RQ 36,  $L_{ZG} =$   
 $200$  m,  $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 105: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 200$  m,  
 $R = + 3.000$  m,  $\Delta s = 6$  %, RQ 25,  $T = 100$  m (nach  
LORENZ, 2015)



Bild 109: Aufwölbung mit den Parametern RQ 25,  $L_{ZG} = 200$  m,  
 $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m,  $R = + 1.000$  m (nach LORENZ,  
2015)



Bild 106: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 200$  m,  
 $R = - 3.000$  m,  $\Delta s = 6$  %, RQ 25,  $T = 100$  m (nach  
LORENZ, 2015)



Bild 110: Aufwölbung mit den Parametern RQ 36,  $L_{ZG} = 200$  m,  
 $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m,  $R = + 1.000$  m (nach LORENZ,  
2015)

Es wurde weiterhin ein Zusammenhang zwischen der Zwischengeradenlänge und der Größe des Radius festgestellt. Bei kurzen Zwischengeradenlängen (z. B.  $L_{ZG} = 200$  m) wird die stärkste Aufwölbung im Bereich von  $R = 2.000$  m bis  $R = 3.000$  m wahrgenommen. Im Vergleich wird bei größeren Zwischengeradenlängen ( $L_{ZG} = 800$  m) im Bereich von  $R = 10.000$  m bis  $R = 15.000$  m die stärkste Ausprägung wahrgenommen. Vor und nach den jeweiligen Radienbereichen nimmt die Ausprägung der Aufwölbung ab (LORENZ, 2015).

Zwischen der Tangentenlänge und der Wahrnehmung einer Aufwölbung besteht ebenfalls ein Zusammenhang. Je länger die Tangente ist, desto größer ist der Abstand zwischen dem Visualisierungsstandort und dem Beginn der Zwischengerade. Die Stärke der Ausprägung nimmt dabei mit einem zunehmenden Abstand ab (Bild 102, Bild 103). Die Aufwölbung kann vermieden werden, wenn die Summe aus der Tangentenlänge und der Zwischengeradenlänge so groß ist, dass die zweite Wanne für den Fahrer nicht mehr sichtbar ist.

Aus dem Vergleich von einer Geraden und einer Links- bzw. Rechtskurve als Achselement ging hervor, dass in der Kurve die Aufwölbung stärker als in der Geraden wahrgenommen wird. Zwischen der Links- und der Rechtskurve konnte kein signifikanter Unterschied bzgl. der Stärke der Ausprägung festgestellt werden (Bild 104 – Bild 106).

In der Gerade und in der Kurve konnten zwischen dem RQ 25 und dem RQ 36 keine Unterschiede bzgl. der Ausprägung der Aufwölbung wahrgenommen werden (Bild 107 bis Bild 110) (LORENZ, 2015).

Zusammenfassend kann eine Aufwölbung trotz richtliniengerechter Trassierung wahrgenommen werden. Sie tritt auf, wenn die Elementfolge Wanne – konstante Längsneigung – Wanne vollständig für den Fahrer sichtbar ist.

### Abplattung

Für das Defizit Abplattung wurden die in Tabelle 41 aufgeführten Parametervariationen untersucht. Die dazugehörigen Perspektivbilder sind dem Anhang 11 zu entnehmen. Der Visualisierungsstandort befand sich dabei 50 m vor dem ersten Neigungswechsel.

Die Untersuchungen ergaben, dass das Defizit Abplattung auf der Grundlage der großen Entwurfparameter für Autobahnen kaum bzw. gar nicht wahr-

Element	Bereich	Schrittweite
Radius R [m] (Rechtskurve)	500 – 1.000 2.500 $\infty$	500 - -
Länge der Zwischengeraden im Höhenplan $L_{ZG}$ [m]	0 – 1.000	50
Tangentenlänge des Halbmessers T [m]	50 – 125	25
Längsneigungsdifferenz $\Delta s$ [%]	0,5 – 2	0,5

Tab. 41: Untersuchte Parametervariationen zum Defizit Abplattung (nach LORENZ, 2015)



Bild 111: Abplattung mit den Parametern  $\Delta s = 0,5$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 500$  m, T = 100 m (nach LORENZ, 2015)



Bild 112: Abplattung mit den Parametern  $\Delta s = 1,0$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 1.000$  m, T = 100 m (nach LORENZ, 2015)

genommen werden kann. Es muss zum einen möglich sein, die erste Kuppe überblicken zu können. Daher wurden nur kleine Längsneigungsdifferenzen verwendet. Zum anderen darf die Längsneigungsdifferenz nicht zu gering sein, um die erste Kuppe wahrnehmen zu können. Bei Längsneigungsdifferenzen von  $\Delta s < 1$  % konnten nur geringe Unterschiede zwischen der Kuppe und der Zwischengeraden wahrgenommen werden (Bild 111). Die Zwischengerade wurde daher nicht als störend empfunden. Im Bereich von  $1 \% \leq \Delta s \leq 1,5$  % konnte über die



Bild 113: Abplattung mit den Parametern  $\Delta s = 2,0 \%$ , RQ 25,  $L_{ZG} = 500$  m,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 114: Abplattung mit den Parametern  $T = 50$  m,  $\Delta s = 1,0 \%$ , RQ 25,  $L_{ZG} = 400$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 115: Abplattung mit den Parametern  $T = 125$  m,  $\Delta s = 1,0 \%$ , RQ 25,  $L_{ZG} = 400$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 116: Abplattung mit den Parametern  $R = +500$  m, RQ 25,  $T = 75$  m,  $\Delta s = 1,0 \%$ ,  $L_{ZG} = 250$  m (nach LORENZ, 2015)



Bild 117: Abplattung mit den Parametern  $R = \infty$ , RQ 25,  $T = 75$  m,  $\Delta s = 1,0 \%$ ,  $L_{ZG} = 250$  m (nach LORENZ, 2015)

erste Kuppe hinausgesehen werden und der Übergang zwischen der ersten Kuppe und der Zwischengeraden war eindeutig erkennbar. Bei kurzen Tangentenlängen wirkt der Übergang starr und es besteht die Möglichkeit, dass eine Abplattung wahrgenommen werden kann (Bild 112). Ab Längsneigungsdifferenzen von  $\Delta s > 1,5 \%$  kann über die erste Kuppe nicht mehr hinausgesehen werden (Bild 113) (LORENZ, 2015).

Da bei allen Perspektivbildern eine Abplattung gar nicht bzw. kaum wahrgenommen werden konnte, konnten die Zusammenhänge zwischen den Entwurfsparametern und der Ausprägung der Abplattung schwer bestimmt werden. In Bezug auf die Länge der Zwischengeraden konnte festgestellt werden, dass diese ausschließlich einen Einfluss auf die Erkennbarkeit der zweiten Kuppe hat. Ist diese so lang, dass die zweite Kuppe für den Fahrer nicht mehr sichtbar ist, kann auch keine Abplattung wahrgenommen werden.

Der Übergang zwischen der ersten Kuppe und der Zwischengeraden ist bei kurzen Tangentenlängen im Vergleich zu langen deutlicher zu sehen (Bild 114, Bild 115). Daher wurden auch geringere Tangentenlängen als die für Straßen der EKA 3 zulässigen verwendet, um das Defizit besser darstellen zu können.

Es wurde weiterhin anstelle einer Geraden in der Achse ein Kreisbogen angeordnet, um ggf. das Defizit besser darstellen zu können. Aus dem Vergleich der erstellten Perspektivbilder konnte abgeleitet werden, dass bei kleinen Radien im Vergleich zu einer Geraden in der Achse bereits bei kürzeren Zwischengeraden die zweite Kuppe für den Fahrer nicht mehr sichtbar ist (Bild 116, Bild 117). Mit zunehmendem Radius sind längere Zwischengeraden erforderlich, damit die zweite Kuppe für den Fahrer nicht mehr sichtbar ist. Ist die zweite Kuppe für den



Bild 118: Brettwirkung auf der 95 D zwischen Acapulco und Cuernavaca (TU Dresden)

Fahrer sichtbar, kann ggf. eine Abplattung wahrgenommen werden. Dies ist aufgrund der geringen Längsneigungsdifferenzen jedoch schwierig, da nur ein geringer Streckenabschnitt zu erkennen ist (LORENZ, 2015).

Neben dem RQ 25 wurde auch der RQ 36 untersucht. Zwischen den Perspektivbildern konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Bei allen Parametervariationen konnte das Defizit Abplattung kaum bzw. gar nicht dargestellt werden. Daher war eine Grenzwertermittlung für das Defizit Abplattung nicht erforderlich und es fanden keine Probandenbefragungen statt.

### Brettwirkung

Die Brettwirkung setzt sich aus den gleichen Entwurfselementen wie die Aufwölbung und die Abplattung zusammen (Kapitel 4.3.2). Im Rahmen der Untersuchungen zur Aufwölbung und zur Abplattung wurde bei keinen Parameterkombinationen eine Brettwirkung wahrgenommen. In der Literatur tritt die Brettwirkung im Höhenplan meist im Zusammenhang mit einer Brücke als Gerade zwischen den Wannens in der Gradienten auf. Sie wird dabei vorrangig aus einer Perspektive dargestellt, wo der Betrachter die Brücke nicht direkt vor sich hat, sondern diese aus einem Winkel betrachtet (Bild 8, Bild 118).

In den RAA ist das Bild zur Brettwirkung aus der gleichen Perspektive, wie sie im Rahmen dieser Untersuchungen verwendet wird, dargestellt (Bild 35). In diesem wird jedoch keine Brettwirkung, sondern eine Aufwölbung abgebildet. Eine Brettwirkung kann somit auf der Grundlage der in Kapitel 4.3 getroffenen Modellannahmen nicht dargestellt werden.

### Verzerrung der Längsneigung

Die Verzerrung der Längsneigung wurde anhand von 92 Parameterkombinationen und den dazugehörigen Perspektivbildern untersucht. Die Bilder sind dem Anhang 11 zu entnehmen. Es wurden folgende Parameter variiert:

- Lageplan:
  - $R = \infty$ ,  $R = 1.000$  m sowie
  - Rechts- und Linkskurve.
- Höhenplan:
  - Wannenhalmesser:  $H_W = 1.000$  m bis  $10.000$  m (Intervallschritte:  $1.000$  m) sowie
  - Längsneigungsdifferenz:  $\Delta s = 4$  %,  $8$  % und  $12$  %.

Für die Perspektivbilder wurde als Bezugspunkt der Neigungswechsel der Wanne und als Visualisierungsstandpunkt  $250$  m vor dem Neigungswechsel gewählt.

- Verzerrung der Längsneigung in der Gerade

Für die Verzerrung der Längsneigung kann kein Grenzwert anhand einer Befragung ermittelt wer-



Bild 119: Verzerrung der Längsneigung mit RQ 25,  $H_W = 1.000$  m und  $\Delta s = 4$  %

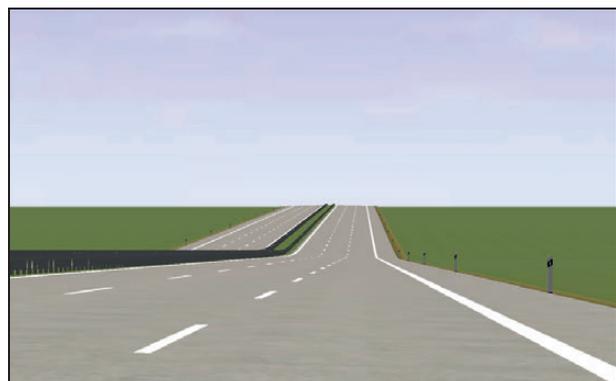


Bild 120: Verzerrung der Längsneigung mit RQ 36,  $H_W = 1.000$  m und  $\Delta s = 4$  %

$\Delta s$ [%] \ $H_W$ [m]	4	8	12
2.000	103	121	128
4.000	73	89	87
5.000	60	64	61
6.000	56	39	35
8.000	28	7	9

Tab. 42: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zur Verzerrung der Längsneigung (n = 320)

den. Es gibt keine sinnvolle Fragestellung, durch die bestimmt werden kann, ab wann der Anstieg als steiler empfunden wird als er eigentlich ist. Daher wurde ausschließlich ein Dominanzpaarvergleich durchgeführt. Dadurch wurde ermittelt, ob auf Autobahnen eine Verzerrung der Längsneigung auftritt oder diese Thematik für Autobahnen nicht relevant ist. Dazu wurden die Perspektivbilder in Längsneigungsdifferenzen-Gruppen unterteilt. Von jeder Gruppe wurden fünf Bilder ausgewählt. Diesen lagen der RQ 25 und die Wannenhalmmesser  $H_W = 2.000$  m,  $H_W = 4.000$  m,  $H_W = 5.000$  m,  $H_W = 6.000$  m und  $H_W = 8.000$  m zugrunde. Aus den Perspektivbildern ging hervor, dass der Querschnitt keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der Längsneigung hat (Bild 119, Bild 120). Daher wurden zu diesen Bildern keine Befragungen durchgeführt.

Die Probanden bewerteten die Bildpaare auf der Grundlage der Fragestellung: „Welchen Straßenverlauf finden Sie steiler?“

An der Befragung haben 32 Probanden teilgenommen. Das Kollektiv setzte sich dabei wie folgt zusammen:

- Geschlecht
  - männlich: 75,0 %
  - weiblich: 25,0 %
- Alter
  - < 25 Jahre: 15,6 %
  - 25 - 45 Jahre: 75,0 %
  - > 45 Jahre: 9,4 %
- höchster Bildungsabschluss
  - (Fach-)Abitur: 43,8 %
  - Berufsausbildung: 3,1 %

- (Fach-)Hochschulabschluss: 53,1 %

- 100 % im Besitz eines Führerscheins

Das Probandenkollektiv besteht überwiegend aus männlichen jungen Erwachsenen bzw. Erwachsenen mittleren Alters, die einen Führerschein und ein Abitur bzw. einen (Fach-)Hochschulabschluss besitzen. Die Probanden fahren mit 37,5 % weniger als 6.000 km Auto im Jahr.

Es fahren

- 34,4 % zwischen 6.000 km und 10.000 km,
- 25,0 % zwischen 10.000 km und 20.000 km und
- 3,1 % zwischen 20.000 km und 30.000 km

Auto im Jahr. Es sind

- 3,0 % keine,
- 18,8 % weniger als 20 %,
- 59,4 % zwischen 20 % bis 50 % und
- 18,8 % mehr als 50 %

der im Jahr gefahrenen Kilometer auf Autobahnen unterwegs.

In Tabelle 42 sind die aufsummierten Häufigkeiten für die Bilder angegeben, d. h. wie oft der Anstieg als steiler im Vergleich zu einem anderen eingestuft wurde.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Verzerrung der Längsneigung auf Autobahnen relevant ist. Mit abnehmendem Wannenhalmmesser, wird die gleiche Längsneigung als steiler empfunden.

- Verzerrung der Längsneigung in der Kurve

Die für die Verzerrung der Längsneigung in der Kurve relevante Kombination aus Achs- und Gradientenelementen ist der der Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan ähnlich. Daher ähneln sich auch die Perspektivbilder und die aufgetretenen Phänomene. Es tritt auch eine Aufwölbung auf. Diese und deren Ausprägung, welche in Abhängigkeit des Wannenhalmmessers variiert, dominieren die Perspektivbilder. Es wurde daher davon ausgegangen, dass der Anstieg und dessen Ausprägung für die Probanden eher nachrangig sind. Aufgrund dessen wurden keine Befragungen durchgeführt.

### Schlängeln

Liegt in der Achse eine größere Anzahl an Wendepunkten im Vergleich zur Gradienten vor, entsteht

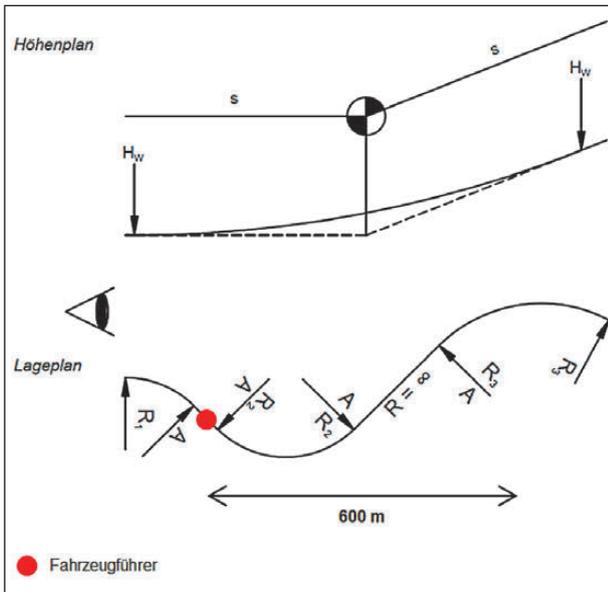


Bild 121: Systemskizze zum Schlingeln

der Eindruck eines schlängelnden Straßenverlaufs (Kapitel 4.3.2). Dies ist also bereits bei drei Wendepunkten in der Achse und zwei Wendepunkten in der Gradiente der Fall.

Die Fernorientierung und Informationsaufnahme eines Fahrzeugführers erfolgt bis zu einer Entfernung von 600 m. Der Eindruck des Schlingelns entsteht somit, wenn in der Achse mindestens drei Wendepunkte vorliegen sowie sich der zweite Wendepunkt und ein Teil der folgenden Kurve innerhalb der vom Fahrer wahrnehmbaren 600 m befinden (Bild 121).

Aus der Systemskizze lässt sich ableiten, dass kein Schlingeln auftritt, wenn die Länge der ersten Kurve mindestens 600 m ist (Gleichung 9).

$$600 \text{ m} = 2 \times L_A + L_R \text{ [m]} \quad \text{Gl. 9}$$

$L_A$  Länge der Klothoide [m]

$L_R$  Länge des Radius [m]

In Abhängigkeit des Bildungsgesetzes der Klothoide (Anhang 3 der RAA (FGSV 2008b)) und unter der Annahme, dass die Klothoide gleich einem Drittel des Radius entspricht, ergibt sich folgende Gleichung zur Berechnung der Mindestlänge des Radius:

$$L_R = 600 \text{ m} - \frac{2}{9} R \text{ [m]} \quad \text{Gl. 10}$$

$L_R$  Länge des Radius [m]

$R$  Größe des Radius [m]

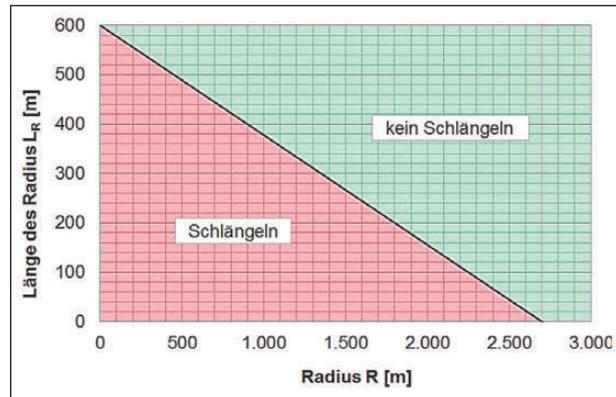


Bild 122: Mindestlänge der Kurve zur Vermeidung von Schlingeln

Die Gleichung 10 ist in Bild 122 noch einmal graphisch dargestellt.

Zur Veranschaulichung und zur Überprüfung möglicher Einflussfaktoren des Schlingelns wurden 72 Perspektivbilder erstellt. Diese sind dem Anhang 11 zu entnehmen. Es wurden folgende Parameter variiert:

- Lageplan:
  - Größe des Radius: 280 m, 500 m, 2.900 m,
  - Länge des Radius: 55 m, 100 m,
  - Länge der Zwischengeraden zwischen den Kreisbögen: 50 m bis 200 m (Intervallschritte: 50 m) und
- Höhenplan: Längsneigungsdifferenz: 4 %, 8 %, 12 %.

Für den Klothoidenparameter wurde stets ein Drittel des Kreisbogenradius gewählt. In der Gradiente wurde ausschließlich eine lange Wanne mit einer Tangentenlänge von 350 m angeordnet. Eine lange konstante Längsneigung in der Gradiente wäre nicht sinnvoll, da in diesem Fall ausschließlich die erste Kurve auf dem Perspektivbild sichtbar und somit der Verlauf des Schlingelns nicht erkennbar ist. Der Eindruck des Schlingelns tritt somit nicht auf.

Als Querschnitt wurde ausschließlich der RQ 25 gewählt, da angenommen wurde, dass unterschiedliche Querschnitte keinen Einfluss auf das Vorkommen von Schlingeln haben.

Als Bezugspunkt wurde der Neigungswechsel der Wanne gewählt. Der Visualisierungsstandort befand sich stets 350 m vor dem Neigungswechsel.

Zusätzlich zu den Zusammenhängen, die aus Gleichung 10 ableitbar sind, konnte aus den Untersu-

chungen abgeleitet werden, dass die Anordnung von Zwischengeraden zwischen den Kurven einen Einfluss auf die Ausprägung des Schlängelns hat. Je nach Länge der Zwischengeraden variiert die Anzahl der Kurven, die sich im wahrnehmbaren Bereich des Fahrers befinden. Die Längsneigungsdifferenz hat ausschließlich einen Einfluss auf die Erkennbarkeit des Schlängelns. Je größer die Längsneigungsdifferenz, desto besser ist das Schlängeln erkennbar.

Da das Auftreten des Schlängelns quantitativ ermittelt werden konnte und somit keinen subjektiven Eindrücken unterliegt, wurden keine Befragungen durchgeführt.

### 5.2.3 Vergleich virtuell erstelltes Perspektivbild und reales Bild

Für die Untersuchung, ob Defizite in der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf realen Strecken

im Vergleich zu virtuell erstellten Bildern gleich wahrgenommen werden, wurden die aufgenommenen Fotos der Untersuchungsstrecken A 4, A 9 und A 11 auf gestalterische Defizite überprüft. Der auf den herausgefilterten Fotos zu sehende Streckenverlauf wurde anschließend mit CARD/1 nachgebildet und mit diesem verglichen. Die virtuellen und realen Bilder sind dem Anhang 11 zu entnehmen.

Auf den Untersuchungsstrecken wurden folgende gestalterische Defizite detektiert:

- Aufwölbung,
- Knickwirkung,
- Sichtschatten (Tauchen und Springen),
- Flattern und
- Schlängeln.



Bild 123: Aufwölbung auf der A 11



Bild 124: Schlängeln auf der A 11



Bild 125: Springen auf der A 9

Während der Befahrung der Untersuchungsstrecken waren schlechte Witterungsverhältnisse, d. h. es war stark bewölkt und leicht neblig. Daher sind die Defizite auf den realen Bildern zum Teil schlecht erkennbar. Es geht dennoch hervor, dass die Defizite auf den realen Bildern nicht so stark wahrgenommen werden (Bild 123 bis Bild 125). Mögliche Ursachen hierfür sind die Ausstattungselemente der Straße, die Straßenseitenraumgestaltung, ggf. andere Verkehrsteilnehmer und die Witterungsverhältnisse. Das Defizit an sich kann jedoch über beide Darstellungsformen wahrgenommen werden.

Aus den Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass Defizite in der räumlichen Linienführung von Autobahnen, wie sie real auf bereits gebauten Autobahnen vorkommen, über Perspektivbilder gleichermaßen abgebildet werden können. Auf den Perspektivbildern können sie jedoch besser wahrgenommen werden. Dies ist bei der Bewertung der ermittelten Grenzwerte zu berücksichtigen.

#### 5.2.4 Fehleranalyse

Im Rahmen der qualitativen Untersuchungen lagen folgende mögliche Fehlerquellen vor:

- Die Darstellung der Defizite wurde bei der Erstellung der Perspektivbilder durch die Wahl des Visualisierungsstandorts, des Bezugspunktes und der Modellannahmen (Kapitel 4.3.3) beeinflusst.
- Bei der Betrachtung der Perspektivbilder kann weiter als 600 m gesehen werden.
- Die Perspektivbilder sind ausschließlich eine Momentaufnahme. Es können sich z. B. bei einer Fahrsimulation andere Ergebnisse ergeben.
- Die Bewertung der Bilder erfolgte subjektiv durch ein geringes Probandenkollektiv. Dies ist nicht repräsentativ.
- Die Witterungsverhältnisse auf den realen Bildern weichen stark von den simulierten Verhältnissen bei den virtuell erstellten Bildern ab. Dies konnte einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Defizite haben.

### 5.3 Quantitative Untersuchungen anhand des QuaSi-Bandes

#### 5.3.1 Überprüfung der Untersuchungsstrecken auf Defizite in der räumlichen Linienführung

Für die Überprüfung der räumlichen Linienführung sind mit der Einführung der H ViSt inzwischen mehrere eigenständige bzw. in Straßenentwurfssoftware integrierte kommerzielle Tools verfügbar. Diese beinhalten aber nur die in den H ViSt verankerten Überprüfungen zu Sichtschattentiefen und verdeckten Kurvenbeginnen. Weiterhin beschränken sie sich auf die gemäß den H ViSt kritischen Situationen. Um auch Rohauswertungen mit evtl. zu ändernden Parametern und weiteren Kriterien durchführen zu können, wurde das von den Forschern bereits bei früheren FE-Vorhaben erarbeitete und in den H ViSt verwendete Tool des ISE den Datenanforderungen angepasst. Dabei wurde neben den Anpassungen der Inhalte vor allem eine Auswertung unter Verwendung von Autobahnquerschnitten ermöglicht. Da die BAB A 9 eine große Vielfalt an Defiziten aufweist, sind die resultierenden Sichtschattenbänder dem Anhang 41 zu entnehmen.

Zunächst wurden die programmtechnischen Voraussetzungen für eine Übernahme der Autobahnquerschnitte geschaffen. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die Kriterien gelegt, die in den H ViSt als relevant gelten. Bei für Landstraßen typischen Trassierungsparametern basieren die meisten verdeckten Kurvenbeginne auf zu langen Kuppenausrundungen bis in den Bereich der Klothoide. Aufgrund der bei Autobahnen verwendeten Trassierungsparameter zeigt sich, dass das Defizit „verdeckter Kurvenbeginn“ meist nur dann detektiert wird, wenn Wendelinien bzw. Kurvenbeginne mitten in den Ausrundungen des Höhenplans beginnen, d. h. die Regularien bzgl. der Überlagerung von Wendepunkten bzw. bzgl. der Standardraumelementen deutlich missachtet wurden (Bild 126, Station 92+100).

Sichtschattenstrecken treten in der Regel in zwei Ausprägungen auf. Zum einen können Kuppen-Wannen-Übergänge mit relativ geringen Ausrundungshalbmessern dazu führen, dass gegen Ende der Kuppendurchfahrt über 50 m bis 100 m Augpunktbewegung ein Streckenbereich zu Beginn der Wanne im Sichtschatten liegt und im weiteren

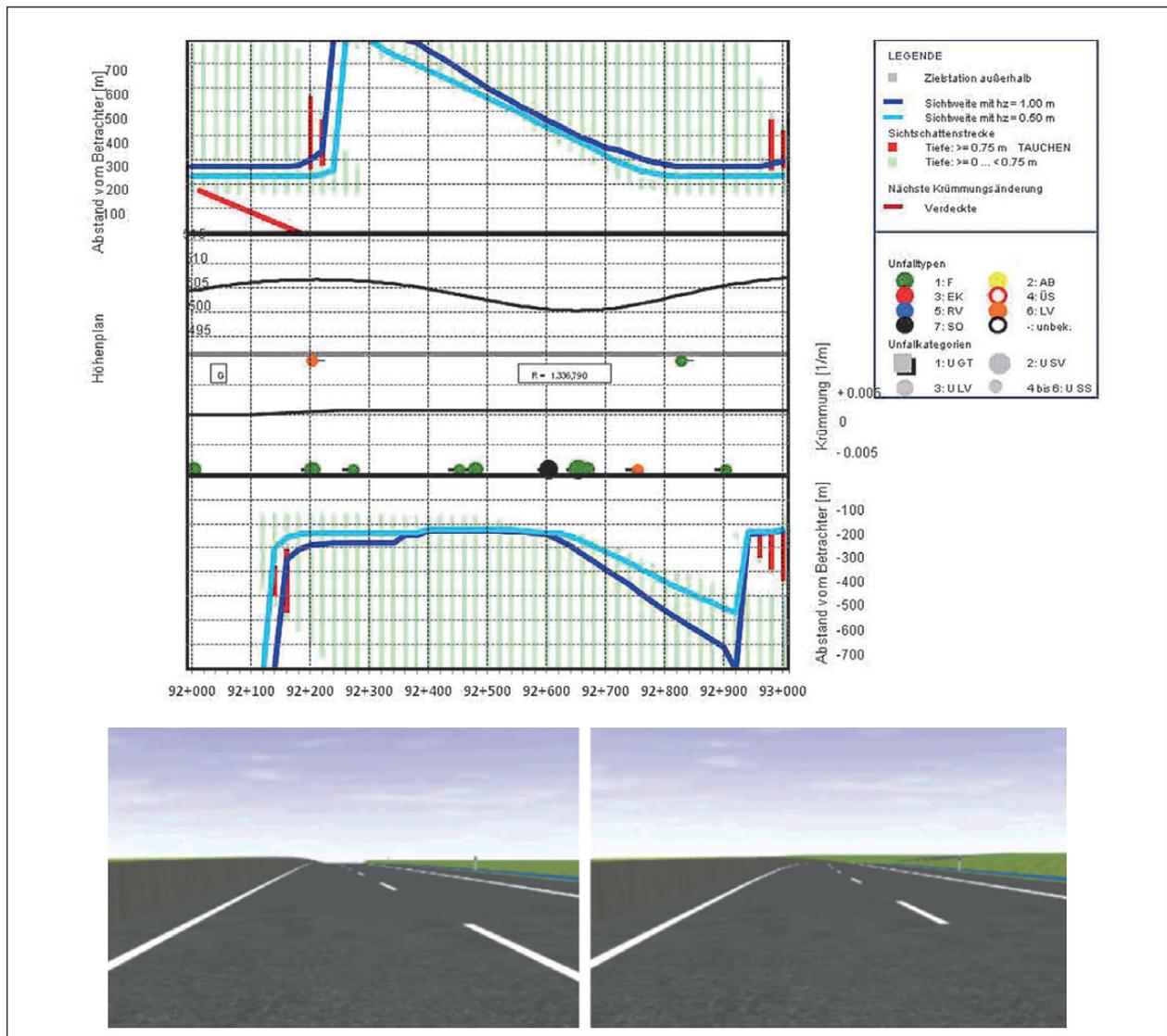


Bild 126: Verdeckter Kurvenbeginn auf der A 9 bei Station 92+100 in Stationierungsrichtung im Sichtschattenband (oben) und im Perspektivbild (unten, links: Station 92+000, rechts: Station 92+200)

Verlauf in bzw. nach der darauffolgenden Wanne die Fahrbahn innerhalb der relevanten Sichtweite wieder sichtbar wird (Bild 127, Station 3+700).

Zum anderen bringt die Einbeziehung des Mittelstreifens als zwangsläufig modellhaft undurchdringliches System mit Fahrzeugrückhaltesystemen im Landstraßenbereich bislang nicht aufgetretene Sichtschattenformen mit sich, die sich über relativ viele Augpunktstationen erstrecken. Ursächlich dafür sind Situationen, bei denen zumindest in der Betrachtungsrichtung zunächst eine relativ enge Linkskurve liegt, der anschließend eine Wannenausrundung folgt. Der Sichtschatten resultiert letztendlich aus der Verdeckung des Kurvenbereiches durch den Mittelstreifen. Der Streckenbereich nach der Wanne erscheint schließlich über dem Mittelstreifen (Bild 128, Station 6+500).

Die zuerst analysierten Sichtschattenbänder der A 9 wurden mit einem Querprofil (RQ 31) ohne Querneigung und einem rechnerischen Augpunkt auf der Leitlinie zwischen den beiden Fahrstreifen (Achsabstand: 6,50 m) erzeugt (Bild 126 bis Bild 128). In früheren Untersuchungen an einbahnigen Landstraßen hatte eine größere Detailtiefe der Auswertungsgrundlage häufig keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Aufgrund der besonderen Situation des Vorhandenseins eines Mittelstreifens auf Autobahnen wurden anschließend für alle weiteren Strecken wie auch die A 9 grundsätzlich Auswertungen mit Querneigung (radienabhängig rückgerechnet gemäß RAA) sowie modifizierten Augpunkten in der Mitte des linken Fahrstreifens ( $T = 4,6$  m) durchgeführt. Insbesondere die Berücksichtigung eines – abhängig vom gewählten Rückhaltesystem tatsäch-

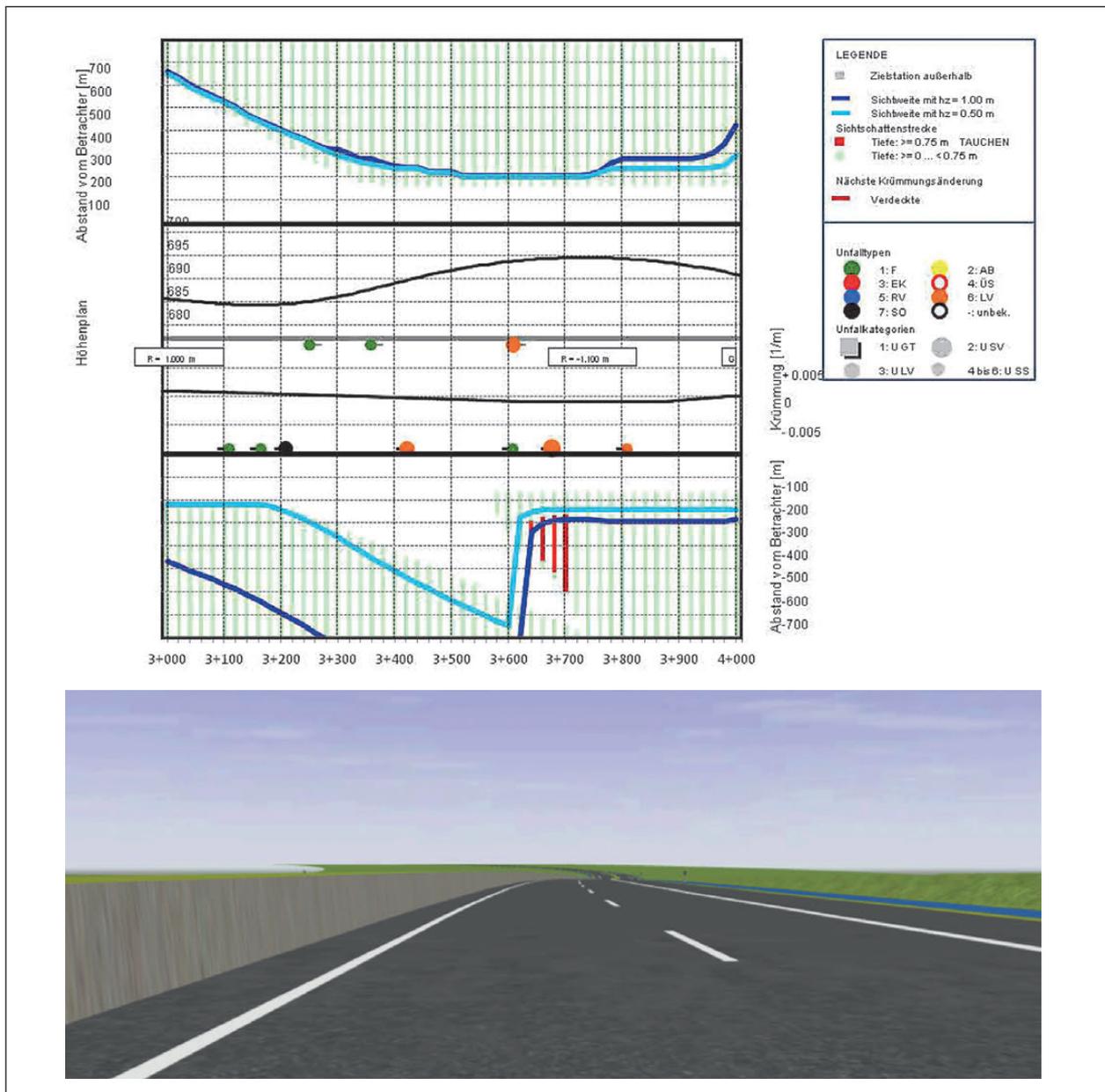


Bild 127: Sichtschattenstrecke auf der A 9 bei Station 3+700 entgegen der Stationierungsrichtung im Sichtschattenband und im Perspektivbild

lich dichten bzw. mindestens durch den flachen Blickwinkel faktisch undurchdringlichen – Mittelstreifens mit einer angenommenen Höhe des Rückhaltesystems von 90 cm erscheint zumindest in diesem Stadium der Untersuchung erforderlich.

Die dazugehörigen Sichtschattenbänder sind in Bild 129 beispielhaft für die Stationsbereiche 3+000 bis 4+000 und 6+000 bis 7+000 zusammengestellt, um evtl. Unterschiede ableiten zu können.

Aus Bild 129 ist erkennbar, dass bei Sichtschattenstrecken, die sich aus der Trassierung ergeben (Stationsbereich 3+000 bis 4+000), nahezu keine Unterschiede zwischen den Abbildungen mit und

ohne Querneigungseinfluss bzw. mit verschiedenen Augpunktlagen bestehen. Anhand des Stationsbereiches 6+000 bis 7+000 kann vor allem abgeleitet werden, dass bei einer Lage des Augpunktes näher am Mittelstreifen die Sichtschattenstrecken eine größere Ausdehnung erfahren. Weiterhin deutet sich an, dass insgesamt mehr Sichtverdeckungen (unabhängig von deren Tiefe) entstehen. Auch werden zwangsläufig geringere, gleichwohl realistischere Sichtweiten in Linkskurven detektiert.

Parallel zur Nachbildung der Sichtschattenbänder mit den Regularien gemäß H ViSt wurde auch die Implementierung der Rechengrundlagen für relativ

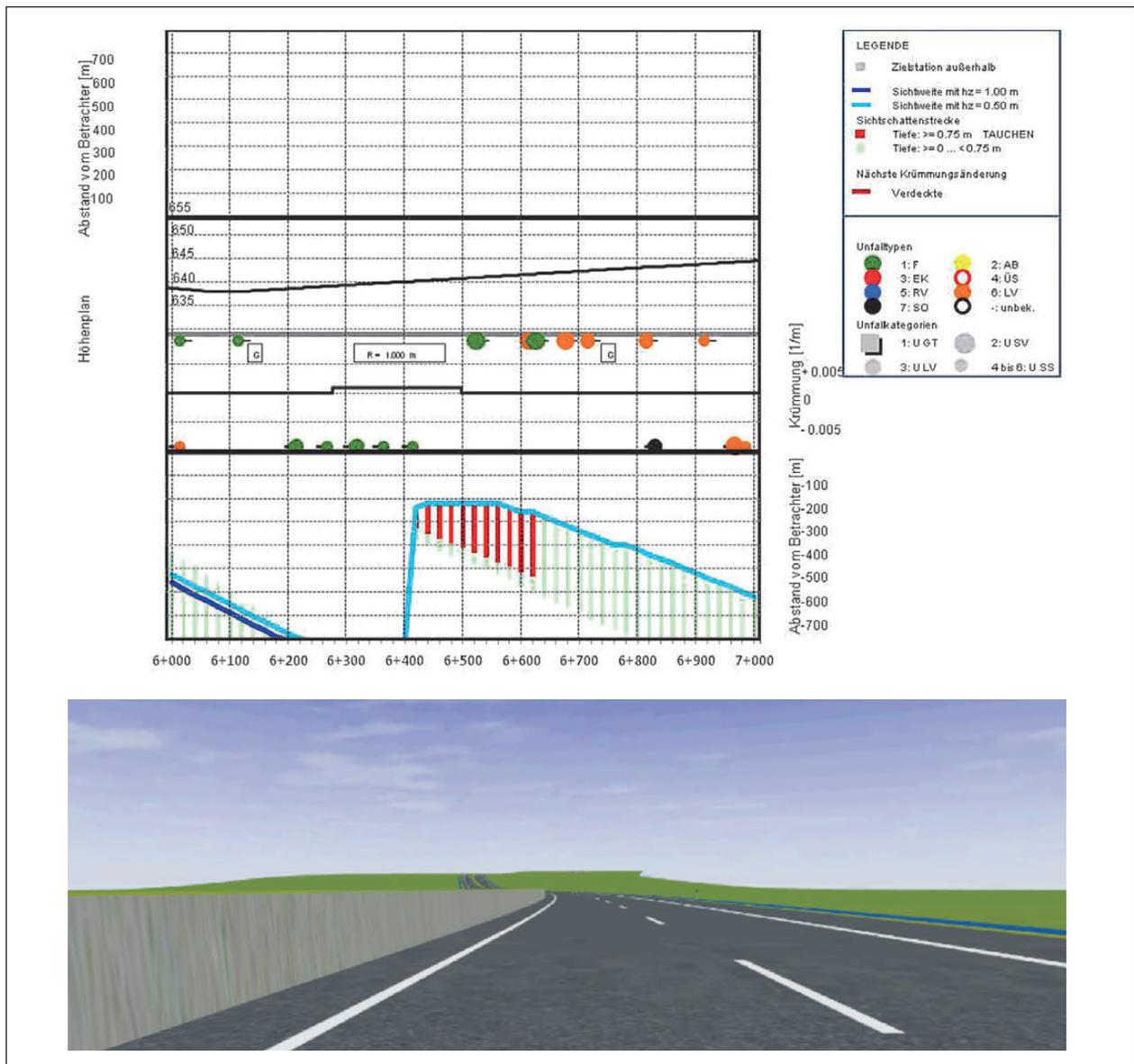


Bild 128: Sichtschattenstrecke auf der A 9 bei Station 6+500 entgegen der Stationierungsrichtung im Sichtschattenband und im Perspektivbild

sichtbare Fahrbahnflächen für Autobahnquerschnitte überprüft. Die Auswertung der relativen sichtbaren Fahrbahnoberflächen im Kurvenscheitel als Maßstab für die vorausliegende Kurve hat sich dabei für die Beurteilung von Wannenerüberlagerungen als am geeignetsten erwiesen. In früheren Vorhaben betrachtete Verfahren zur direkten Darstellung der Verhältnisse der überlagerten Lageplanradien und Höhenplanelemente (R/H) erbrachten keine Verbesserung. Beispielhaft sind in Bild 130 und in Bild 131 zwei Sichtschattenbänder dargestellt, die auch für Autobahnen die prinzipielle Tauglichkeit dieser Verfahren mit relativen Fahrbahnoberflächen  $< 1$  zur Detektion von Flattern, Stauchung o. ä. (Bild 130, Station 29+300) und  $> 1$  zur Detektion von Wannenzerrungen (Bild 131, Station 53+200) aufzeigen.

Allerdings ist auch festzuhalten, dass diese Defizite auch ohne quantitative Verfahren relativ einfach detektierbar sind: Die Wannenausrundungsparameter, die an den Beispielstrecken zur Detektion von Wanneneffekten geführt haben, sind deutlich kleiner als die Mindestparameter nach RAA, so dass bei Neu- und Ausbauten nach heutigem Standard davon auszugehen ist, dass dieses Phänomen nur noch äußerst selten und abgeschwächt auftreten kann. Auch Flattern als Ausprägung relativer sichtbarer Fahrbahnoberflächen  $< 1$  ist im Höhenplan relativ leicht erkennbar. Stauchungen wurden bei den Untersuchungsstrecken nur in den Flatterabschnitten detektiert. Insgesamt treten sie auch nicht nennenswert häufig auf. Angesichts des relativ geringen Nutzens und der Gefahr, durch eine erweiterte Darstellung eher Verunsicherung

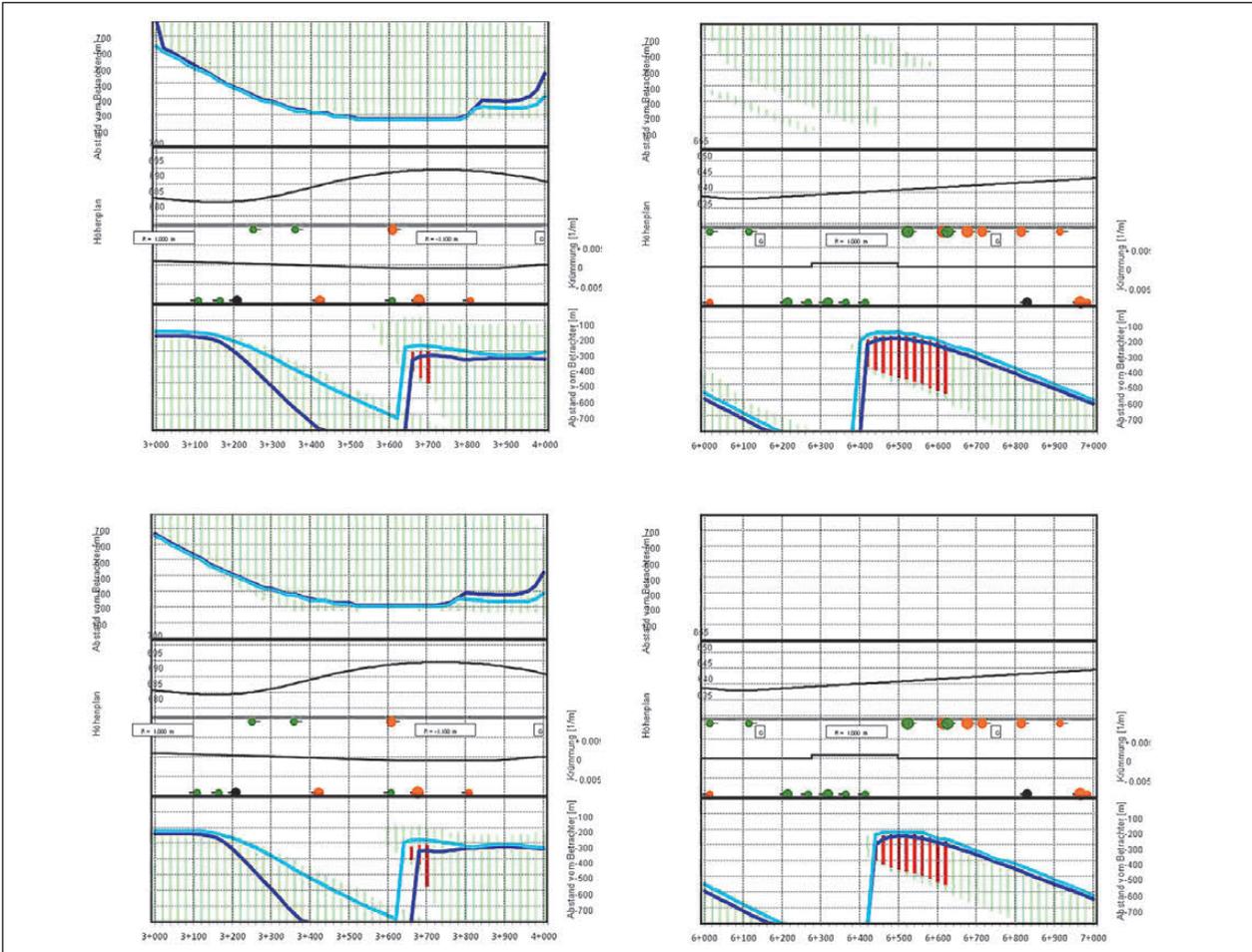


Bild 129: Sichtschattenbänder zum Vergleich der Eingangsgröße Augpunktlage (links: Stationen 3+000 bis 4+000, rechts: Stationen 6+000 bis 7+000; oben: Augpunkt Mitte des linken Fahrstreifens, unten: Leitlinie; alle Bilder mit Querneigungseinfluss)

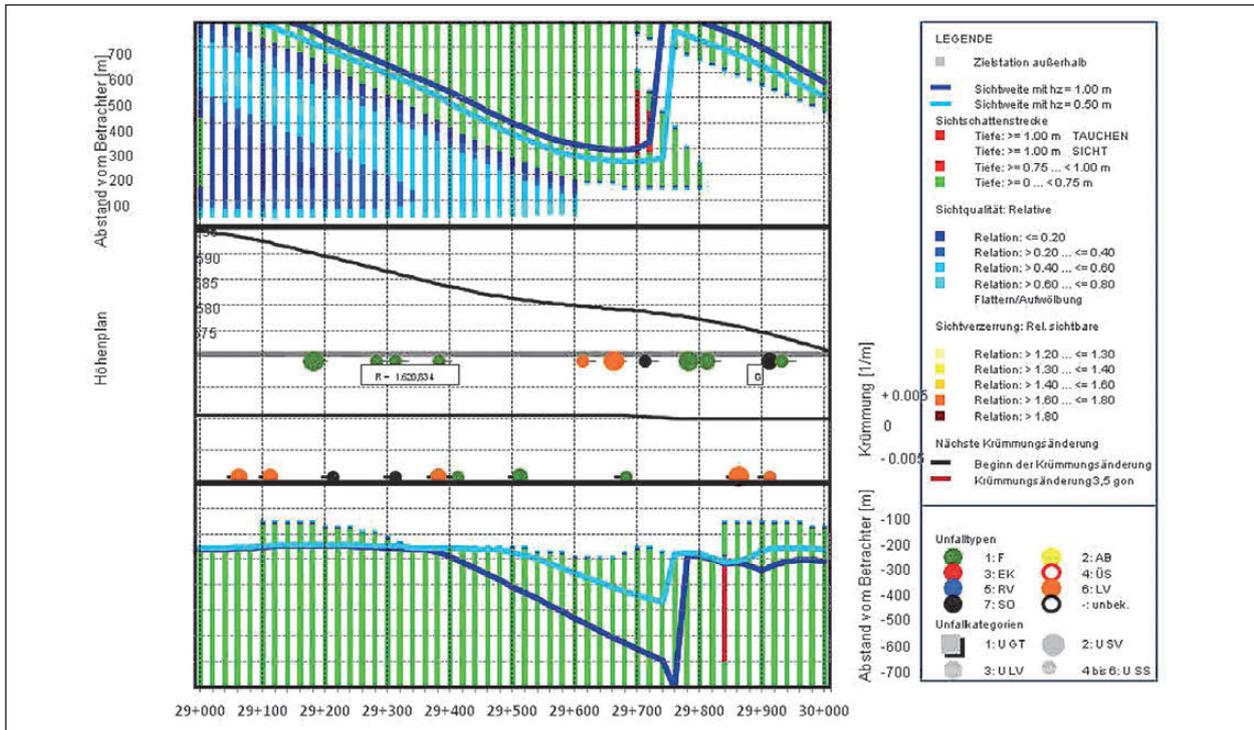


Bild 130: Sichtschattenband der A 9 mit relativen sichtbaren Fahrbahnoberflächen: Flattern bei Station 29+300

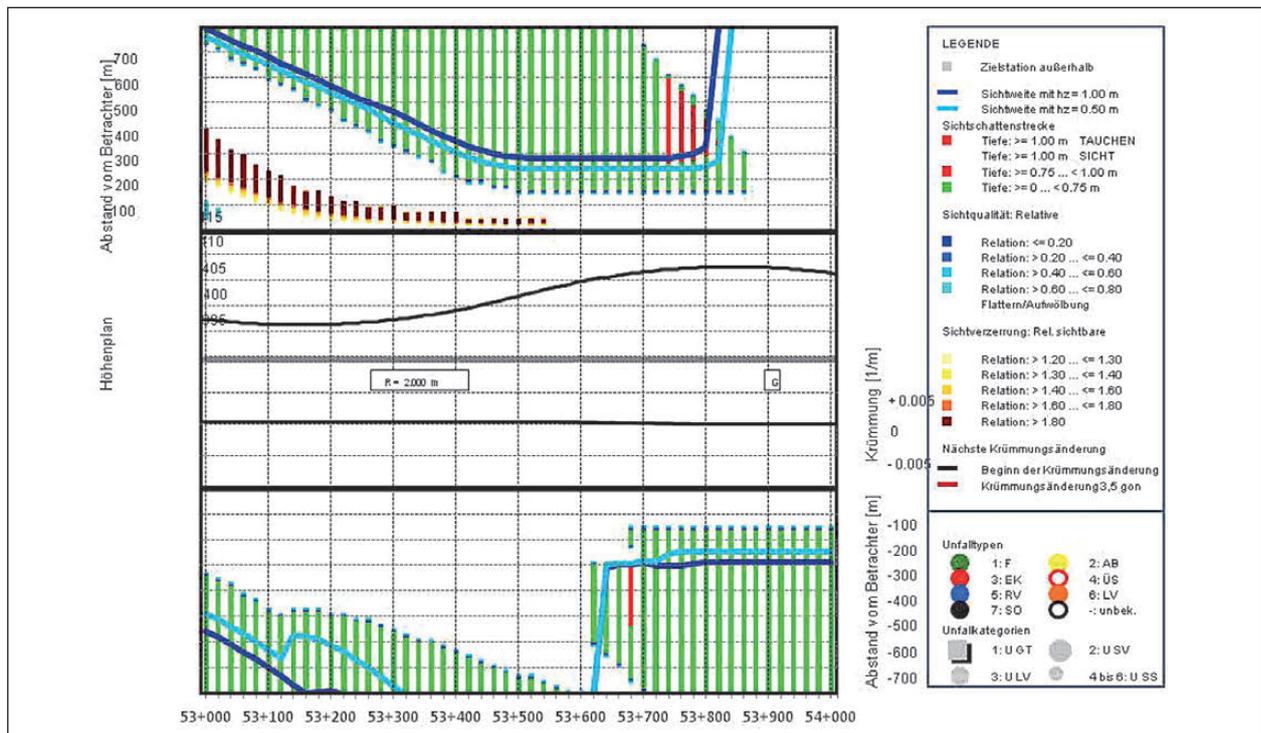


Bild 131: Sichtschatenband der A 9 mit relativen sichtbaren Fahrbahnoberflächen: Tendenz zur Sichtverzerrung bei 53+200

beim Nutzer des Sichtschatenbandes hervorzurufen, wird daher empfohlen, auf diese Detektion zu verzichten.

Für die quantitativen Betrachtungen und Überlagerungen mit dem Unfallgeschehen wurden in den weiteren Schritten grundsätzlich ein Querschnitt mit zweistreifigen Richtungsfahrbahnen (RQ 31), regelkonforme Querneigungen und eine Augpunkt-lage in der Mitte des linken Fahrstreifens verwendet. Die Querschnittsbreite (2- bzw. 3-streifig) ist dabei von deutlich untergeordneter Bedeutung. Aus Gründen der Vergleichbarkeit auch der abgeleiteten Perspektivbilder stand aber eine konstante Querschnittsbreite für alle Strecken im Vordergrund.

### 5.3.2 Unfallanalyse auf den Autobahnabschnitten unter dem Aspekt der räumlichen Linienführung

Die Unfalldaten wurden den Stationierungsdaten der Untersuchungsstrecken zugeordnet. Dies war die Grundlage für alle weiteren strecken- und richtungsbezogenen Analysen. Für den ersten Analyseschritt einer optischen Überprüfung wurden die Unfalldaten in die Eigenschaftsbänder implementiert. Dazu wurden die Unfalldaten (Jahre 2004 bis 2006) differenziert nach Unfalltyp und Unfallkategorie richtungsbezogen jeweils am Rande der Sichtschaten-

bänder der jeweiligen Richtung eingeblendet. Nach einer ersten Auswertung mit allen Unfalltypen, bei der erwartungsgemäß außerhalb der Anschlussstellen die Unfalltypen 1 (Fahrunfall) und 6 (Unfall im Längsverkehr) bestimmend waren, wurden die weiteren Auswertungen zur Vermeidung von Sondereffekten nur noch mit diesen beiden Unfalltypen fortgeführt. Die qualitative Betrachtung zeigt zunächst, dass Unfallschwerpunkte vor allem im Umfeld von Unstetigkeiten in der Lageplantrassierung zu erkennen sind.

Mit dem Ziel einer großräumigen Betrachtung wurden Streckenbänder über 10 km mit Unfallkostenraten verschiedener Mittelungslängen erstellt, die alle Unfallkosten aus dem Streckenbereich enthalten, die in den nächsten 200 m, 300 m, 400 m bzw. 500 m in Fahrtrichtung nach der betrachteten Station auftreten. Außerdem sind in den Diagrammen die ermittelten quantitativen Größen der räumlichen Linienführung als auch die Lage- und Höhenplan-krümmungen eingetragen. Es zeigt sich auch durch die gewählte 10-fache Überhöhung der Lage- gegenüber der Höhenplan-krümmung, dass die verwendeten Verhältnisse R/H in Wannen in aller Regel  $< 1/10$  betragen und daher in der Regel nicht als Defizit detektiert werden. Starke Ausschläge in den Unfallkostenraten lassen sich nicht systematisch konkreten Defiziten der räumlichen Linienführung zuordnen. Neben Ausschlägen im Zusammenhang

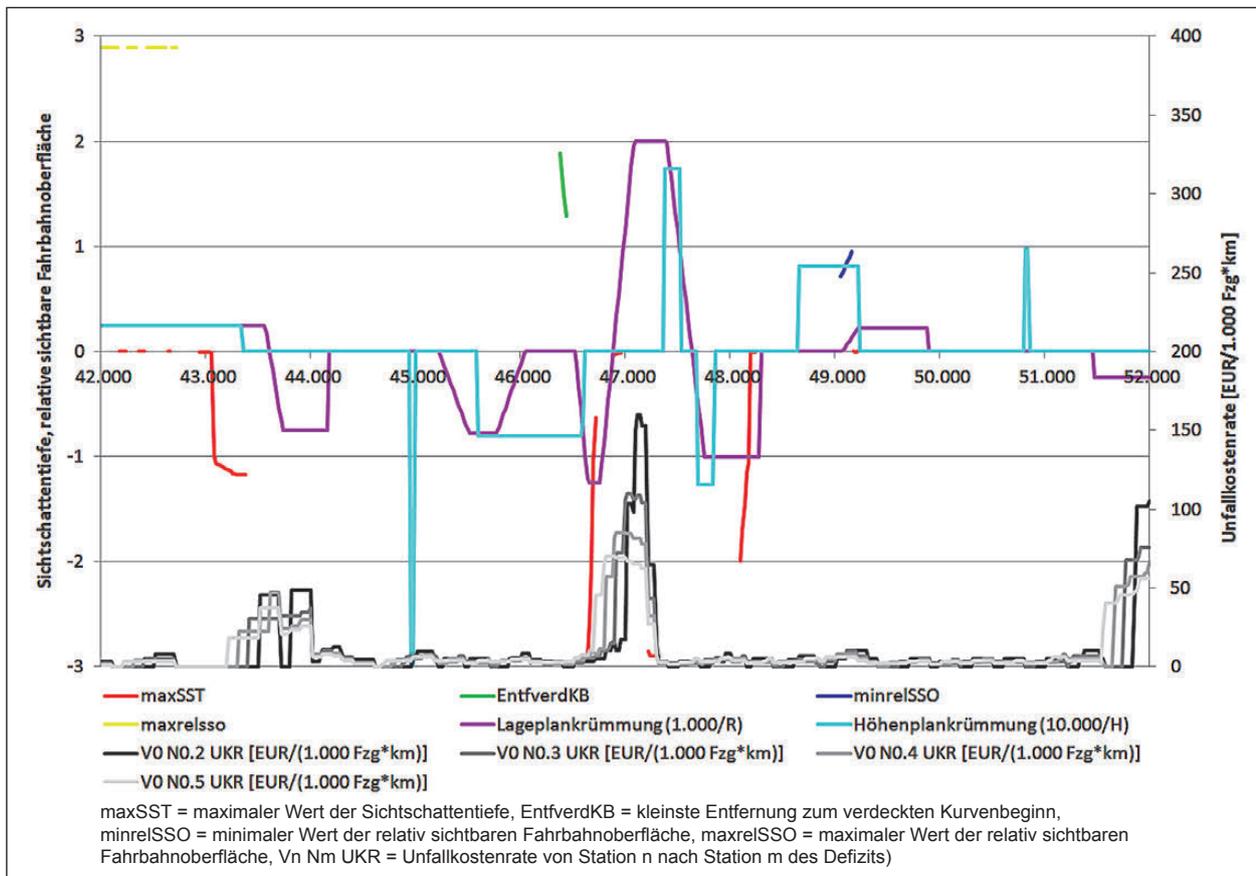


Bild 132: Unfallkostenraten der Defizite in Überlagerung mit den Lage- und Höhenplankrümmungen der A 9, in Stationierungsrichtung von km 42 bis km 52

mit Radien im unteren Bereich der Regelwerte sind auch Stellen auffällig, die großräumig durch ungünstige Überlagerungen von Lage- und Höhenplanelementen auffallen. In diesen Bereichen treten häufig auch konkret ermittelte Defizite auf, allerdings ist eine kleinräumige Zuordnung von Unfällen und Defiziten nicht möglich. Bereiche großräumig ungünstiger Überlagerung sind in dieser Darstellungsart z. B. an deutlich mehr Krümmungsänderungen im Höhenplan erkennbar sowie an teilweise systematischem Versatz der Lage- und Höhenplanwendepunkte. Im Gegenzug sind Bereiche, in denen großräumig Radien größer  $R = 1.500$  m verwendet werden, in aller Regel unfallunauffällig (z. B. A 9 aufsteigend km 42 bis km 52 mit Peak bei km 47), großräumig schlechte Überlagerung zwischen km 76 und km 79 (Bild 132 und Bild 133).

Unabhängig von den optischen Auswertungen der klein- und großräumigen Streckenbänder wurden auch streckenübergreifend Zusammenhänge zwischen einzelnen Kennwerten räumlicher Linienführung und den beschriebenen gleitenden Mittelwerten über den entsprechenden Abschnitt nach Beginn der Defizite betrachtet. Beispielhaft sind in Bild 134 und in Bild 135 die Überlagerungen der

Unfallkostenraten zu den minimalen Sichtschattentiefen bzw. kleinsten Entfernungen zum verdeckten Kurvenbeginn dargestellt. Hinsichtlich der Sichtschattentiefen ist daraus erkennbar, dass die maximalen Unfallkostenraten bei geringeren Sichtschattentiefen bis ca. 4 m auftreten. Allerdings liegen, wie auch bei der Beurteilung von Kurvenbeginnen und der anderen Phänomene, viele Bereiche mit detektiertem Defizit vor, die sehr geringe Unfallkostenraten aufweisen. In diesen Darstellungen sind zwangsläufig all jene Bereiche nicht ausgewiesen, die keine quantifizierten Defizite aufweisen. Inwieweit die detektierten Defizite also tatsächlich zu erhöhten Sicherheitsrisiken führen, ist wegen der fehlenden Vergleichbarkeit zu Situationen guter räumlicher Linienführung nicht möglich.

Es wurden weiterhin, um allgemein die Unfallkenngrößen in Bereichen mit Defiziten aus der räumlichen Linienführung denen aus Bereichen ohne Defizite gegenüberstellen zu können, defizitbezogen die Unfallkenngrößen aus den Bereichen mit einem entsprechenden Defizit und den defizitfreien Bereichen gegenübergestellt. Auch hierbei spielt die Ausdehnung eines Defizits eine Rolle: Bei den Abschnitten mit Defiziten wurde die jeweilige Ausdeh-

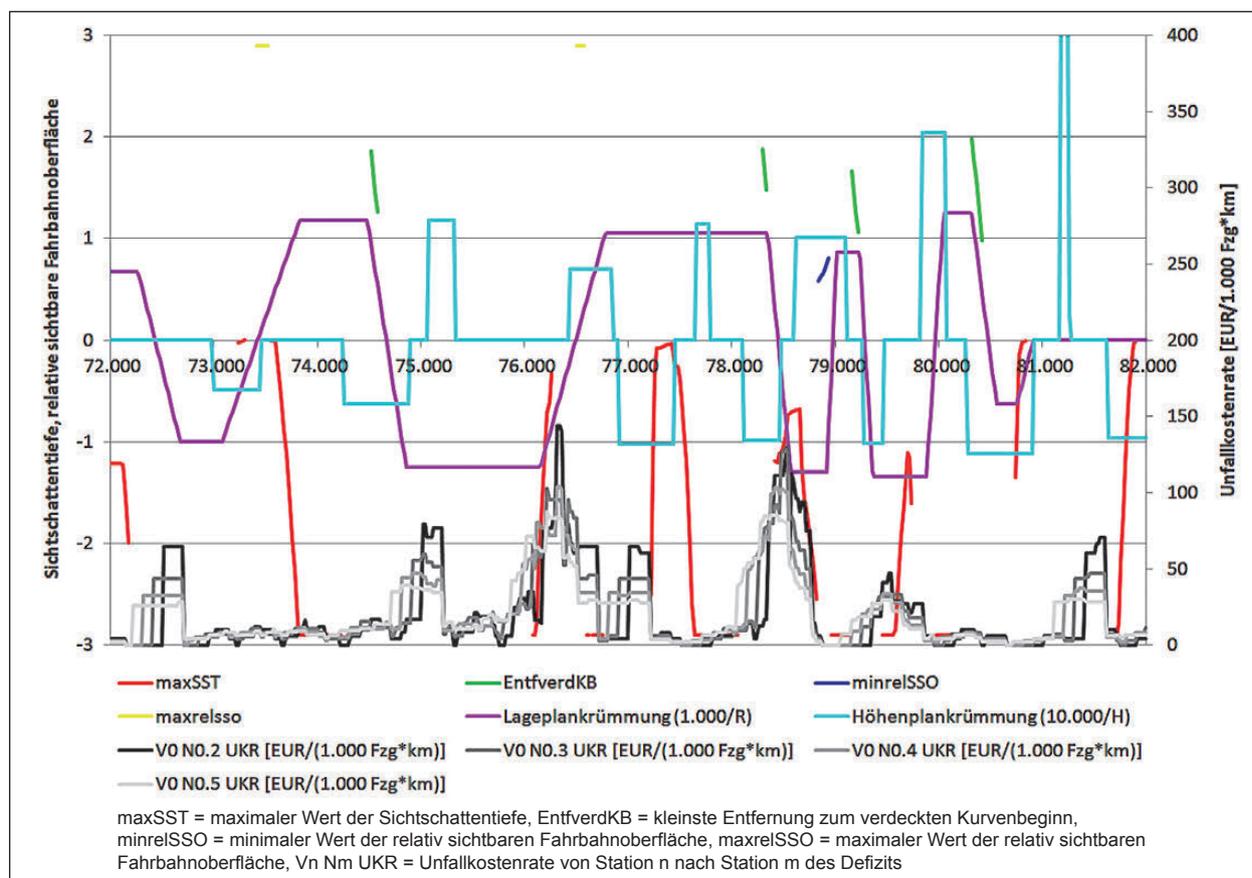


Bild 133: Unfallkostenraten der Defizite in Überlagerung mit den Lage- und Höhenplankrümmungen der A 9, in Stationierungsrichtung von km 72 bis km 82

nung angesetzt, die zwischen den Defizitabschnitten liegenden Vergleichsabschnitte wurden rechnerisch in Abschnitte von 300 m unterteilt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, da bei dieser Ausdehnung auch die Länge der Ausprägungen der Defizite gedeckelt ist.

Bild 136 bis Bild 140 zeigen beispielhaft Auswertungen zu Sichtschatten, verdeckten Kurvenbeginnen und Sichtweitenbeschränkungen. Allgemein ist anzumerken, dass die Analyse nach zugrundeliegenden Trassierungsparametern nur tendenzielle Aussagen zulässt. Der Hintergrund dazu ist, dass eine Vielzahl an verschiedenen Kombinationen aus Lage- und Höhenplanelementen sowie Querschnittseinflüsse zur Detektion eines Defizits führen können. Die Lage der Elementübergänge gegenüber den Defizitausdehnungen ist daher ebenfalls vielfältig. Dies betrifft auch die zugehörigen Elemente, die innerhalb eines Defizits wechseln können. In den gezeigten Diagrammen sind jeweils die Elemente am Beginn des detektierten Defizits zugrundegelegt.

Zur besseren optischen Abgrenzung der Bereiche mit und ohne Defizite sind in den nachfolgenden

Abbildungen die Unfallkostenraten der Abschnitte ohne Defizit ausprägung mit negativem Vorzeichen dargestellt. Die Defizit ausprägungen sind farblich in Gruppen zusammengefasst und über die Defizit ausdehnung dargestellt. Da bei verdeckten Kurvenbeginnen die Defizit ausdehnung wenig Aussagekraft besitzt, sind die Unfallkostenraten in Bild 140 über die zugeordneten Parameter des nachfolgenden Höhenplanelementes aufgetragen.

Auch diese Darstellung zeigt, dass die Abschnitte mit Defiziten auch im direkten Vergleich mit Abschnitten ohne Defizite keine Sicherheitsauffälligkeiten aufweisen. Zwar ist innerhalb der Abschnitte teilweise erkennbar, dass bestimmte Ausprägungen zu höheren Unfallkostenraten führen, so z. B. für das Defizit verdeckte Kurvenbeginne Abschnitte, bei denen der Kurvenbeginn erst 40 m bis 60 m vor dem Erreichen sichtbar wird. Gegenüber Abschnitten ohne Defizit wird allerdings erkennbar, dass diese zumindest in der Spitze höhere Unfallkostenraten aufweisen, anteilmäßig sind diese einzelnen Spitzen der Unfallkostenraten allerdings vernachlässigbar gering. Der überwiegende Anteil der 300 m-Vergleichsabschnitte beinhaltet ohnehin keine Unfälle, dies gilt allerdings auch für die Abschnit-

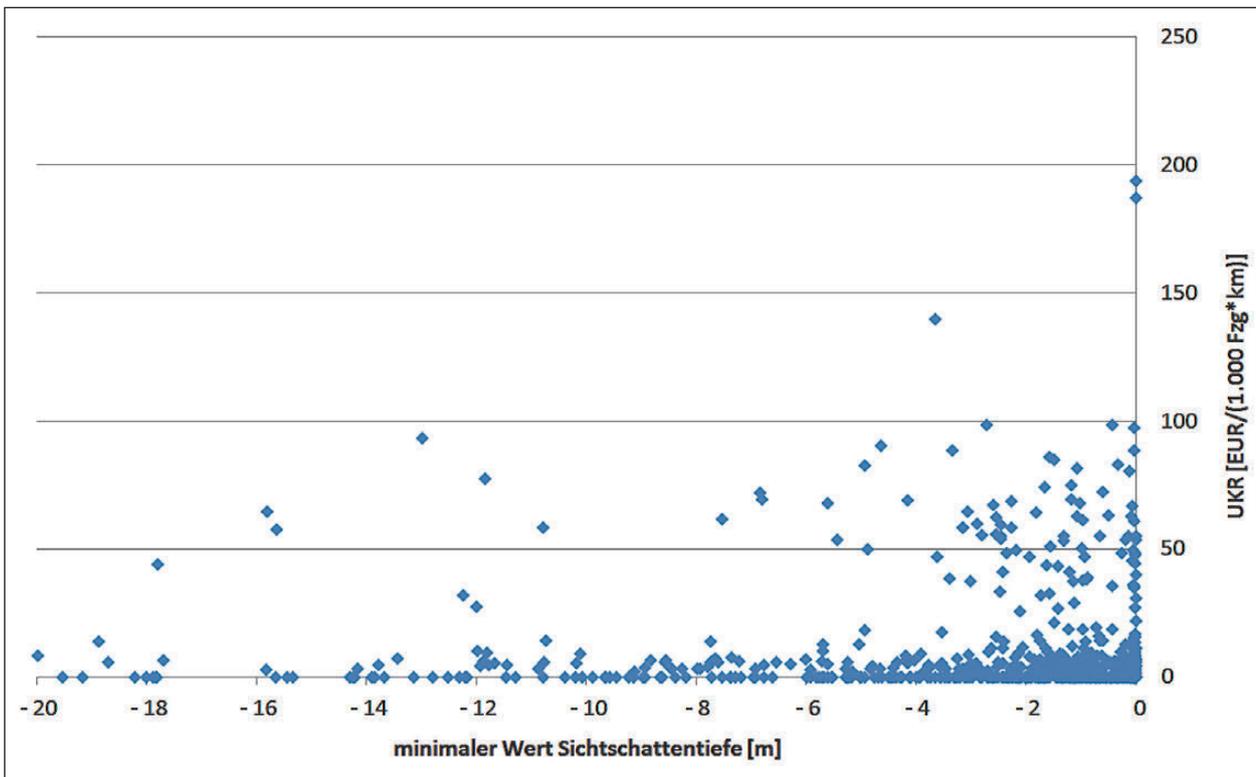


Bild 134: Sichtschattentiefe (betrachteter Unfallbereich: 200 m)

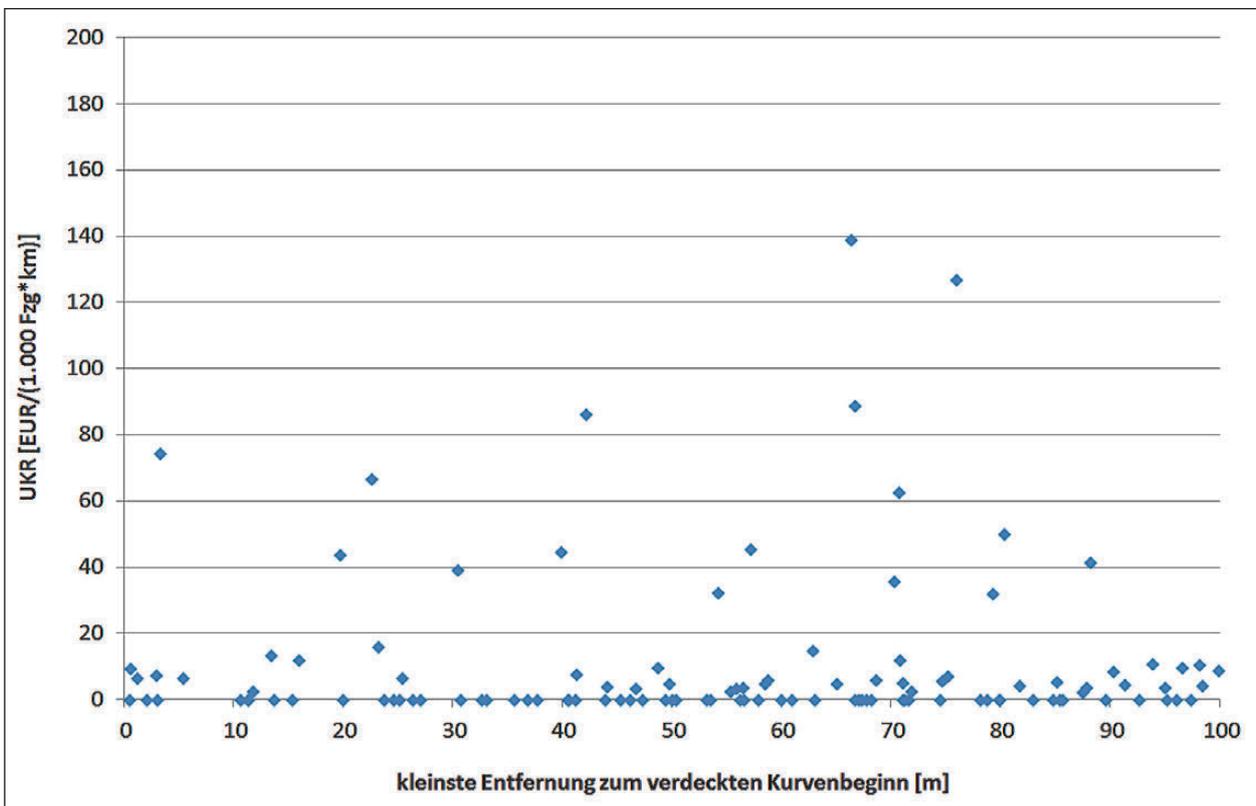


Bild 135: Verdeckter Kurvenbeginn (betrachteter Unfallbereich: 200 m)

te mit Defiziten. Um die Punktwolken vergleichbar zu machen, sind als horizontale Linien die 90.-Perzentilen der jeweiligen Ausprägungen dargestellt. Diese Perzentilwerte betragen bei den Bereichen

ohne Defizite grundsätzlich 0, mit Defiziten liegen die 90.-Perzentilen bei Werten zwischen 10 EUR/1.000 Kfz\*km und 20 EUR/1.000 Kfz\*km, d. h. immer noch unterhalb der mittleren UKR für

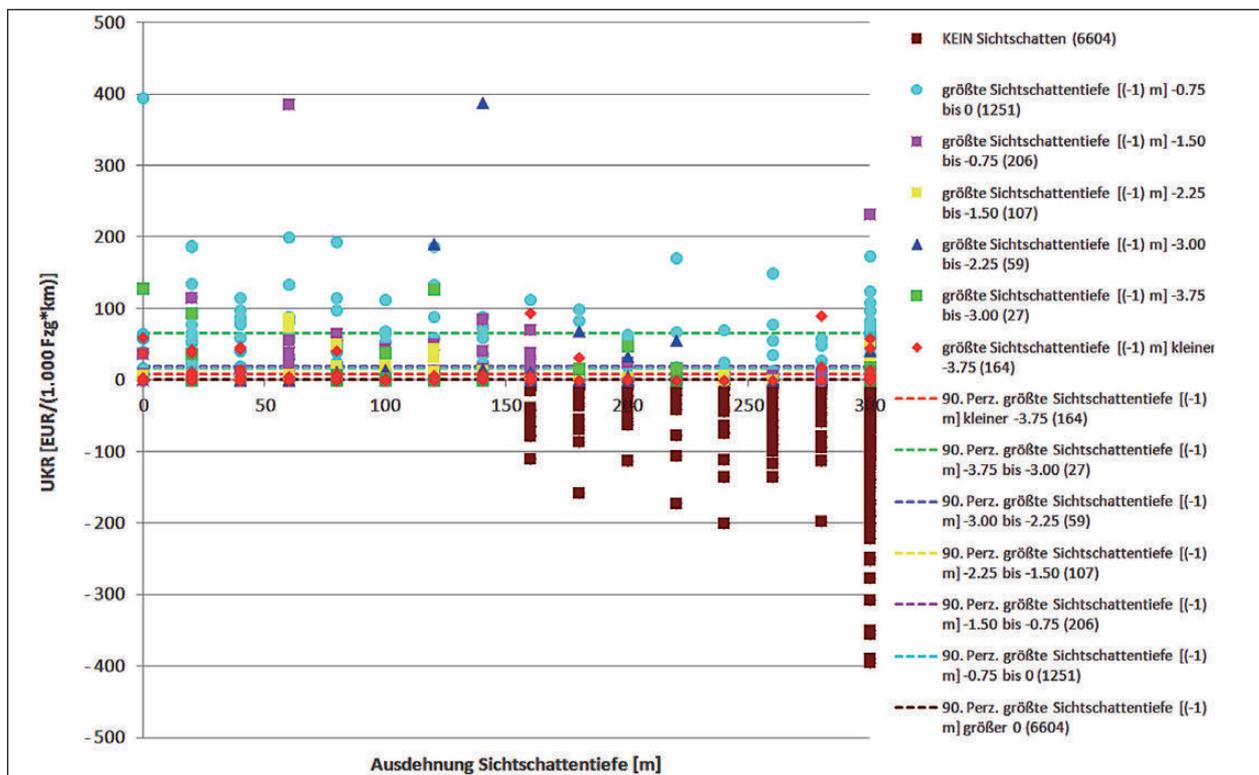


Bild 136: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit Sichtschattentiefe

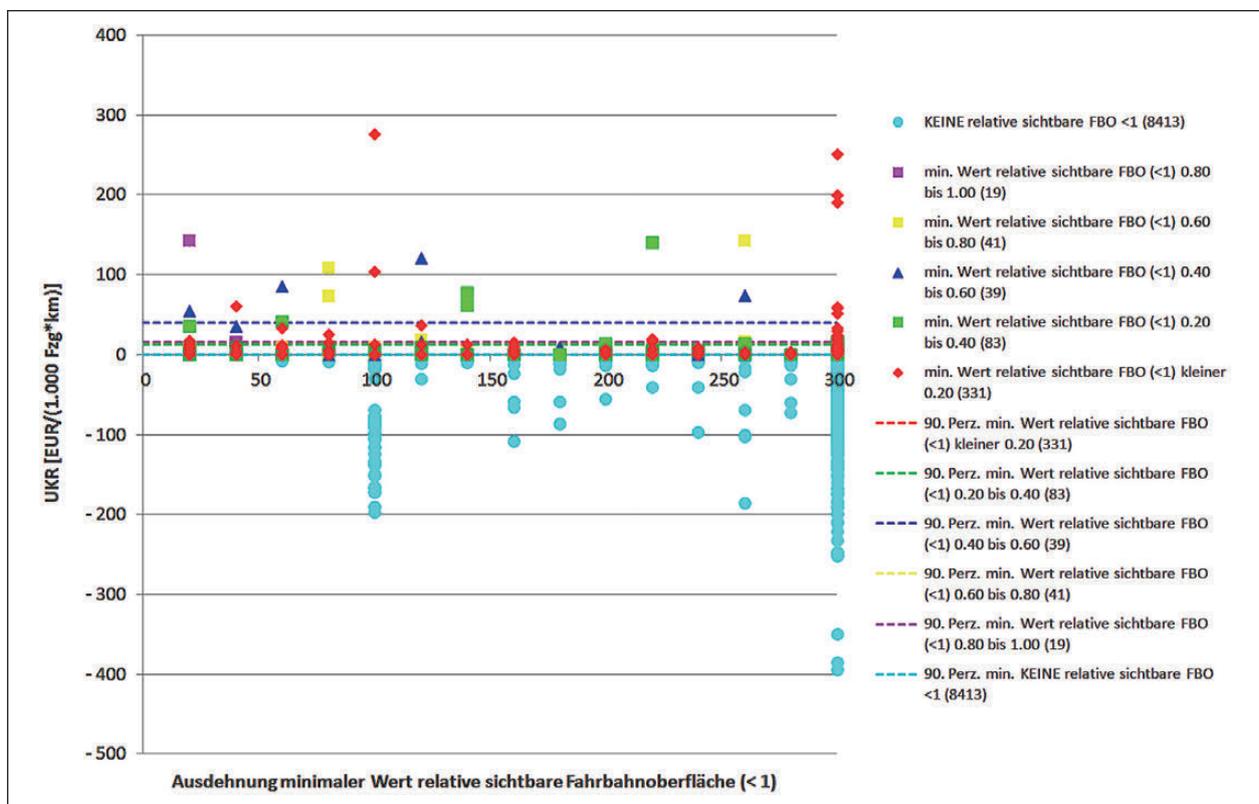


Bild 137: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit minimale relative sichtbare Fahrbahnoberfläche

Autobahnen. Bei diesen Werten ist allerdings zu bedenken, dass die Mittelungslängen der UKR mit Defiziten teilweise relativ kurz sind, da sie die jeweilige Ausdehnung des Defizits beinhalten. Je kürzer die

Mittelungslängen sind, desto anfälliger sind die Ergebnisse für Ausreißer bei einem schweren Unfall in diesem Bereich.

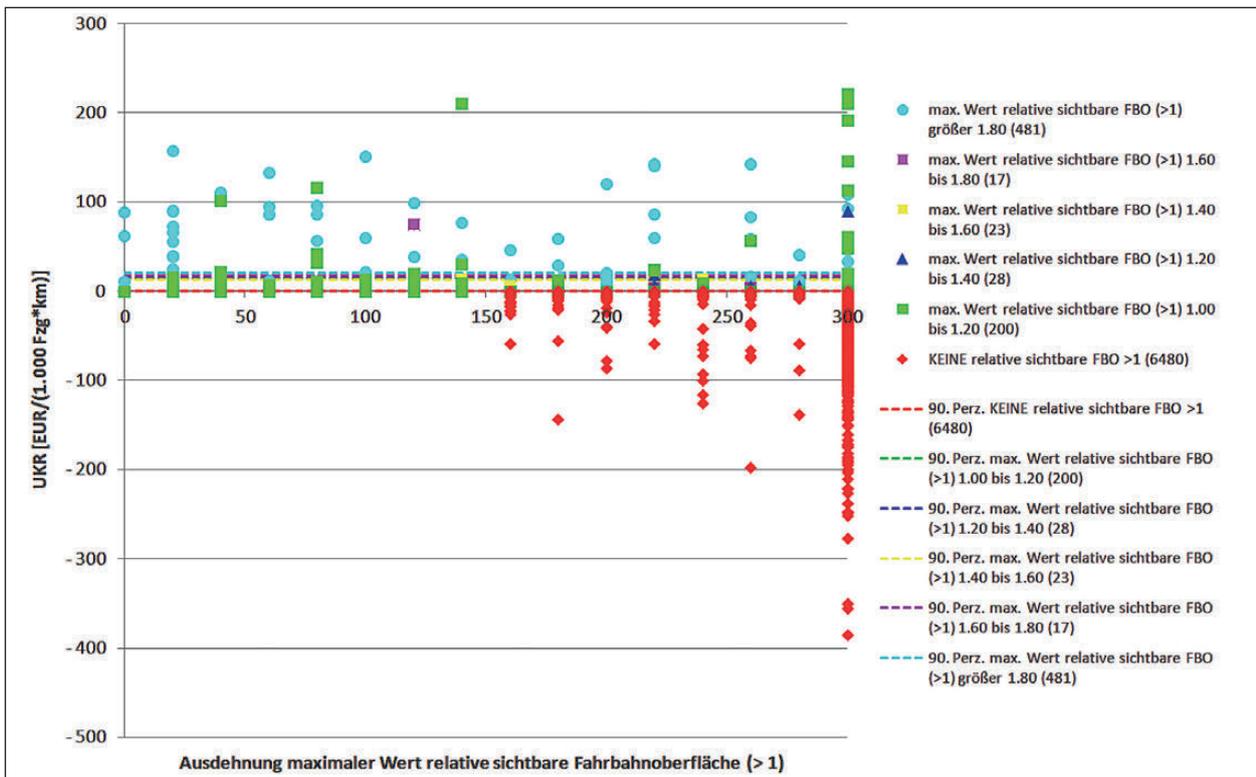


Bild 138: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit maximale relative sichtbare Fahrbahnoberfläche

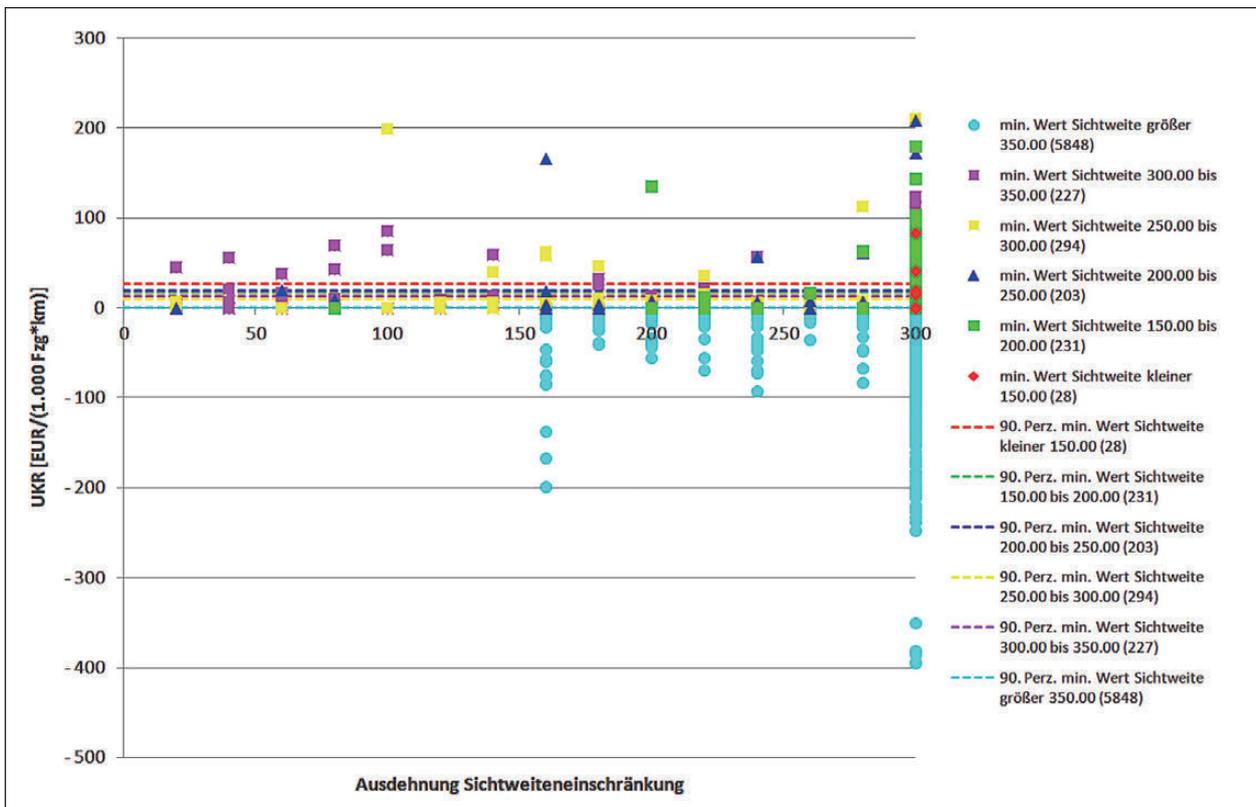


Bild 139: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit minimale Sichtweite

Insgesamt ist erkennbar, dass diese Perzentile in Abschnitten mit Defiziten höher liegen, allerdings führen z. B. bei verdeckten Kurvenbeginnen lediglich 3 der insgesamt 27 Streckenabschnitte zu diesem Wert.

Auf der Grundlage all dieser Unfallauswertungen – sowohl kleinräumig als auch großräumig – ist bei keinen der Defizite davon auszugehen, dass sie zu belastbar höheren Unfallkennwerten auf Autobahnen führen. Für die qualitativ erkennbar höheren

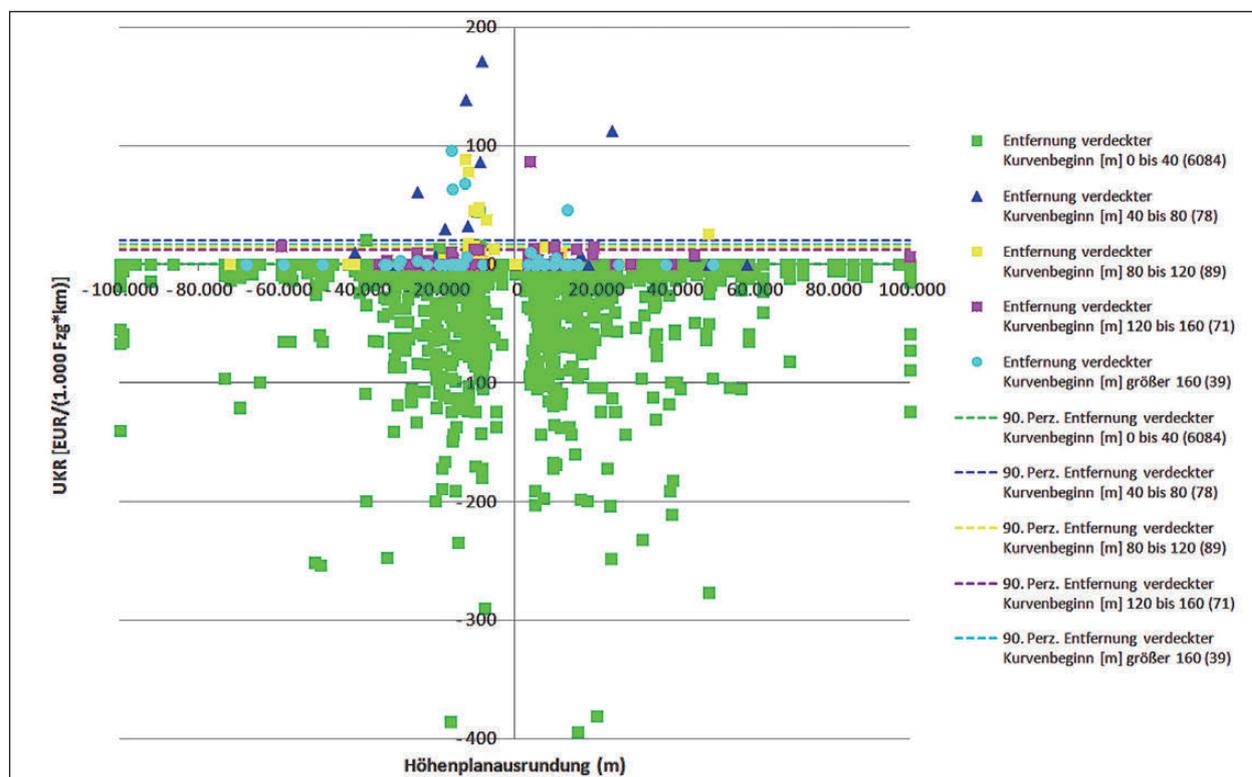


Bild 140: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit verdeckter Kurvenbeginn

Unfallkostenraten im Bereich mit großräumig unbestimmter Lage- und Höhenplantrassierung gibt es allerdings keinen quantitativ belastbaren Beleg.

### 5.3.3 Fehleranalyse

Für die Erstellung des DGM zur Ableitung der Sichtschattenbänder wurden einige Annahmen getroffen, die potenzielle Fehlerquellen beinhalten:

- Für alle Strecken wurden die Lage- und Höhenplanelemente aus der Nachtrassierung verwendet.
- Für die Querneigungen wurden keine realen Werte aus Plänen oder Befahrungen verwendet, sondern aus den nachtrassierten Lageplandaten auf Basis der RAA anzusetzende Werte verwendet. Tendenziell sind daher die verwendeten Querneigungen gegenüber den tatsächlichen eher höher als zu niedrig.
- Im Querschnitt wurde auch die Vereinfachung einer durchgehenden Betonschutzwand mit einer Höhe von  $h = 90$  cm im Mittelstreifen vorgenommen.
- Die Höhe des Umfeldgeländes wurde entsprechend der Tangentschnittpunkte angenommen, so dass automatisch im Kuppenbereich Einschnitte und im Wannbereich Dämme ent-

standen sind. Dazwischen sind die Übergänge in das Gelände nahezu horizontal.

- Der Augpunkt wird in der Mitte des linken Fahrstreifens angenommen.
- Der Abstand der Querprofile wurde analog zu den Festlegungen im H ViSt mit 20 m angenommen.

Fehler in der quantitativen Auswertung können theoretisch entstehen, wenn die berechnete Fahrbahn- und Geländeoberfläche wegen fehlerhafter Annahmen nicht korrekt ist. Daraus könnten Fehldetektionen entstehen – entweder fälschlicherweise als Defizit oder fälschlicherweise als defizitfreier Bereich.

Da die meisten Defizite nicht nur knapp über Grenzwerten, sondern deutlich über diesen detektiert wurden, können die aus der Nachtrassierung und den Querneigungsfestlegungen resultierenden potenziellen Fehler vernachlässigt werden.

Bei der Mittelstreifengestaltung rücken die verwendeten Betonschutzwände etwas näher an die Fahrbahn, als es evtl. bei vorhandenen DDSP-Schutzplanken der Fall wäre. Sichtweitendefizite in Linkskurven und das durch den dichten Mittelstreifen an manchen Stellen hervorgerufene Tauchen könnte bei anderen Schutzeinrichtungen anders bewertet werden. Da aber ungeachtet der Materialwahl bei

aktuellen Ausstattungen gemäß RPS (FGSV 2009) von einer ähnlichen Lage im Querschnitt und Höhe auch bei Stahlschutzeinrichtungen auszugehen ist, ist die Defizitbeurteilung auf der Grundlage der räumlichen Trassierung nicht betroffen. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass auch durch Stahlschutzeinrichtungen unter den hier auftretenden spitzen Blickwinkeln nicht durchgesehen werden kann.

Die beschriebene standardisierte Umfeldsituation könnte theoretisch dazu führen, dass in der Realität auftretende andere Geländebewegungen entweder – anders als im Modell – die weiter vorausliegende Fahrbahn verdecken und damit einen Sichtschatten verhindern. Umgekehrt ist aber auch ein Fehler aus dem Umfeld denkbar, der weniger Detektionen mit sich bringen kann. Da bei den relevanteren und häufigeren Defiziten wie verdeckten Kurvenbeginnen und Sichtschatten – trassierungsbedingt oder durch den Mittelstreifen hervorgerufen – der Sichtstrahl in der Regel innerhalb der Kronenbreite verläuft, sind Fehler durch das Gelände nahezu auszuschließen.

Die Annahme des Augpunktes in der Mitte der kritischen Fahrstreifen ist eine übliche Konvention. Sichtweitenbedingte Defizite werden durch diese Fahrstreifenwahl vor allem bei Linkskurven auf Autobahnen eher detektiert, die Lage des Augpunktes eher weiter rechts im Fahrstreifen als bei optimierter Fahrlinie möglich, führt zu leichten Abschwächungen der Ausprägungen. Da auch andere Methoden mit der gleichen Positionierung arbeiten, ist hieraus keine Fehlerquelle ableitbar.

Da die Lage der Querschnittsstationen durch die 20 m-Intervalle ab Station 0 in gewisser Weise zufällig sind, ist im Übergangsbereich zwischen Detektion und Nicht-Detektion eines Defizits die Situation nur bedingt belastbar. Da die meisten Defizite ohnehin erst ab einer gewissen Mindeststrecke relevant werden, ist auch dieser potenzielle Fehler vernachlässigbar.

## 5.4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

In der Untersuchung zur räumlichen Linienführung von Autobahnen wurden folgende mögliche Defizite betrachtet:

- verdeckter Kurvenbeginn,

- Sichtschatten (Tauchen, Springen und Springen mit Versatz),
- Dehnung und Stauchung,
- Knickwirkung im Lageplan,
- Knickwirkung im Höhenplan in der Wanne und in der Kuppe,
- Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan,
- Brettwirkung,
- kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven,
- Flattern,
- Verzerrung der Längsneigung,
- Aufwölbung und Abplattung sowie
- Schlängeln.

Für die nachfolgende Bewertung der o. g. Defizite sind zunächst zwei grundsätzliche Hinweise voranzustellen:

- Die RAA umfassen Autobahnen und autobahnähnliche Straßen von der EKA 1 bis zur EKA 3. Den Entwurfsklassen sind jeweils unterschiedliche Planungsgeschwindigkeiten zugrunde gelegt. Daraus resultiert eine große Spreizung der Mindestwerte für die Entwurfs Elemente im Lage- und Höhenplan. In der Folge kann es Defizite geben, die bei den sehr großen Elementen von Autobahnen der EKA 1 nicht auftreten, dagegen jedoch bei autobahnähnlichen Straßen (EKA 2) und Stadtautobahnen (EKA 3). Darauf wird im Text dann jeweils differenziert hingewiesen. Für die Entwurfsempfehlungen und Schlussfolgerungen ist jedoch berücksichtigt, dass in der Praxis bei Stadtautobahnen die Anforderungen aus der räumlichen Linienführung häufig hinter die Einflüsse aus den städtebaulichen Zwängen und Restriktionen zurücktreten.
- Als Ergebnis der Unfalluntersuchung konnte bei den einzelnen Defiziten kein ausgeprägter nachteiliger Einfluss auf das Unfallgeschehen festgestellt werden. Dies ist sicherlich auf die im Vergleich zu Landstraßen sehr viel größeren Entwurfs Elemente zurückzuführen. Dadurch treten die sicherheitsrelevanten Nachteile von Defiziten in der räumlichen Linienführung gegenüber den gestalterischen Nachteilen zurück. Insofern wird in der folgenden Bewertung auf die Sicher-

heitsauswirkung kein differenzierter Bezug mehr genommen.

### Verdeckter Kurvenbeginn

Verdeckte Kurvenbeginne können unter Verwendung der Mindestparameter nach RAA auftreten. Daher sollte eine neue Tabelle, die zur Vermeidung von verdeckten Kurvenbeginnen die erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn angibt, in die RAA aufgenommen werden. Mit dem Prüfverfahren nach Ziffer 5.3.2 nach H ViSt (Sichtschattenband) liegt eine in Entwurfsprogrammen integrierte Prüfmethode vor. Diese ist auch, wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt wurde, für Autobahnen maßgebend. Daher wird empfohlen, das Prüfverfahren zukünftig auch für Autobahnen anzuwenden. Das Verfahren braucht aber nicht extra in den RAA wiederholt zu werden.

### Sichtschatten

Sichtschatten und kritische Sichtschatten gemäß der Definition nach RAL können auch bei richtliniengerechter Trassierung nach RAA auftreten. Für Autobahnen sind jedoch Sichtschatten nicht sicherheitsrelevant und daher auch nicht kritisch im Sinne der RAL. Trotzdem wird empfohlen, in den RAA darauf hinzuweisen, Sichtschatten zu vermeiden. Der Nachweis kann nach H ViSt in Analogie zur Überprüfung bei Landstraßen über Sichtschattenbänder erfolgen.

### Dehnung und Stauchung:

Dehnungen wurden nur bei Wannenhalmessern festgestellt, die kleiner als die Mindestparameter nach RAA sind. Oberhalb der Mindestparameter trat das nicht auf. Weiterhin konnten auch Stauchungen festgestellt werden, jedoch nur wenige. Die Phänomene Dehnung und Stauchung brauchen daher nicht in die RAA aufgenommen werden.

### Knick im Lageplan

Die Knickwirkung im Lageplan wird unter der Annahme, dass der Klothoidenparameter ein Drittel des Kreisbogenradius beträgt, bei Radien  $R \leq \text{ca. } 600 \text{ m}$ , bei größeren Klothoidenparametern erst bei kleineren Radien wahrgenommen. Das betrifft vor allem Autobahnen der EKA 2 und der EKA 3. Ein entsprechender Hinweis sollte in die RAA aufgenommen werden.

### Knick im Höhenplan

Im Bereich von Kuppen konnte keine Knickwirkung festgestellt werden. Dieses Phänomen ist für Autobahnen nicht maßgebend. Wird jedoch eine Gerade

im Lageplan mit kleinen Wannenhalmessern im Höhenplan überlagert, kann eine Knickwirkung wahrgenommen werden. Solche Knickwirkungen im Höhenplan lassen sich bei folgenden Wannenhalmessern vermeiden:

- $H_W \geq 3.500 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 12 \%$ ,
- $H_W \geq 4.750 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 8 \%$  und
- $H_W \geq 7.000 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 4 \%$ .

Diese betreffen Autobahnen der EKA 1 B bei geringen Längsneigungsdifferenzen sowie Autobahnen der EKA 2 und der EKA 3. Es wird empfohlen, in den RAA auf das Phänomen hinzuweisen.

### Aufwölbung und Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan

Bei Kuppen konnten keine Defizite festgestellt werden. Bei Wannenhalmessern wurde neben der Knickwirkung auch eine Aufwölbung wahrgenommen. Diese entsteht durch die Überlagerung von der Wanne und der Anrampung der Fahrbahnränder im Kreisbogen. Die Phänomene treten in Abhängigkeit von dem Wannenhalmesser und der Längsneigungsdifferenz auf und lassen sich nur bei folgenden Parameterkombinationen vermeiden:

- $H_W < 2.500 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 12 \%$ ,
- $H_W < 3.000 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 8 \%$  und
- $H_W < 6.000 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 4 \%$ .

Da aber alle Mindesthalmesser nach RAA größer sind, treten die Phänomene in der Praxis häufig auf. Um die Phänomene abschwächen zu können, sollten somit der Wannenhalmesser und/oder die Längsneigungsdifferenz verringert werden. Es wird empfohlen, in den RAA darauf hinzuweisen. Als sicherheitsbedenklich haben sich diese Phänomene jedoch nicht gezeigt.

### Kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven

Kurze Zwischengeraden zwischen zwei gleichgerichteten Kurven unterbrechen den Linienfluss einer durchgehenden Kurve optisch nicht. Dieses Phänomen ist für Autobahnen nicht maßgebend und sollte nicht in die RAA aufgenommen werden.

### Flattern und Schlängeln

Flattern und Schlängeln kann unter Verwendung der Mindestparameter nach RAA auftreten. Flattern wird bei breiteren Querschnitten stärker wahrgenommen. Flattern und Schlängeln kann vermieden

werden, wenn die Anzahl und die Lage der Wendepunkte im Lage- und im Höhenplan annähernd gleich sind. In die RAA sollte ein entsprechender Verweis aufgenommen werden.

### **Verzerrung der Längsneigung**

Verzerrungen der Längsneigung werden bei kleinen Wannern wahrgenommen. Die Längsneigung wird mit einem kleiner werdenden Wannenhalmmesser steiler empfunden. Das Phänomen ist nicht vermeidbar. Es hat jedoch gestalterisch so geringe Auswirkungen, dass es im praktischen Entwurf vernachlässigbar ist. Daher sollte es in den RAA nicht thematisiert werden.

### **Aufwölbung**

Die Aufwölbung tritt immer auf, wenn die Elementfolge Wanne – konstante Längsneigung – Wanne vollständig für den Fahrer sichtbar ist. Die RAA sollten auf dieses Phänomen hinweisen.

### **Abplattung**

Die Abplattung kann unter Einhaltung der Mindestparameter nach RAA nicht wahrgenommen werden. Sie ist für Autobahnen nicht relevant und sollte nicht in die RAA aufgenommen werden.

### **Brettwirkung**

Die Brettwirkung wird bei Einhaltung der Mindestparameter nach RAA nicht wahrgenommen. Es können jedoch Brückenbauwerke zwischen zwei Wannern wie ein Brett wirken, wenn sie nicht angemessen in den Streckenverlauf eingegliedert sind und von der Seite betrachtet werden. Der entsprechende Hinweis in den RAA sollte beibehalten werden.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass ein Änderungs- und Ergänzungspotenzial für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA besteht. Weiterhin kann in der Ziffer 5.4 die Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung von Autobahnen ausreichend beschrieben werden, sodass in der Ziffer 5 „Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung“ der H ViSt keine Änderungen erforderlich sind. Für das H ViSt (Ziffer 5) wären ausschließlich ergänzende Kommentare erforderlich, ob die jeweiligen Hinweise für Autobahnen maßgebend sind oder nicht. Daher wurde ausschließlich ein Textvorschlag für Ziffer 5.4 der RAA erarbeitet (Kapitel 6). Ein Verweis auf die H ViSt ist nur insofern nötig, dass die dort enthaltenen Hinweise zur Visualisierung (Ziffer 2, 3 und 4) und zur Nutzung des Sicht-

schattenbandes (Ziffer 5.3.2) uneingeschränkt auch für Autobahnen gelten.

## **6 Textvorschlag RAA**

Für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA wurde ein Textvorschlag erarbeitet, der folgende Punkte berücksichtigt:

- aktuelle Inhalte der Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA,
- Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen und Empfehlungen nach Kapitel 5.4,
- Inhalte der Ziffer 5 „Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung“ der H ViSt und
- Inhalte der Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAL.

Der Textvorschlag soll als Diskussionsgrundlage für die Fortschreibung der RAA im zuständigen Arbeitsausschuss 2.1 „Autobahnen“ dienen. Er wurde in Anlehnung an Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAL verfasst, um die in den Regelwerken angestrebte Harmonisierung der Gesamtstruktur und die dort definierten Begriffe zu berücksichtigen. Daher wurden in dem Textvorschlag Bilder und Texte direkt oder wenn nötig angepasst übernommen.

Gegenüber Ziffer 5.4 der RAA wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Neustrukturierung der Gliederung,
- Erläuterungen zu den Standardraumelementen,
- Definition, Darstellungen und Hinweise zu Sichtschattenbereichen,
- Definition des verdeckten Kurvenbeginns,
- Tabelle mit erforderlicher Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn zur Vermeidung von verdeckten Kurvenbeginnen,
- Hinweise zu optischen Knickpunkten,
- Hinweise zum Flattern,
- Definition, Darstellungen und Hinweise zum Schlangeln sowie
- ausführlichere Beschreibung der Überprüfung der räumlichen Linienführung.

Vorschlag für die RAA:

## 5.4 Räumliche Linienführung

### 5.4.1 Allgemeines

Der räumliche Verlauf einer Autobahn hat einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit.

Der Fahrraum umfasst das räumliche Fahrbahnband und den die Autobahn umgebenden Seitenraum. Er muss für den Kraftfahrer rechtzeitig erkennbar, begreifbar, übersichtlich und eindeutig sein. Diesen Anforderungen muss auch die Ausstattung der Autobahn genügen, die das Informationsangebot des Fahrraums ergänzt. Zudem sollte sich die Autobahn möglichst harmonisch in das Landschaftsbild einfügen.

Durch die Gestaltung des Umfeldes und durch die Ausstattung (Leiteinrichtungen, Geländemodellierungen, Bepflanzung usw.) sollen der Verlauf der Autobahn und die optische Führung für die Kraftfahrer verbessert werden. Vor allem Aufragendes verdeutlicht den Verlauf der Autobahn in Kuppen- und nicht einsehbaren Kurvenbereichen. Dazu dient u. a. eine seitlich in ausreichendem Abstand angeordnete Bepflanzung. Die optische Führung kann auch durch die Lage der Trasse im Einschnitt verbessert werden.

Durch die Überlagerung der horizontalen und vertikalen Entwurfs Elemente entstehen Raumelemente und Raumelementfolgen. Die Abfolge dieser Raumelemente führt zu einer guten räumlichen Linienführung, wenn Standardraumelemente verwendet und bei deren Aneinanderreihung die nachfolgenden Grundregeln beachtet werden. Zusätzlich sind die Grenzwerte der Entwurfs Elemente einzuhalten. Die optische Wirkung der Autobahn wird noch verbes-

sert, wenn die folgenden Elemente deutlich größer als die Mindestwerte gewählt werden können:

- Kreisbogenradius,
- Länge der Kreisbögen,
- Kuppen- und Wannenhalmmesser sowie
- Tangenten der Kuppen- und Wannenausrundungen.

Die räumliche Linienführung ist optisch und entwässerungstechnisch im Allgemeinen dann befriedigend, wenn die Wendepunkte der Krümmungen im Lage- und Höhenplan ungefähr an der gleichen Stelle liegen und die Anzahl der Wendepunkte des Lageplanes und des Höhenplanes übereinstimmen (Lageplanverwandte Abbildung, Bild A). Kann eine unterschiedliche Anzahl nicht vermieden werden, sollen die Wendepunkte einer Ebene nicht mit Tangentschnittpunkten der anderen Ebene zusammenfallen.

### 5.4.2 Standardraumelemente

Standardraumelemente entstehen, wenn Beginn und Ende von Kurven im Lageplan mit dem Beginn von Kuppen und Wannen im Höhenplan zusammenfallen. Dabei werden Geraden im Lageplan wie Kurven mit  $R = \infty$  und konstante Längsneigungen im Höhenplan wie Ausrundungshalmmesser mit  $H = \infty$  behandelt. Um ein Standardraumelement handelt es sich prinzipiell auch, wenn diese Anfangs- und Endpunkte im Lage- und Höhenplan geringfügig verschoben sind.

Bild B zeigt beispielhaft die Einteilung einer Strecke in Standardraumelemente. Die Bilder C und D zeigen die Wirkungen von Standardraumelementen.

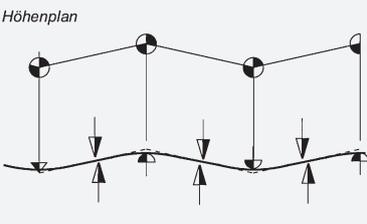
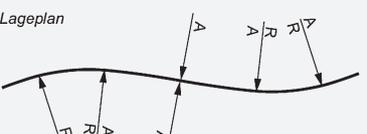
Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung
<p>Höhenplan</p>  <p>Lageplan</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr gute optische Führung</li> <li>• sehr gute Überlagerung zur Vermeidung entwässerungsschwacher Zonen</li> </ul>

Bild A: Lageplanverwandte Abbildung (FGSV 2008b)

**5.4.3 Defizite**

Fehler bei der Bildung von Raumelementen und Raumelementfolgen können zu Defiziten in der räumlichen Linienführung führen.

Auf Autobahnen können trotz Anwendung der Mindestwerte folgende Defizite auftreten:

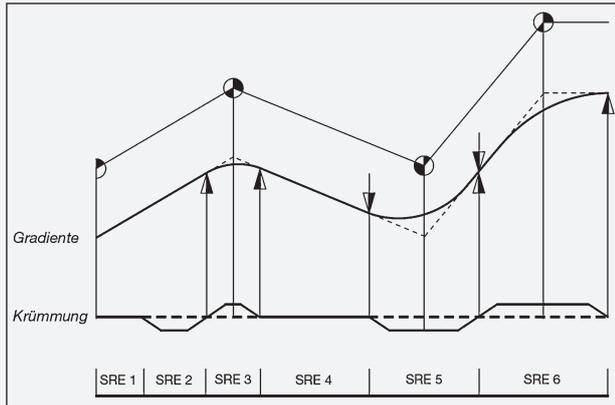


Bild B: Beispiel für die Einteilung einer Strecke in Standardraumelemente (SRE) (FGSV 2012b)

- Sichtschatten,
- verdeckter Kurvenbeginn,
- optischer Knickpunkt,
- Flattern,
- Schlängeln,
- Aufwölbung und
- Brettwirkung.

Ein Sichtschattenbereich liegt vor, wenn für den Kraftfahrer (Augpunkthöhe  $h_a = 1,00$  m) das Fahrbahnband (z. B. aufgrund einer Kuppe oder einer Böschung) im Nahbereich verdeckt ist und dahinter wieder sichtbar wird. Ein solcher Bereich ist problematisch, wenn sich die Verdeckung über eine Länge von mehr als 75 m erstreckt und das Fahrbahnband innerhalb einer Entfernung von weniger als 600 m wieder erkennbar ist. Sichtschattenbereiche können durch Springen und Tauchen (Bild E) entstehen.

Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung
Gerade mit konstanter Längsneigung		
<p>Höhenplan</p> <p>Lageplan <math>R = \infty</math></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirkt bei großer Länge monoton</li> <li>• wirkt in der Landschaft häufig starr</li> <li>• geeignet für wenig bewegte Landschaften</li> <li>• gut für die Anlage von Knotenpunkten</li> </ul>
gerade Wanne		
<p>Höhenplan</p> <p>Lageplan <math>R = \infty</math></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• gewährleistet gute Sichtverhältnisse und eine gute optische Führung</li> <li>• ebenfalls gut geeignet für die Anlage von Knotenpunkten</li> </ul>
gerade Kuppe		
<p>Höhenplan</p> <p>Lageplan <math>R = \infty</math></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• schränkt die Sicht ein</li> <li>• verschlechtert die optische Führung</li> <li>• weniger geeignet für die Anlage von Knotenpunkten</li> </ul>

Bild C: Standardraumelemente bei Lageplangeraden (FGSV 2008b; FGSV 2012b)

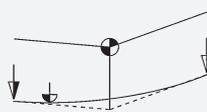
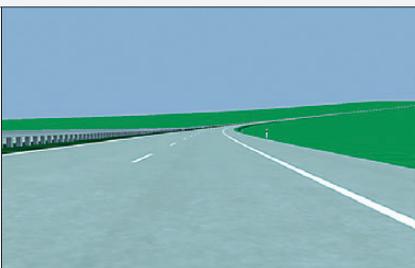
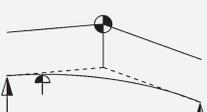
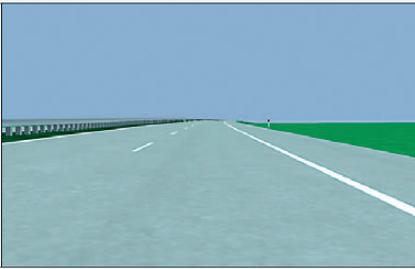
Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung
Kurve mit konstanter Längsneigung		
<p>Höhenplan</p>  <p>Lageplan</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ist bei ausreichenden Sichtweiten unproblematisch</li> <li>• ermöglicht eine gute Anpassung an das Umfeld</li> </ul>
gekrümmte Wanne		
<p>Höhenplan</p>  <p>Lageplan</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ist bei ausreichend großen Entwurfsparametern unproblematisch</li> <li>• ermöglicht eine gute Anpassung an das Umfeld</li> <li>• verbessert die optische Führung</li> </ul>
gekrümmte Kuppe		
<p>Höhenplan</p>  <p>Lageplan</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ist bei ausreichend großen Entwurfsparametern unproblematisch</li> <li>• verbessert die optische Führung</li> </ul>

Bild D: Standarddraumelemente bei Lageplankurven (FGSV 2008b; FGSV 2012b)

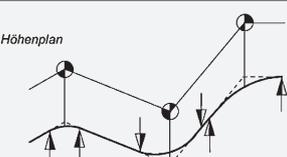
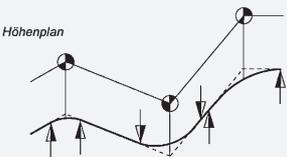
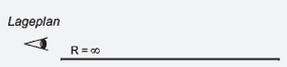
Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung
Springen		
<p>Höhenplan</p>  <p>Lageplan</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidung von mehreren Höhenplanelementen bei einem Lageplanelement</li> <li>• Wahl möglichst großer Ausrundungshalbmesser</li> <li>• je kleiner der erste Kuppenhalbmesser ist, desto länger und tiefer ist der Sichtschattenbereich</li> </ul>
Tauchen		
<p>Höhenplan</p>  <p>Lageplan</p>  <p><math>R = \infty</math></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung (z. B. mit Perspektivbildern) im Bereich des Hochpunktes der ersten Kuppe bei kurzen Bereichen mit konstanter Längsneigung im Höhenplan</li> </ul>

Bild E: Sichtschatten – Springen und Tauchen (FGSV 2012b)

H <sub>K</sub> [m]	A [m]								
	150	200	250	300	350	400	450	500	
3.000	25	45	65	85	100	120	135	155	
4.000		35	55	75	95	115	130	150	
5.000		25	50	70	90	110	125	145	
6.000			40	60	85	105	120	140	
7.000			30	55	75	95	115	135	
8.000			20	45	70	90	110	130	
9.000				40	65	85	105	125	
10.000				30	55	80	100	120	
11.000				20	45	70	95	115	
12.000		keine				40	65	90	110
13.000		Verschiebung				30	55	80	105
14.000		erforderlich				20	50	75	100
15.000						40	70	95	
16.000						30	60	90	
17.000						20	55	80	
18.000							45	75	

Tab. A: Erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn bei Übergang Gerade – Klotheide – Kreisbogen [m]

Ein verdeckter Kurvenbeginn liegt dann vor, wenn aus einer Entfernung von 75 m vor dem Kurvenbeginn im Lageplan die voraus liegende Straßenoberfläche nicht mindestens bis zu dem Punkt einsehbar ist, an dem eine Richtungsänderung von 3,5 gon im Lageplan vorliegt. Daher ist zu gewährleisten, dass der Beginn des für den Fahrer nicht sichtbaren Teils der Kuppe vom Fahrer weiter entfernt liegt als der Punkt der relevanten Richtungsänderung. Bei Kuppen-/Kurvenüberlagerungen ist daher gegebenenfalls zu prüfen, ob eine Verschiebung des Kurvenbeginns vor den Kuppenbeginn erforderlich ist, um die Erkennbarkeit des Kurvenbeginns zu gewährleisten. Richtwerte für die erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn sind in Tabelle A enthalten.

Eine optische Knickwirkung im Lageplan kann entstehen, wenn in der Achse zwischen zwei langen Geraden kurze Bögen mit kleinen Radien angeordnet werden (Bild F). Analog kann eine optische Knickwirkung im Höhenplan entstehen, wenn in der Gradienten zwischen zwei langen Geraden eine kleine Wanne angeordnet wird (Bild F). Liegen in der Achse zwischen zwei langen Geraden kurze Bögen mit kleinen Radien und in der Gradienten zwischen zwei langen Geraden mit konstanter Längsneigung eine kleine Wanne, kann eine Kuppe vorgetäuscht

werden (Aufwölbung) und eine Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan entstehen (Bild F).

Folgt die Trasse kurzweiligen Bodenerhebungen mit zu starker Geländeanpassung, kann dies zum Flattern der Fahrbahn führen (Bild G). Dies liegt insbesondere dann vor, wenn die Anzahl der Wendepunkte im Höhenplan größer ist als im Lageplan. Analog kann der Eindruck des Schlingelns entstehen, wenn in der Achse eine größere Anzahl an Wendepunkten als in der Gradienten vorliegt (Bild G).

Der Eindruck einer Kuppe (Aufwölbung) kann entstehen, wenn die Elementfolge Wanne – konstante Längsneigung – Wanne vollständig für den Fahrer sichtbar ist (Bild H). Weiterhin sollen sich Brückenbauwerke in den Streckenverlauf eingliedern. Um die Brettwirkung einer geraden Brücke zwischen zwei Wannen zu vermeiden, sollen die Wannenhalmesser besonders groß gewählt werden und lange Ausrundungen haben.

#### 5.4.4 Überprüfung der räumlichen Linienführung

Die Überprüfung der räumlichen Linienführung einer Autobahn erfolgt im Rahmen eines dreistufigen Verfahrens.

Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung	
<b>Knick im Lageplan</b>			
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindesthalbmesser vermeiden</li> <li>• kleine Kurvenradien bei geringen Richtungsänderungen im Lageplan vermeiden</li> <li>• lange Geraden mit konstanter Längsneigung vermeiden</li> <li>• Wannen mit geringen Tangentenzlängen im Höhenplan zwischen langen Geraden mit konstanter Längsneigung vermeiden</li> </ul>	
<b>Knick im Höhenplan</b>			
<b>Knick im Lage- und Höhenplan</b>			

Bild F: Optischer Knickpunkt

Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung
<b>Flattern</b>		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einhaltung annähernd gleicher Anzahl der Wendepunkte im Lage- und Höhenplan</li> <li>• Einhaltung annähernd gleicher Lage der Wendepunkte im Lage- und Höhenplan</li> </ul>
<b>Schlingeln</b>		

Bild G: Flattern und Schlingeln

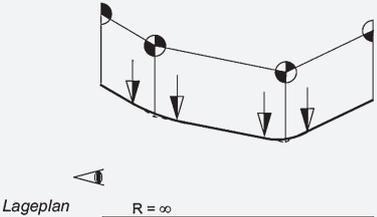
Lageplan / Höhenplan	Perspektivbild	Bewertung
Aufwölbung		
 <p>Lageplan R = ∞</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geraden mit konstanter Längsneigung zwischen zwei Wannen vermeiden</li> </ul>

Bild H: Aufwölbung

Im ersten Arbeitsschritt wird für Trassenabschnitte, die nicht Standardraumelementen entsprechen, geprüft, ob durch Umplanung eine hinreichende Abstimmung der Lage der Wendepunkte möglich ist.

Für die Abschnitte, bei denen keine Abstimmung der Lage der Wendepunkte möglich ist, wird in einem zweiten Arbeitsschritt geprüft, ob die Kurvenanfänge rechtzeitig und ausreichend zu erkennen sind. Darüber hinaus wird für die gesamte Trasse geprüft, ob der Verlauf des Fahrbahnbandes rechtzeitig und ausreichend zu erkennen ist und keine Sichtschattenstrecken vorliegen. Der Nachweis, dass der voraus liegende Trassenverlauf für den Kraftfahrer gut erkennbar und begreifbar ist, kann

dabei anhand von Perspektivbildern bzw. Perspektivbildfolgen erfolgen.

In einem dritten Arbeitsschritt wird die Trasse durch die qualitative Analyse von Lage- und Höhenplan unter gezielter Verwendung berechneter Perspektivbilder auf gestalterische Defizite geprüft. Gestalterische Defizite können akzeptiert werden, wenn Änderungen am Entwurf mit vertretbarem Aufwand nicht möglich sind.

Einzelheiten zur Perspektivbildberechnung und Prüfmethodik enthalten die „Hinweise für die Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen“ (H ViSt).

## 7 Zusammenfassung

### Aufgabenstellung

Der räumliche Verlauf einer Straße hat einen wesentlichen Einfluss auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit. Vor allem für Landstraßen wurden die räumliche Linienführung und Defizite in der räumlichen Linienführung bereits mehrfach untersucht. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse ließen sich allerdings nicht ohne weiteres auf Autobahnen übertragen, da diese Straßen größere Entwurfs-elemente in der Linienführung und Querschnitte aufweisen. Daher konnte bei der Erarbeitung des Kapitels 5.4 „Räumliche Linienführung“ der Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 2008) vorrangig nur auf Erfahrungswerte und Festlegungen zurückgegriffen werden. Weiterhin lag kein geschlossenes Verfahren zum Entwurf, zur Bewertung und zur Kontrolle der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf der Grundlage qualitativer und quantitativer Parameter vor. Für Landstraßen wurde ein derartiges Verfahren bereits entwickelt. Es ist in den „Hinweisen zur Visualisierung

von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt)“ enthalten und zu prüfen, ob es sich auf Autobahnen übertragen lässt oder anzupassen ist.

Ziel des Projektes war es, auf der Grundlage von Untersuchungen über die räumliche Linienführung von Autobahnen Empfehlungen für die Inhalte der RAA und der H ViSt zur räumlichen Linienführung zu geben.

### Untersuchungsmethodik

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurde geprüft, in welchem Umfang und unter welchen Randbedingungen Defizite in der räumlichen Linienführung auf Autobahnen auftreten und ob diese sicherheitsrelevant sind. Dazu wurden Bestandsstrecken auf Defizite in der räumlichen Linienführung untersucht und das Unfallgeschehen analysiert. Weiterhin wurden virtuelle Untersuchungsstrecken erstellt und mit deren Hilfe iterativ Grenzwerte ermittelt, ab wann Defizite in der räumlichen Linienführung auftreten.

Es wurden folgende mögliche Defizite untersucht:

- Sichtschatten (Tauchen, Springen und Springen mit Versatz),
- Dehnung und Stauchung,
- verdeckter Kurvenbeginn,
- Knickwirkung im Lageplan,
- Knickwirkung im Höhenplan in der Wanne und in der Kuppe,
- Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan (lageplanfremde Abbildung),
- Brettwirkung,
- kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven,
- Flattern,
- Verzerrung der Längsneigung,
- Aufwölbung und Abplattung sowie
- Schlängeln.

Als Untersuchungsstrecken wurden Autobahnabschnitte in bewegtem Gelände gewählt, die vor dem Jahr 1940 fertiggestellt wurden. Bei diesen Abschnitten wurde davon ausgegangen, dass sie aufgrund der damaligen Vorgaben im Regelwerk eher Defizite in der räumlichen Linienführung aufweisen (Defizitstrecken). Zusätzlich wurden Untersuchungsstrecken ausgewählt, die eine räumlich regelgerechte Trassierung haben (Vergleichsstrecken). Die Vergleichsstrecken dienen zur Prüfung, ob Autobahnen, die nach den Festlegungen der Entwurfsrichtlinien geplant wurden, weniger bzw. keine Defizite in der räumlichen Linienführung und somit auch weniger Unfälle aufweisen.

Die Lage- und Höhenplandaten sowie die Unfalldaten der Untersuchungsstrecken wurden in ein Tool eingegeben, welches das Band für die Qualität der Sicht (QuaSi-Band) berechnet. Über die quantitative Einzelbildauswertung wurden die Strecken auf mögliche Defizite in der räumlichen Linienführung und deren Sicherheitsrelevanz analysiert. Neben der Einzelbildauswertung wurden auch Untersuchungen u. a. zu der Streckenausdehnung der Defizite durchgeführt.

Die virtuellen Untersuchungsstrecken wurden mit Hilfe des Straßenentwurfsprogramms CARD/1 erstellt. Anhand dieser wurden die Grenzwerte der Defizite iterativ ermittelt, d. h. ab wann und unter

welchen Randbedingungen sie auftreten. Dazu wurden je nach betrachtetem Defizit einzelne Entwurfselemente unter Konstanzhaltung der anderen Entwurfselemente so lange verändert, bis sich Defizite einstellen bzw. bis Defizite nicht mehr auftreten. Als Ausgangslage dienten dabei die Mindest- und Maximalwerte für die Entwurfselemente nach RAA. Es wurde davon ausgegangen, dass Defizite in der räumlichen Linienführung eher bei kleinen Entwurfparametern auftreten.

Die Prüfung der virtuellen Untersuchungsstrecken auf Defizite erfolgte je nach Defizit quantitativ durch Sichtschattenbänder und / oder qualitativ durch Perspektivbilder. Da die Beurteilung von gestalterischen Defiziten subjektiv beeinflusst ist, wurden für deren Grenzwertermittlung zusätzlich Probandenbefragungen durchgeführt. Dazu wurde zunächst über einen Dominanzpaarvergleich eine Rangreihe der erstellten Perspektivbilder ermittelt. Dabei wurde von den Probanden jedes Perspektivbild mit jedem verglichen, bewertet und angegeben, in welchem Bild das Defizit stärker ausgeprägt ist. In Abhängigkeit der Häufigkeit der ausgewählten Bilder wurde eine Reihung der Bilder aufgestellt. Auf der Grundlage der Rangreihe wurde zur Grenzwertermittlung eine Expertenbefragung durchgeführt. Bei dieser wurde die Method of Adjustment (Regulierungs-Methode) angewendet. Die Probanden stellten über einen Regler aus einer Auswahl von Bildern das Bild ein, bei dem sie gerade so das entsprechende Defizit wahrnehmen konnten.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Untersuchungen wurde der Änderungsbedarf für Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA und für das in den H ViSt aufgeführte Prüfverfahren für Landstraßen ermittelt. Darauf aufbauend wurde ein Textvorschlag für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA verfasst.

### **Untersuchungsergebnisse und Empfehlungen**

In der Untersuchung zur räumlichen Linienführung von Autobahnen wurden folgende mögliche Defizite betrachtet:

- verdeckter Kurvenbeginn,
- Sichtschatten (Tauchen, Springen und Springen mit Versatz),
- Dehnung und Stauchung,
- Knickwirkung im Lageplan,

- Knickwirkung im Höhenplan in der Wanne und in der Kuppe,
- Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan,
- Brettwirkung,
- kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven,
- Flattern,
- Verzerrung der Längsneigung,
- Aufwölbung und Abplattung sowie
- Schlängeln.

Für die nachfolgende Bewertung der o. g. Defizite sind zunächst zwei grundsätzliche Hinweise voranzustellen:

- Die RAA umfassen Autobahnen und autobahnähnliche Straßen von der EKA 1 bis zur EKA 3. Den Entwurfsklassen sind jeweils unterschiedliche Planungsgeschwindigkeiten zugrunde gelegt. Daraus resultiert eine große Spreizung der Mindestwerte für die Entwurfselemente im Lage- und Höhenplan. In der Folge kann es Defizite geben, die bei den sehr großen Elementen von Autobahnen der EKA 1 nicht auftreten, dagegen jedoch bei autobahnähnlichen Straßen (EKA 2) und Stadtautobahnen (EKA 3). Darauf wird im Text dann jeweils differenziert hingewiesen. Für die Entwurfsempfehlungen und Schlussfolgerungen ist jedoch berücksichtigt, dass in der Praxis bei Stadtautobahnen die Anforderungen aus der räumlichen Linienführung häufig hinter die Einflüsse aus den städtebaulichen Zwängen und Restriktionen zurücktreten.
- Als Ergebnis der Unfalluntersuchung konnte bei den einzelnen Defiziten kein ausgeprägter nachteiliger Einfluss auf das Unfallgeschehen festgestellt werden. Dies ist sicherlich auf die im Vergleich zu Landstraßen sehr viel größeren Entwurfselemente zurückzuführen. Dadurch treten die sicherheitsrelevanten Nachteile von Defiziten in der räumlichen Linienführung gegenüber den gestalterischen Nachteilen zurück. Insofern wird in der folgenden Bewertung auf die Sicherheitsauswirkung kein differenzierter Bezug mehr genommen.

### **Verdeckter Kurvenbeginn**

Verdeckte Kurvenbeginne können unter Verwendung der Mindestparameter nach RAA auftreten. Daher sollte eine neue Tabelle, die zur Vermeidung

von verdeckten Kurvenbeginnen die erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn angibt, in die RAA aufgenommen werden. Mit dem Prüfverfahren nach Ziffer 5.3.2 nach H ViSt (Sichtschattenband) liegt eine in Entwurfsprogrammen integrierte Prüfmethode vor. Diese ist auch, wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt wurde, für Autobahnen maßgebend. Daher wird empfohlen, das Prüfverfahren zukünftig auch für Autobahnen anzuwenden. Das Verfahren braucht aber nicht extra in den RAA wiederholt zu werden.

### **Sichtschatten**

Sichtschatten und kritische Sichtschatten gemäß der Definition nach RAL können auch bei richtliniengerechter Trassierung nach RAA auftreten. Für Autobahnen sind jedoch Sichtschatten nicht sicherheitsrelevant und daher auch nicht kritisch im Sinne der RAL. Trotzdem wird empfohlen, in den RAA darauf hinzuweisen, Sichtschatten zu vermeiden. Der Nachweis kann nach H ViSt in Analogie zur Überprüfung bei Landstraßen über Sichtschattenbänder erfolgen.

### **Dehnung und Stauchung**

Dehnungen wurden nur bei Wannenhalmessern festgestellt, die kleiner als die Mindestparameter nach RAA sind. Oberhalb der Mindestparameter trat das nicht auf. Weiterhin konnten auch Stauchungen festgestellt werden, jedoch nur wenige. Die Phänomene Dehnung und Stauchung brauchen daher nicht in die RAA aufgenommen werden.

### **Knick im Lageplan**

Die Knickwirkung im Lageplan wird unter der Annahme, dass der Klothoidenparameter ein Drittel des Kreisbogenradius beträgt, bei Radien  $R \leq \text{ca. } 600 \text{ m}$  wahrgenommen. Das betrifft vor allem Autobahnen der EKA 2 und der EKA 3. Ein entsprechender Hinweis sollte in die RAA aufgenommen werden.

### **Knick im Höhenplan**

Im Bereich von Kuppen konnte keine Knickwirkung festgestellt werden. Dieses Phänomen ist für Autobahnen nicht maßgebend. Wird jedoch eine Gerade im Lageplan mit kleinen Wannens im Höhenplan überlagert, kann eine Knickwirkung wahrgenommen werden. Solche Knickwirkungen im Höhenplan lassen sich bei folgenden Wannenhalmessern vermeiden:

$H_W \geq 3.500 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 12 \%$ ,

$H_W \geq 4.750 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 8 \%$  und

$H_W \geq 7.000 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 4 \%$ .

Diese betreffen Autobahnen der EKA 1 B bei geringen Längsneigungsdifferenzen sowie Autobahnen der EKA 2 und der EKA 3. Es wird empfohlen, in den RAA auf das Phänomen hinzuweisen.

### **Aufwölbung und Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan**

Bei Kuppen konnten keine Defizite festgestellt werden. Bei Wannen wurde neben der Knickwirkung auch eine Aufwölbung wahrgenommen. Diese entsteht durch die Überlagerung von der Wanne und der Anrampung der Fahrbahnränder im Kreisbogen. Die Phänomene treten in Abhängigkeit von dem Wannenhalmesser und der Längsneigungsdifferenz auf und lassen sich nur bei folgenden Parameterkombinationen vermeiden:

$H_W < 2.500 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 12 \%$ ,

$H_W < 3.000 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 8 \%$  und

$H_W < 6.000 \text{ m}$  bei  $\Delta s = 4 \%$ .

Da aber alle Mindesthalmmesser nach RAA größer sind, treten die Phänomene in der Praxis häufig auf. Um die Phänomene abschwächen zu können, sollten somit der Wannenhalmmesser und/oder die Längsneigungsdifferenz verringert werden. Es wird empfohlen, in den RAA darauf hinzuweisen.

### **Kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven**

Kurze Zwischengeraden zwischen zwei gleichgerichteten Kurven unterbrechen den Linienfluss einer durchgehenden Kurve optisch nicht. Dieses Phänomen ist für Autobahnen nicht maßgebend und sollte nicht in die RAA aufgenommen werden.

### **Flattern und Schlängeln**

Flattern und Schlängeln kann unter Verwendung der Mindestparameter nach RAA auftreten. Flattern wird bei breiteren Querschnitten stärker wahrgenommen. Flattern und Schlängeln kann vermieden werden, wenn die Anzahl und die Lage der Wendepunkte im Lage- und im Höhenplan annähernd gleich sind. In die RAA sollte ein entsprechender Verweis aufgenommen werden.

### **Verzerrung der Längsneigung**

Verzerrungen der Längsneigung werden bei kleinen Wannen wahrgenommen. Die Längsneigung wird mit einem kleiner werdenden Wannenhalmmesser steiler empfunden. Das Phänomen ist nicht ver-

meidbar. Es hat jedoch gestalterisch so geringe Auswirkungen, dass es im praktischen Entwurf vernachlässigbar ist. Daher sollte es in den RAA nicht thematisiert werden.

### **Aufwölbung**

Die Aufwölbung tritt immer auf, wenn die Elementfolge Wanne – konstante Längsneigung – Wanne vollständig für den Fahrer sichtbar ist. Die RAA sollten auf dieses Phänomen hinweisen.

### **Abplattung**

Die Abplattung kann unter Einhaltung der Mindestparameter nach RAA nicht wahrgenommen werden. Sie ist für Autobahnen nicht relevant und sollte nicht in die RAA aufgenommen werden.

### **Brettwirkung**

Die Brettwirkung wird bei Einhaltung der Mindestparameter nach RAA nicht wahrgenommen. Es können jedoch Brückenbauwerke zwischen zwei Wannen wie ein Brett wirken, wenn sie nicht angemessen in den Streckenverlauf eingegliedert sind und von der Seite betrachtet werden. Der entsprechende Hinweis in den RAA sollte beibehalten werden.

### **Fazit**

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass Defizite in der räumlichen Linienführung von Autobahnen trotz richtliniengerechter Trassierung nach RAA auftreten können. Diese haben jedoch keine Sicherheitsrelevanz.

Weiterhin hat sich ein Änderungs- und Ergänzungspotenzial für die Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA ergeben. In der Ziffer 5.4 kann die Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung von Autobahnen ausreichend beschrieben werden, sodass in der Ziffer 5 „Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung“ der H ViSt keine Änderungen erforderlich sind. Für das H ViSt (Ziffer 5) wären ausschließlich ergänzende Kommentare notwendig, ob die jeweiligen Hinweise für Autobahnen maßgebend sind oder nicht. Daher wurde ausschließlich ein Textvorschlag für Ziffer 5.4 der RAA erarbeitet, der folgende Punkte berücksichtigt:

- aktuelle Inhalte der Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAA,
- Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen und Empfehlungen nach Kapitel 5.4,
- Inhalte der Ziffer 5 „Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung“ der H ViSt und

- Inhalte der Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAL.

Ein Verweis auf die H ViSt ist nur insofern nötig, dass die dort enthaltenen Hinweise zur Visualisierung (Ziffer 2, 3 und 4) und zur Nutzung des Sichtschattenbandes (Ziffer 5.3.2) uneingeschränkt auch für Autobahnen gelten.

Der Textvorschlag soll als Diskussionsgrundlage für die Fortschreibung der RAA im zuständigen Arbeitsausschuss 2.1 „Autobahnen“ dienen. Er wurde in Anlehnung an Ziffer 5.4 „Räumliche Linienführung“ der RAL verfasst, um die in den Regelwerken angestrebte Harmonisierung der Gesamtstruktur zu ermöglichen und die Einheitlichkeit der verwendeten Fachbegriffe herzustellen.

## Literatur

- American Association of State Highway transportation officials (Aaahsto), A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington 2001
- APPELT, V.; Sichtbare Radien als ein Kriterium zur Beurteilung der räumlichen Linienführung von einbahnigen Außerortsstraßen, Dissertation an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 1998
- AULHORN, E.; Wahrnehmungsphysiologische Grenzen der Sichtweite Straßenbau, Verkehrstechnik und Verkehrssicherheit, Heft 15, S. 35 – 36, Köln 1971
- BABKOV, V. F.; Road conditions and traffic safety Übersetzung der russischen Fassung von 1970, Moskau 1975
- BIEDERMANN, B.; Straßentrassierung auf der Grundlage von Geschwindigkeiten aus Sehfelduntersuchungen, Dissertation im Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt 1984
- BODEN, R.; Erarbeitung eines allgemeinen Schemas zur Einteilung von Straßen der Kategorie A hinsichtlich ihrer räumlichen Linienführung, Diplomarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2000
- BORTZ, J.; DÖRING, N.; Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler, 4. überarbeitete Auflage, Heidelberg 2009
- BusinessDesigner GbR; Wahrnehmung, Fernstudium Psychologie, Internetpräsenz: <http://www.fernstudium-psychologie.eu/wahrnehmung>, Stand: 25.06.2014, Gaimersheim 2014
- COHEN, A. S.; Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern, Bericht zum Forschungsprojekt 8306/3 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach 1987
- Deutsches Reich / Generalinspektion für das Deutsche Strassenwesen (baurab tg); Bauanweisung für Reichsautobahnen. Trassierungsgrundsätze (BAURAB TG), Berlin 1942
- DIETZE, M.; Erarbeitung eines allgemeinen Berechnungsschemas von Fahrraumerspektiven zur quantitativen Beurteilung der räumlichen Linienführung von Straßen der Kategoriegruppe A; Diplomarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2000
- DILLING, J.; Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 151, Bonn 1973
- DURTH, W.; Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 163, Bonn 1974
- ENGELKE, H.-U.; Ableitung streckenspezifischer Parameter zur Bewertung der räumlichen Linienführung von Straßen, Dissertation an der Fakultät für Technik und Naturwissenschaften an der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, Leipzig 1990
- Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV) Strassenplanung: Trassierung Räumliche Linienführung (Merkblatt RVS 3.21), Wien 2001
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Hinweise zur Visualisierung

- von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt), Köln 2008a
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen (M Uko), Köln 2012a.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypen-Steckkarten, Köln 2003
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS), Köln 2009
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Linienführung (RAS-L), Köln 1995
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Köln 2012b
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Teil II: Linienführung (RAL-L), Abschnitt 2: Räumliche Linienführung, Köln 1970
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Querschnitte (RAS-Q), Köln 1996
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), Köln 2008b
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L), Köln 1995
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L), Abschnitt 1: Elemente der Linienführung (RAS-L-1), Köln 1984
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN), Köln 2008c
- FRIEDINGER, C.; Information und Verhalten des Autofahrers beim Durchfahren von Kurven, Dissertation an der eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich 1980
- HASSAN, Y.; EASA, S. M.; Design of sag vertical curves in three-dimensional alignments Journal of transportation engineering, Vol. 124, No. 1, S. 52 – 58, Ontario 1998
- HASSAN, Y.; EASA, S. M.; Effect of vertical alignment on drivers perception of horizontal curves, Journal of transportation engineering, Vol. 129, No. 4, S. 399 – 407, Ontario 2003
- HELLER, J.; Experimentelle Psychologie. Eine Einführung, Oldenbourg Verlag München, München 2012
- HIERSCHKE, E.-U.; Die Bedeutung und Ermittlung der Sichtweiten von Straßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 67, Bonn 1968
- HRISTOV, B.; Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen, Dissertation an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2009
- Interaktive Grafik Milde GmbH (igm); Sichtschattenbänder und versteckter Kurvenbeginn nach H ViSt 2008 (Hinweise zur Visualisierung von Straßen); unter: <http://www.igmilde.de/sichtschatten-bander-und-versteckter-kurvenbeginn-nach-hvist-2008-hinweise-zur-visualisierung-von-strassen/> (abgerufen am 14.01.2015) Bannewitz 2015
- KAYSER, H. J.; MÖHLER, W.; OTTEN, N.; Quantitative Erfassung des Straßenraumes (unter Berücksichtigung bebauter Stadtrandgebiete), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 452, Bonn 1985
- KAYSER, H. J.; SANDERS, A. F.; HESS, M.; SPIJKERS, W. A. C.; BARTMANN, A.; Das Wahrnehmungsverhalten des Kraftfahrers in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung, For-

- sung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 557, Bonn 1989
- KIRCHHOFF, S.; KUHN, S.; LIPP, P.; SCHLAWIN, S.; Der Fragebogen. Datenbasis, Konstruktion und Auswertung, 5. Auflage, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2010
- KOCH, N.; Abschätzung der Validität von Präferenzurteilen zur Geschwindigkeit von Straßen mit unterschiedlichen Ausstattungsvarianten Diplomarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2011
- KÜHN, W.; JHA, K. M.; Methodology for Checking Shortcomings in Three-Dimensional Alignment, Journal of the Transportation Research Board, No. 2262, S. 13 – 21, Washington D.C. 2011
- KÜHN, W.; LEITHOFF, I.; ZIMMERMANN, M.; EBERSBACH, D.; SCHULZ, R.; Methodik zur Prüfung der räumlichen Linienführung von außerörtlichen Straßen, Straßenverkehrstechnik, Heft 5, S. 298 – 306, Bonn 2009
- KÜHN, W.; LIPPOLD, C.; ZIMMERMANN, M.; LEITHOFF, I.; EBERSBACH, D.; SCHULZ, R.; Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der Visualisierung in der Straßenplanung, Schlussbericht zum FE 02.0257/2005/DGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Leipzig 2007
- KÜHN, W.; Anwendungsmöglichkeiten der Visualisierung in der Verkehrsplanung, Straße und Autobahn, Heft 2, S. 144 – 151, Bergisch Gladbach 2000
- KÜHN, W.; Qualitative Kriterien und quantitative Kontrollgrößen zur Bewertung der räumlichen Linienführung, Perspektiven für das Straßenwesen, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Nr. 43, S. 93 – 105, Aachen 2003
- KUPKE, P.; Simulatorexperimente zum trassenabhängigen Fahrverhalten und Überprüfung der Linienführung, Dissertation an dem Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1977
- LANGE, S.; BENDER, R.; Median oder Mittelwert?, Deutsche Medizinische Wochenschrift (DMW) 2007, 132; S. e1 – e2, Stuttgart 2007
- LEUTNER, R.; Fahrraum und Fahrverhalten Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 12, Karlsruhe 1974
- LINKE, O.; Ermittlung von Grenzwerten für das Auftreten von Sichtschatten auf Autobahnen, Studienarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2015
- LIPPOLD, C.; LEHMANN, T.; RESSEL, W.; BENER, A.; Entwurfshinweise zum sicheren sechsstreifigen Ausbau von Autobahnen; Schlussbericht zum FE 02.269/2006/AGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden 2010
- LIPPOLD, C.; ROHLOFF, M.; WIRTH, W.; LEMKE, K.; Die neuen Richtlinien für Autobahnen RAA – Notwendigkeit und Stand der Bearbeitung, Teil 1 und 2, Straße und Autobahn, Heft 1, S. 5 – 11 und Heft 2, S. 76 – 80, Bergisch Gladbach 2007
- LIPPOLD, C.; SCHULZ, R.; Orientierungssichtweite – Definition und Beurteilung, Schlussbericht zum FE 02.0231/2003/AGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden 2007
- LIPPOLD, C.; VETTERS, A.; LEHMANN, T.; RESSEL, W.; KLÖTZL, S.; Entwurfstechnische Möglichkeiten zur Vermeidung entwässerungsschwacher Zonen auf Richtungsfahrbahnen, Schlussbericht zum FE 02.295/2008/AGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden 2011
- LIPPOLD, C.; Entwurfsrichtlinien für Autobahnen auf der Basis des Konzeptes der Entwurfsklassen, Schlussbericht zum FE 02.228/2002/ARB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden 2006
- LORENZ, C.; Ermittlung von qualitativen und quantitativen Parametern zur Überprüfung der räumlichen Linienführung von Autobahnen auf gestalterische Defizite, Studienarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Fried-

- rich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2015
- LORENZ, H.; Trassierung und Gestaltung von Straßen und Autobahnen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1971
- NAUMANN, H.; Entwicklung eines Programmsystems zur Herstellung von computererzeugten Perspektivfilmen, Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 17, Karlsruhe 1977
- OSBURG, S.; Erarbeitung von spezifischen Abgrenzungskriterien sowie Grenzwerten für die Mängel Tauchen und Flattern in der räumlichen Linienführung von Straßen der Kategoriengruppe A, Studienarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2000
- OSTERLOH, H.; Mathematische Erfassung des räumlichen Eindrucks des Perspektivbildes auf den Kraftfahrer, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 394, Bonn 1983
- OTTEN, N.; Quantitative Darstellung von Varianten der Straßenraumgestalt, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Instituts für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen, Mitteilung Nr. 29, Aachen 1988
- PFEIL, W.; Die Winkeländerung des Perspektivbildes als quantitatives Kriterium für die optische Linienführung von Straßen, Straße und Autobahn, Heft 8, S. 313 – 317, Bergisch Gladbach 1970
- PORST, R.; Fragebogen. Ein Arbeitsbuch. Studienskripten zur Soziologie, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2011
- RANKE, V. J. CH. VON; NIEBLER, H.; Perspektive im Ingenieurbau insbesondere im Straßenbau, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1956
- REPPE, S.; Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Unfällen und räumlicher Linienführung auf Straßen der Kategoriengruppe A, Diplomarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2001
- REUTER, H., Verfahren zur numerischen Darstellung und Beurteilung der Linienführung von Straßen, Dissertation an der Fakultät Technik und Naturwissenschaften der Hochschule für Verkehrswesen in Dresden, Dresden 1982
- SCHLICHTER, H. GG.; Räumliche Linienführung von Verkehrswegen, Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 30, Karlsruhe 1985
- SCHOSS, W.; Automatische Aufdeckung von Mängeln in der optischen Wirkung der Linienführung von Straßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 190, Bonn 1975
- SPRINGER, IR. J. F.; HUIZINGA, IR. K. E.; Das Straßenbild als Prüfstein für die Straßengestaltung, Rijkswaterstaat Communications, Haag 1975
- TEICHNER; American Journal of Psychology, Heft 68, Champaign 1955
- TIEDTKE, A.; Analyse und Auswertung des Fahrverhaltens von Kraftfahrern auf einstreifig zweibahnigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit räumlich quantifizierbarer Parameter, Diplomarbeit an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2001
- Vejdirektoratet; Handborg Tracéring I Abent Land, Anlaeg og Planlaegning, Vejdirektoratet, Kopenhagen 2012
- WEISE, G.; DIETZE, M.; EBERSBACH, D.; KUCZORA, V.; Entwicklung eines praktikablen Verfahrens zur Berücksichtigung der räumlichen Linienführung von Außerortsstraßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 849, Bonn 2002
- WEISE, G.; DIETZE, M.; EBERSBACH, D.; Programmsystem PERSPEKTO zur Berechnung und Analyse von Perspektivbildern aus der Fahrersicht, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Dresden 2001

ZIMMERMANN, M.; LIPPOLD, C.; VON LOEBEN, W.-H.; DIETZE, M.; Kontrolle und Bewertung der räumlichen Linienführung mit quantitativen Parametern, Schlussbericht zum FE 02.232/2003/EGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Karlsruhe / Dresden 2006

ZIMMERMANN, M.; Quantitative Methoden zur Beurteilung räumlicher Linienführung von Straßen, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 51, Karlsruhe 2001

## Bilder

- Bild 1: Grundformen der Linienführung im Raum (LORENZ, 1971)
- Bild 2: Abstimmung von Achse und Gradienten (LORENZ, 1971)
- Bild 3: Springen (LORENZ, 1971)
- Bild 4: Dehnung und Stauchung (nach APPELT, 1998)
- Bild 5: Dehnung (LORENZ, 1971)
- Bild 6: verdeckter Kurvenbeginn (LORENZ, 1971)
- Bild 7: Knickwirkung im Höhenplan (LORENZ, 1971)
- Bild 8: Brettwirkung (LORENZ, 1971)
- Bild 9: Prinzipskizze eines Krümmungsspektrums (LEUTNER, 1974)
- Bild 10: Programmdokumentation von Osterloh (nach OSTERLOH, 1983)
- Bild 11: Perspektivbild der Straße (OSTERLOH, 1983)
- Bild 12: Ermittlung der sichtbaren Kurve im Längsschnitt (OSTERLOH, 1983)
- Bild 13: Ermittlung der sichtbaren Kurve im Lageplan (OSTERLOH, 1983)
- Bild 14: Sehfeld des Fahrzeugführers (BIEDERMANN, 1984)
- Bild 15: Rasterschablone zur Bildinhalteerfassung (KAYSER u. a., 1985)
- Bild 16: Nachweis für die Analogie der Perspektivbilder mit gleicher Neigungsdifferenz (WEISE et al., 2002)
- Bild 17: Prüfung der räumlichen Linienführung mit Perspektivbildern (nach KÜHN, 2003)
- Bild 18: Ablauf der Prüfung der räumlichen Linienführung (KÜHN et al., 2007)
- Bild 19: Regelkreis Fahrer - Fahrzeug - Straße (DURTH, 1974)
- Bild 20: Positionen der Fixationspunkte (links und oben rechts) und Größe des Sehfeldes mit zunehmenden Geschwindigkeiten (unten rechts, Zahlen auf den Kurven entsprechen den Geschwindigkeiten in [km/h]) (BABKOV, 1975)
- Bild 21: Zusammenhang Fahrraum – Sichtweiten (LIPPOLD / SCHULZ, 2007)
- Bild 22: Simple-Up-Down Verfahren, Beispiel für eine Folge von Vergleichsreizen (HELLER, 2012)
- Bild 23: Abstimmung der Radienfolge bei anbaufreien Straßen außerhalb bebauter Gebiete mit maßgebender Verbindungsfunktion (FGSV, 1995)
- Bild 24: Zuordnung der Elemente in den Lage- und Höhenplänen nach RAS-L (FGSV, 1995)
- Bild 25: Knick im Lageplan (FGSV, 1970)
- Bild 26: Widerspruch zwischen Straße und Umfeld (FGSV, 1970)
- Bild 27: Aufwölbung (FGSV, 1970)
- Bild 28: Abplattung (FGSV, 1970)
- Bild 29: Lageplanfremde Abbildung (Knick im Lage- und im Höhenplan) (FGSV, 1970)
- Bild 30: Knickwirkung im Höhenplan in der Kuppe (FGSV, 1970)
- Bild 31: Schlängeln in der Trasse (FGSV, 1970)
- Bild 32: Springen mit Versatz (FGSV, 1970)
- Bild 33: Kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven (FGSV, 1970)
- Bild 34: Optischer Knickpunkt (FGSV, 2008b)
- Bild 35: Brettwirkung (FGSV, 2008b)
- Bild 36: Flattern in der Geraden und in der Kurve (FGSV, 2008b)

- Bild 37: Raumelemente bei Lageplangeraden (FGSV, 2008b)
- Bild 38: Raumelemente bei Lageplankurven (FGSV, 2008b)
- Bild 39: Darstellung der Verhältnisse von  $R_v$  zu  $R_h$  (Vejdirektoratet, 2012)
- Bild 40: Knick an kurzer (links) verglichen mit langer (rechts) Wannenausrundung (Vejdirektoratet 2012)
- Bild 41: Erforderliche Haltesichtweite nach den RAA (FGSV, 2008b)
- Bild 42: Untersuchungsmethodik
- Bild 43: Messfahrzeug UNO
- Bild 44: Ansicht aus dem Programm RoadView
- Bild 45: Ansicht aus dem Programm Phoros
- Bild 46: Entwurfselemente des verdeckten Kurvenbeginns
- Bild 47: Entwurfselemente des Springens mit Versatz
- Bild 48: Entwurfselemente des Tauchens und des Springens
- Bild 49: Entwurfselemente des Flatterns
- Bild 50: Entwurfselemente der Knickwirkung im Lageplan
- Bild 51: Entwurfselemente der Knickwirkung im Höhenplan
- Bild 52: Entwurfselemente der Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan
- Bild 53: Entwurfselemente für eine kurze Zwischengerade zwischen zwei gleichgerichteten Kurven
- Bild 54: Entwurfselemente der Brettwirkung, der Aufwölbung und der Abplattung
- Bild 55: Entwurfselemente der Verzerrung der Längsneigung
- Bild 56: Entwurfselemente des Schlängelns
- Bild 57: Ablauf der qualitativen Bewertung
- Bild 58: Befragungen zum Dominanzpaarvergleich
- Bild 59: Perspektivbild mit einem Wald und Schutzplanken im Seitenraum
- Bild 60: Perspektivbild mit Straßenschildern im Seitenraum
- Bild 61: Perspektivbild mit dunkler Textur der Fahrbahn
- Bild 62: Abstraktes Perspektivbild mit schwarzen Linien auf weißem Hintergrund
- Bild 63: Abstraktes Perspektivbild mit weißen Linien auf schwarzem Hintergrund
- Bild 64: Abstraktes Perspektivbild mit schwarzen Linien auf weißem Hintergrund und Drehung der Darstellung um  $45^\circ$
- Bild 65: Modell zur Erkennbarkeit des Kurvenbeginns (FGSV, 2008a)
- Bild 66: Parameterbezeichnungen Sichtschatten
- Bild 67: Tauchen mit  $H_K = 6.500$  m,  $H_W = 6.400$  m (LINKE, 2015)
- Bild 68: Springen mit  $H_K = 6.500$  m,  $H_W = 6.400$  m (LINKE, 2015)
- Bild 69: Verhältnisse  $H_W / H_K$  in Abhängigkeit des Kuppenhalbmessers, Auszug der Ergebnisse zu der Untersuchung ohne Berücksichtigung von Mindesttangentiallängen und einem Tangentschnittpunktstand von 400 m (LINKE, 2015)
- Bild 70: Summenlinie für die relativen Häufigkeiten der Verhältniszerte  $H_W / H_K$  der Untersuchung mit Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 100$  m (LINKE, 2015)
- Bild 71: Summenlinie für die relativen Häufigkeiten der Verhältniszerte  $H_W / H_K$  der Untersuchung mit Berücksichtigung einer Mindesttangentiallänge von  $T = 120$  m und einem Tangentschnittpunktstand von 400 m (LINKE, 2015)
- Bild 72: RQ 25 (links) und RQ 36 (rechts) mit  $H_W = H_K = 13.000$  m,  $s = 4\%$
- Bild 73: RQ 25 mit  $H_W = 8.800$  m,  $H_K = 13.000$  m,  $s = 8\%$  (links) und  $H_W = H_K = 15.000$  m,  $s = 2\%$  (rechts)
- Bild 74: Verdeckte Linkskurve durch passive Schutzeinrichtungen
- Bild 75: Rechtskurve mit RQ 36,  $R = 720$  m,  $A = 240$  m und  $L = 75$  m
- Bild 76: Kuppe mit  $T = 100$  m und  $H_K = 1.667$  m
- Bild 77: Wanne mit RQ 36,  $H_W = 8.800$  m,  $T = 352$  m und  $\Delta s = 8\%$

- Bild 78: Rechtskurve in der Wanne mit:  $\Delta s = 2 \%$ ,  $H_W = 10.000 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ ),  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$
- Bild 79: Rechtskurve in der Wanne mit: RQ 25,  $\Delta s = 12 \%$ ,  $R = 250 \text{ m}$ ,  $A = 90 \text{ m}$ ,  $H_W = 3.333 \text{ m}$  ( $T = 200 \text{ m}$ )
- Bild 80: Rechtskurve in der Wanne mit: RQ 31,5,  $\Delta s = 12 \%$ ,  $R = 250 \text{ m}$ ,  $A = 90 \text{ m}$ ,  $H_W = 3.333 \text{ m}$  ( $T = 200 \text{ m}$ )
- Bild 81: Rechtskurve in der Wanne mit: RQ 36,  $\Delta s = 12 \%$ ,  $R = 720 \text{ m}$ ,  $A = 240 \text{ m}$ ,  $L = 75 \text{ m}$ ,  $H_W = 8.800 \text{ m}$  ( $T = 352 \text{ m}$ )
- Bild 82: Rechtskurve in der Kuppe mit:  $\Delta s = 12 \%$ ,  $H_K = 1.666,67 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ ),  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$
- Bild 83: Linkskurve in der Wanne mit:  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )
- Bild 84: Linkskurve in der Wanne mit durchgängiger Querneigung von  $q = 2,5 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )
- Bild 85: Linkskurve in der Wanne mit negativer Querneigung von  $q = -6,0 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )
- Bild 86: Linkskurve in der Wanne mit negativer Querneigung von  $q = -2,5 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )
- Bild 87: Linkskurve in der Wanne mit einseitiger Querneigung von  $q = 2,5 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )
- Bild 88: Linkskurve in der Wanne mit einseitiger Querneigung von  $q = 6,0 \%$ ,  $R = 280 \text{ m}$ ,  $A = 93,33 \text{ m}$ , RQ 25,  $\Delta s = 4 \%$ ,  $H_W = 1.667 \text{ m}$  ( $T = 100 \text{ m}$ )
- Bild 89: Kurze Zwischengerade mit  $R = 500 \text{ m}$ ,  $L_R = 55 \text{ m}$ , Länge der Zwischengerade:  $100 \text{ m}$
- Bild 90: Kurze Zwischengerade mit  $R = 500 \text{ m}$ ,  $L_R = 55 \text{ m}$ , Länge der Zwischengerade:  $1.000 \text{ m}$
- Bild 91: Kurze Zwischengerade mit  $R = 500 \text{ m}$ ,  $L_R = 100 \text{ m}$ , Länge der Zwischengerade:  $100 \text{ m}$
- Bild 92: Kurze Zwischengerade mit  $R = 280 \text{ m}$ ,  $L_R = 55 \text{ m}$ , Länge der Zwischengerade:  $100 \text{ m}$
- Bild 93: Kurze Zwischengerade mit Linkskurve,  $R = 500 \text{ m}$ ,  $L_R = 55 \text{ m}$ , Länge der Zwischengerade:  $100 \text{ m}$
- Bild 94: Kurze Zwischengerade mit RQ 36,  $R = 500 \text{ m}$ ,  $L_R = 55 \text{ m}$ , Länge der Zwischengerade:  $100 \text{ m}$
- Bild 95: Aufwölbung mit den Parametern  $\Delta s = 2 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$ ,  $L_{ZG} = 400 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 96: Aufwölbung mit den Parametern  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$ ,  $L_{ZG} = 400 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 97: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 50 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 98: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 250 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 99: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 1.000 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 100: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 400 \text{ m}$ ,  $R = +1.000 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 101: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 750 \text{ m}$ ,  $R = +1.000 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 102: Aufwölbung mit den Parametern  $T = 100 \text{ m}$ ,  $L_{ZG} = 400 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25 (nach LORENZ, 2015)
- Bild 103: Aufwölbung mit den Parametern  $T = 250 \text{ m}$ ,  $L_{ZG} = 400 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25 (nach LORENZ, 2015)
- Bild 104: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 200 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 105: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 200 \text{ m}$ ,  $R = +3.000 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)
- Bild 106: Aufwölbung mit den Parametern  $L_{ZG} = 200 \text{ m}$ ,  $R = -3.000 \text{ m}$ ,  $\Delta s = 6 \%$ , RQ 25,  $T = 100 \text{ m}$  (nach LORENZ, 2015)

- Bild 107: Aufwölbung mit den Parametern RQ 25,  $L_{ZG} = 200$  m,  $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 108: Aufwölbung mit den Parametern RQ 36,  $L_{ZG} = 200$  m,  $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 109: Aufwölbung mit den Parametern RQ 25,  $L_{ZG} = 200$  m,  $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m,  $R = + 1.000$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 110: Aufwölbung mit den Parametern RQ 36,  $L_{ZG} = 200$  m,  $\Delta s = 6$  %,  $T = 100$  m,  $R = + 1.000$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 111: Abplattung mit den Parametern  $\Delta s = 0,5$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 500$  m,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 112: Abplattung mit den Parametern  $\Delta s = 1,0$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 1.000$  m,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 113: Abplattung mit den Parametern  $\Delta s = 2,0$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 500$  m,  $T = 100$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 114: Abplattung mit den Parametern  $T = 50$  m,  $\Delta s = 1,0$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 400$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 115: Abplattung mit den Parametern  $T = 125$  m,  $\Delta s = 1,0$  %, RQ 25,  $L_{ZG} = 400$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 116: Abplattung mit den Parametern  $R = + 500$  m, RQ 25,  $T = 75$  m,  $\Delta s = 1,0$  %,  $L_{ZG} = 250$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 117: Abplattung mit den Parametern  $R = \infty$ , RQ 25,  $T = 75$  m,  $\Delta s = 1,0$  %,  $L_{ZG} = 250$  m (nach LORENZ, 2015)
- Bild 118: Brettwirkung auf der 95 D zwischen Aca-pulco und Cuernavaca (TU Dresden)
- Bild 119: Verzerrung der Längsneigung mit RQ 25,  $H_W = 1.000$  m und  $\Delta s = 4$  %
- Bild 120: Verzerrung der Längsneigung mit RQ 36,  $H_W = 1.000$  m und  $\Delta s = 4$  %
- Bild 121: Systemskizze zum Schlängeln
- Bild 122: Mindestlänge der Kurve zur Vermeidung von Schlängeln
- Bild 123: Aufwölbung auf der A 11
- Bild 124: Schlängeln auf der A 11
- Bild 125: Springen auf der A 9
- Bild 126: Verdeckter Kurvenbeginn auf der A 9 bei Station 92+100 in Stationierungsrichtung im Sichtschattenband (oben) und im Perspektivbild (unten, links: Station 92+000, rechts: Station 92+200)
- Bild 127: Sichtschattenstrecke auf der A 9 bei Station 3+700 entgegen der Stationierungsrichtung im Sichtschattenband und im Perspektivbild
- Bild 128: Sichtschattenstrecke auf der A 9 bei Station 6+500 entgegen der Stationierungsrichtung im Sichtschattenband und im Perspektivbild
- Bild 129: Sichtschattenbänder zum Vergleich der Eingangsgröße Augpunktlage (links: Stationen 3+000 bis 4+000, rechts: Stationen 6+000 bis 7+000; oben: Augpunkt Mitte des linken Fahrstreifens, unten: Leitlinie; alle Bilder mit Querneigungseinfluss)
- Bild 130: Sichtschattenband der A 9 mit relativen sichtbaren Fahrbahnoberflächen: Flattern bei Station 29+300
- Bild 131: Sichtschattenband der A 9 mit relativen sichtbaren Fahrbahnoberflächen: Tendenz zur Sichtverzerrung bei 53+200
- Bild 132: Unfallkostenraten der Defizite in Überlagerung mit den Lage- und Höhenplan-krümmungen der A 9, in Stationierungsrichtung von km 42 bis km 52
- Bild 133: Unfallkostenraten der Defizite in Überlagerung mit den Lage- und Höhenplan-krümmungen der A 9, in Stationierungsrichtung von km 72 bis km 82
- Bild 134: Sichtschattentiefe (betrachteter Unfallbereich: 200 m)
- Bild 135: Verdeckter Kurvenbeginn (betrachteter Unfallbereich: 200 m)
- Bild 136: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit Sichtschattentiefe
- Bild 137: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit minimale relative sichtbare Fahrbahnoberfläche
- Bild 138: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit maximale relative sichtbare Fahrbahnoberfläche

- Bild 139: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit minimale Sichtweite
- Bild 140: Unfallkostenraten je Streckenabschnitt mit und ohne Defizit verdeckter Kurvenbeginn
- Bild A: Lageplanverwandte Abbildung (FGSV, 2008b)
- Bild B: Beispiel für die Einteilung einer Strecke in Standardraumelemente (SRE) (FGSV, 2012b)
- Bild C: Standardraumelemente bei Lageplangeraden (FGSV, 2008b; FGSV, 2012b)
- Bild D: Standardraumelemente bei Lageplankurven (FGSV, 2008b; FGSV, 2012b)
- Bild E: Sichtschatten – Springen und Tauchen (FGSV, 2012b)
- Bild F: Optischer Knickpunkt
- Bild G: Flattern und Schlängeln
- Bild H: Aufwölbung
- Tab. 12: Weitere Untersuchungsstrecken im bewegten Gelände
- Tab. 13: Vergleichsstrecken
- Tab. 14: Erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn bei Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen [m]
- Tab. 15: Auftreten des verdeckten Kurvenbeginns in Abhängigkeit der Kurvenrichtung, der Längsneigungsdifferenz, des Querschnitts, der Radiengröße und des Kuppenhalbmessers
- Tab. 16: Erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn bei Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen zum Erahnen der Kurve [m]
- Tab. 17: Erforderliche Wannenhalmmesser zur Vermeidung kritischer Sichtschatten in Abhängigkeit des Kuppenhalbmessers und der Längsneigung, Abstand der Tangentenschnittpunkte: 400 m (nach LINKE, 2015)
- Tab. 18: Erforderliche Halbmesser in Abhängigkeit der Tangentenlänge und der Längsneigungsdifferenz

## Tabellen

- Tab. 1: Modellannahmen (KÜHN, 2003)
- Tab. 2: Empfehlungen für Detailliertheitsgrad, Bezugspunkt und Visualisierungsstandpunkt (KÜHN et al., 2007)
- Tab. 3: Gestaltungsmerkmale der Entwurfsklassen nach RAA (FGSV, 2008b)
- Tab. 4: Kurvenmindestradien bei Elementfolge Gerade – Klothoide – Kreisbogen nach RAS-L (FGSV, 1995)
- Tab. 5: Kurvenmindestradien und Mindestlänge der Kreisbögen nach RAS-L (FGSV, 1995)
- Tab. 6: Höchstlängsneigungen nach RAS-L (FGSV, 1995)
- Tab. 7: Kuppen- und Wannenhalmmesser nach RAS-L (FGSV, 1995)
- Tab. 8: Unfallkategorien (nach FGSV, 2012a)
- Tab. 9: Unfalltypen (nach FGSV, 2012a)
- Tab. 10: Modellannahmen der Fahrerperspektive
- Tab. 11: Untersuchungsstrecken, die vor dem Jahr 1940 eröffnet wurden
- Tab. 19: Differenzen zwischen den erforderlichen Wannenhalmmessern bei einem Tangentenschnittpunktstandes von 400 m und 300 m (nach LINKE, 2015)
- Tab. 20: Relative Häufigkeiten der Verhältniswerte zwischen Wannenhalm- und Kuppenhalbmesser in [%] (nach LINKE, 2015)
- Tab. 21: Parameterkombinationen des Defizits Flattern
- Tab. 22: Bilder für Dominanzpaarvergleich Flattern, Präsentation 1
- Tab. 23: Bilder für Dominanzpaarvergleich Flattern, Präsentation 2
- Tab. 24: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zum Flattern – Präsentation 1
- Tab. 25: Vergleich zwischen den RQ bei gleichen Gradientenparametern
- Tab. 26: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zum Flattern – Präsentation 2
- Tab. 27: Bilder für Dominanzpaarvergleich Knickwirkung im Lageplan

- 
- Tab. 28: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zum Defizit Knick im Lageplan
- Tab. 29: Radiengrößen, die als Grenzwert bzgl. der Knickwirkung im Lageplan angegeben wurden
- Tab. 30: Relevante Parameterkombinationen des Defizits Knickwirkung im Höhenplan
- Tab. 31: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zur Knickwirkung im Höhenplan – Präsentation 1
- Tab. 32: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zur Knickwirkung im Höhenplan – Präsentation 2
- Tab. 33: Parameterkombinationen zum Knick im Höhenplan für die Method of Adjustment
- Tab. 34: Tangentenlängen, die als Grenzwert bzgl. der Knickwirkung im Höhenplan angegeben wurden
- Tab. 35: Tangentenlängen in Abhängigkeit des Wannenhalbmessers und der Längsneigungsdifferenz
- Tab. 36: Grenzwerte des Defizits Knickwirkung im Höhenplan
- Tab. 37: Grenzwerte für die Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan – Linkskurve ( $A = R/3$ )
- Tab. 38: Grenzwerte für die Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan – Rechtskurve ( $A = R/3$ )
- Tab. 39: Grenzwerte zur Vermeidung der Knickwirkung im Lage- und im Höhenplan
- Tab. 40: Untersuchte Parametervariationen zum Defizit Aufwölbung (nach Lorenz, 2015)
- Tab. 41: Untersuchte Parametervariationen zum Defizit Abplattung (nach Lorenz, 2015)
- Tab. 42: Häufigkeiten der zu bewertenden Bilder zur Verzerrung der Längsneigung ( $n = 320$ )
- Tab. A: Erforderliche Verschiebung des Kuppenbeginns hinter den Kurvenbeginn bei Übergang Gerade – Klothoide – Kreisbogen [m]

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2017

#### V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien

Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

#### V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren

Maier, Berger, Kollmus € 17,50

#### V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen

Lippold, Vettters, Steinert € 19,50

#### V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten

Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

#### V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung

Kleine, Lehmann € 16,50

#### V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle

Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

#### V 288: Überholungen von Lang-Lkw – Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf

Roos, Zimmermann, Köhler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 289: Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00

#### V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00

#### V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50

#### V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw

Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

#### V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB

Maibach, Tacke, Kießig € 15,50

#### V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss

Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50

#### V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße

Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen

Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysesysteme

Balck, Schüller, Balmberger, Rossol  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckeneinflussungsanlagen

Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

#### V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten

Werkenthin, Kluge, Wessolek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung

Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer

Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50

#### V 304: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015

Fitschen, Nordmann € 31,00  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00

#### V 305: Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen

Hartmann, Londong € 16,00

#### V 306: Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest

Lippold, Wittig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### V 307: Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung

Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50

**V 308: Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)**

Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 309: Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO<sub>2</sub>-Pilotstudie Lärmschutzwand**

Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50

**V 310: Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie**

Wang, Oeser, Steinauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 311: Feldversuch mit Lang-Lkw**

Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 312: Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen**

Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

**V 313: Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**

Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

**V 314: Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**

Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

**V 315: Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**

Kappich, Westermann, Holst € 15,50

**V 316: Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**

Lindner, Hartmann, Schulze, Hübel € 18,50

**V 317: Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**

Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00

**V 318: Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**

Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50

**V 319: Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**

Lippold, Vettors, Ressel, Alber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 320: Einsatzbereiche und Entwurfs Elemente von Rad-schnellverbindungen**

Malik, Lange, Andriess, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

**V 322: Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**

Hausmann € 18,00

**V 323: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**

Fitschen, Nordmann € 31,50  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00

## 2020

**V 321: Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wurstthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00

**V 324: Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**

Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 325: Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**

D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 326: Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**

Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50

**V 327: Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**

Frenken, Mahmoudi € 16,50

**V 328: Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**

Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu € 18,50

**V 329: Streckenbezogene Glättevorhersage**

Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

**V 330: Führung des Radverkehrs an Landstraßen**

Baier, Leu, Rittershaus  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 331: Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**

Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

**V 332: Räumliche Linienführung von Autobahnen**

Lippold, Zösch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.