

2 Kenntnisstand

2.1 Witterung und Wettergeschehen im Winter

2.1.1 Klima der Bundesrepublik Deutschland

Für das Klima der Bundesrepublik ist ihre Lage in der gemässigten Zone mit häufigem Wetterwechsel bestimmend. Winde aus vorwiegend westlichen Richtungen und Niederschläge zu allen Jahreszeiten sind charakteristisch. Die jährlichen Niederschlagsmengen betragen im Norddeutschen Tiefland weniger als 500 - 700 mm, in den Mittelgebirgen um 700 - 1500 mm und in den Alpen bis über 2000 mm. Vom Nordwesten nach Osten und Südosten fortschreitend liegt hier ein allmählicher Übergang vom ozeanischen zum kontinentalen Klima. Dabei wird das Winterwetter von beiden Klimaformen beeinflusst und ist bei Tiefdruck durch milde und regenreiche, oft stürmische Witterung (ozeanisch) oder bei konstantem Hochdruck mit mässigen Ostwinden und tiefen Temperaturen (kontinental) bestimmt. Die Durchschnittstemperaturen im Januar, dem kältesten Monat im Jahr, liegen im Tiefland um +1,5°C bis -0,5°C; in den Gebirgen erreichen sie je nach Höhenlage unter -6°C [STATISTISCHES BUNDESAMT 1996].

2.1.2 Niederschlagsformen und Witterungszustände

Unter Niederschlag versteht man jede flüssige oder feste aus kondensiertem Wasser gebildete und herabfallende Ausscheidung aus Wolken und Nebel. Nach HÄCKEL [1993] teilt man die Niederschläge in flüssige (Nieselregen und Regen) und feste Niederschläge (Eiskristalle, Schnee und Hagel) ein. Flüssiges Wasser mit Temperaturen unter 0°C nennt man unterkühltes Wasser bzw. unterkühlten Regen. Dieser ist landläufig auch als Eisregen bekannt und tritt häufig bei nordwärts vorstossender Höhenwarmluft aus dem Mittelmeerraum auf, ist also an aufgleitende Warmluft gebunden und fällt flächenhaft ausgedehnt; er wird meist von Regen abgelöst. Als Glatteis bezeichnet man eine glatte, glasige Eisschicht. Sie entsteht, wenn unterkühlter Regen spontan an einer Oberfläche festfriert. Glatteis kann aber auch durch gewöhnlichen Regen hervorgerufen werden, wenn die Gegenstände, auf die er trifft, sehr kalt sind, so dass er zu Eis erstarrt. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn nach einer Kälteperiode der Regen einer Warmfront am Boden, aus dem der Frost noch nicht entwichen ist, gefriert und ihn vorübergehend mit einer Eisschicht überzieht.

Schnee entsteht bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt [WEISCHET 1988]. Fällt Schnee bei Temperaturen um 0°C oder darunter, so lagert er sich als feuchter Lockerschnee mit einer Dichte von 0,1 bis 0,2 g/cm³ ab. Zunächst lässt er sich leicht wegblasen (Pulverschnee). Mit der Zeit ballt er sich zusammen und klebt. Der über eine Schneeschicht fegende Wind drückt schon natürlich durch seine Schubkraft die Kristalle an der Oberfläche zusammen und es entsteht Pressschnee. Diese Schicht wird auf der Straße aber erst dann sehr hart, wenn durch überrollenden Kraftfahrzeugverkehr Schneeglätte und durch wiedergefrorenes Schmelzwasser Eisglätte entsteht.

Bei tiefen Temperaturen (unter -10°C) enthält niedergehender Schnee kaum grössere Flocken; er kommt als feiner Pulverschnee zur Erde. Nach BLÜTHGEN und WEISCHET [1980] kommt es bei Schneefall in sehr trockener und kalter Kontinentalluft zur Bildung von kleinen Schneekristallen, die keine nennenswerte Schneedecke zu liefern vermögen.

2.1.3 Häufigkeit, Umfang und Dauer von winterlichen Witterungszuständen

Das geographische Klima ist die für einen Ort, eine Landschaft oder einen grösseren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Häufigkeitsverteilung. Über den mittleren Breiten der Nordhalbkugel liegt ein permanentes Westwindband in grosser Höhe, das durch Wellen (Breite etwa 10.000 km und Dauer 5 bis 10 Tage) charakterisiert ist; sein Verlauf ist nach RAATZ [1994a] gut zu prognostizieren. Gekoppelt an die Strömungsverhältnisse in der Höhe ist das Wettergeschehen am Boden mit seinen Luftdruckgebieten. Die bodennahen Luft-

druckgebiete haben eine Breite bis zu 1.000 km und eine Dauer von 2 bis 5 Tagen. Mit diesen Luftdruckgebieten sind Luftmassengrenzen verbunden, die sich meist als Fronten ausbilden. Fronten sind Zonen mit typischem Wetterverlauf. Wolken- und Niederschlagsfelder dieser meist wandernden Grenzen bestimmen das Wettergeschehen in Regionen von ca. 100 km Breite und einem Zeitraum von einem halben bis zu einem Tag. In Abhängigkeit von der Lage kann sich aber auch ein regionales Wettergeschehen bilden (Ausdehnung: 10 km und 1 bis 5 Stunden). Hier spielt die Topographie der Landschaft eine wichtige Rolle. Alle genannten Wetterphänomene mit ihren unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen stehen in wechselseitiger Abhängigkeit. Langlebige und grossräumige Strukturen können über mehrere Tage, einzelne kurzlebige, lokale Phänomene z.T. nur über wenige Stunden vorherrschen [RAATZ 1994a].

Zu den häufigsten Grosswetterlagen im Winter zählen nach BLÜTHGEN und WEISCHET [1980] in Europa die West- oder Südwestlage bzw. ein Tief vor den Britischen Inseln (mild mit Regen oder zeitweilig ergiebigen Schneefällen), das Hoch am Westrand Europas (mild mit feuchten Perioden) und das Hoch über Mitteleuropa bis Westrussland (mässig kalt bis kalt ohne nennenswerte Niederschläge). BLÜTHGEN [1980] hat Kaltlufteinbrüche im europäischen Winter untersucht und kommt zu folgender Einteilung:

Typ	Dauer	Niederschläge	Zeitraum
Nordostlufteinbrüche	tage- oder wochenlang	keine	Dezember bis März
Mitteleuropäische Kaltluftvorstösse	begrenzt, kurz	Nebel	jederzeit zwischen verschiedenen Wetterfronten
Skandinavische Kaltluftkissen	begrenzt, kurz	keine	jederzeit zwischen verschiedenen Wetterfronten
Nordwestluftvorstösse	tagelang	viele Schneeschauer	März und April
Nordskandinavische Kaltluftvorstösse	tagelang	ergiebige Schneefälle	besonders Spätwinter
Südostluftvorstösse	kurz (stundenlang)	Schneeschauer	besonders Spätwinter

Tab. 2.1.3.1: Typen von Kaltlufteinbrüchen in Europa nach BLÜTHGEN [1980]

Neben Kaltluftvorstosstypen entstehen auch Wärmewellen, die nicht selten zu ausgeprägten Niederschlagsereignissen führen:

Typ	Niederschläge	betroffenes Gebiet
Mediterrane Aufgleitfächer	Schneefälle auf frostfreien Boden	Gebirgslagen (Alpen)
Südwestwetter	Regen (Tauwetter)	West- und Mitteleuropa
Baltische Warmluftzungen	Nieselregen oder Regenschauer	nördliches Mitteleuropa
Polare Warmluftzungen	Schneeschauern und Schneeregen	Mitteleuropa
Nordwestwärmewellen	ergiebige Schneefälle	Mittelgebirgsräume

Tab. 2.1.3.2: Typen von Wärmewellen in Europa nach BLÜTHGEN [1980]

Regen und Schneefälle können sowohl von kurzer Dauer sein (als Regen- bzw. Schneeschauer) als auch anhaltend auftreten (Landregen bzw. langanhaltende Schneefälle). Nach HÄCKEL [1993] unterscheidet man Aufgleit- und Konvektionsniederschläge. Aufgleitniederschläge haben flächenhaften Charakter und pflegen je nach der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der sie auslösenden Aufgleitfläche mehr oder weniger lange anzuhalten. Konvektionsniederschläge beruhen auf wärmebedingtem Aufsteigen horizontal relativ eng begrenzter Luftmassen (wenige Kilometer Durchmesser); sie haben auch nur eine begrenzte zeitliche Dauer (Schauer).

Niederschlagsstärke, -dauer und -häufigkeit stehen in folgender Beziehung: je grösser die Intensität, desto kürzer die Dauer und desto geringer die Häufigkeit. Kleine und sehr kleine Niederschlagsintensitäten treten mit grösserer Wahrscheinlichkeit auf als Niederschläge mit grosser und sehr grosser Intensität. SCHARSCHING [1988] leitet aus langjährigen meteorologischen Beobachtungsreihen ab, dass innerhalb eines Niederschlagsereignisses nur selten eine einzelne Intensität auftritt. Im Normalfall besteht ein Ereignis aus einer Vielzahl unterschiedlicher Stärken und Dauern. Zu- und abnehmende Intensitäten in der Endphase des Ereignisses ergeben sich daraus, dass die Intensitäten innerhalb der Flächenausdehnung des Niederschlagsgebietes mit zunehmender Entfernung vom Zentrum abnehmen, während das Gebiet selbst mit einer mittleren Geschwindigkeit von 15 bis 20 m/s weiterwandert.

ZULAUF [1966] beschreibt, dass Regenfälle im Winter mit Stundenintensitäten von mehr als 1 mm, die zu Glatteis führen, sehr seltene Ereignisse sind. Da die winterlichen Starkniederschläge in den meisten Fällen auf Warmfronten zurückzuführen sind (s.o.), die in den Niederungen grösstenteils Regen verursachen, ist verständlich, dass Grossschneefälle dort zu den Seltenheiten gehören. Höchst selten kommt im Mittelgebirge auch ein Schneezuwachs von 3 cm und mehr in einer Stunde vor, d.h. auch die wenigen grossen gemessenen Tagesschneefälle bleiben auf die Stunde umgerechnet unter 1 cm [ZHINGG 1964]. Allerdings kann sich in Lagen tiefer 800 mü.NN. eine Schneedecke bereits im November oder Dezember bilden und ab Januar fehlen. Es gibt aber auch Jahre, in denen sich die winterliche Schneedecke erst in der zweiten Winterhälfte einstellt.

Zu langanhaltenden Schneefällen kommt es, wenn Warmluft auf Kaltluft aufgleitet. Dann fällt oft stundenlang dichter, flockiger Schnee, bis sich die Warmluft bis zum Boden durchsetzt und den gefallenen Schnee in Matsch verwandelt. Das auslösende Wolkenband kann eine Breite von 300 bis 500 km haben und über 1.000 km lang sein [RAATZ 1994a].

Um das Ausmass von Schneefallereignissen abschätzen zu können, wurden von ZULAUF [1966] aus meteorologischen Aufzeichnungen ermittelte Schneefallstundenintensitäten, die im Verlaufe von einem oder mehreren Jahren vorkommen, untersucht. Für den Verkehrsablauf sind in erster Linie Intensitäten von 1 bis 5 cm relevant. Ausserdem sind die Häufigkeiten, in denen diese Intensitäten andauern, von Bedeutung. Dafür wurden sogenannte Tagesintensitäten ermittelt. Aus Abbildung 2.1.3.1 [ZULAUF 1966] kann abgeleitet werden, dass Stundenintensitäten von 1 cm pro Jahr nur ungefähr zweimal auftreten. Schneemengen von 2 cm, 3 cm, 4 cm bzw. 5 cm pro Stunde fallen in 18, 24, 30 bzw. ca. 36 Monaten einmal. Ausserdem konnte ZULAUF ermitteln, dass auf Schneefälle, die 3 cm pro Stunde übersteigen, im mittleren Bergland gewöhnlich Regen folgt.

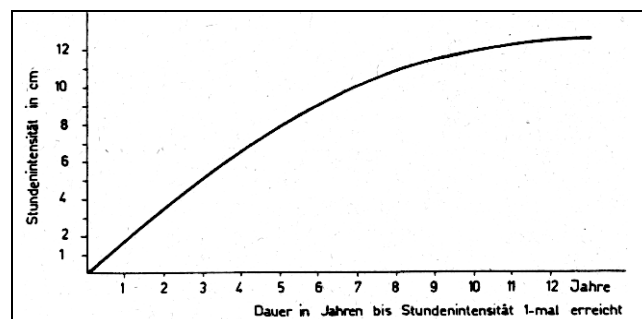


Abb. 2.1.3.1: Schneefall-Stundenintensitäten nach ZULAUF [1966]

Eine Verbindung zu obigen Aussagen mit den Graphen der folgenden Abbildung (2.1.3.2), die darlegt, dass in ca. 300 mü.NN. während 10 Jahren an nur 20 Tagen mit einer Schneefallintensität von ca. 5 cm pro Tag zu erwarten sind, lässt ableiten, dass Niederschlagsmengen mit Stundenintensitäten von z.B. 2 cm nicht über allzu lange Zeitspannen andauern.

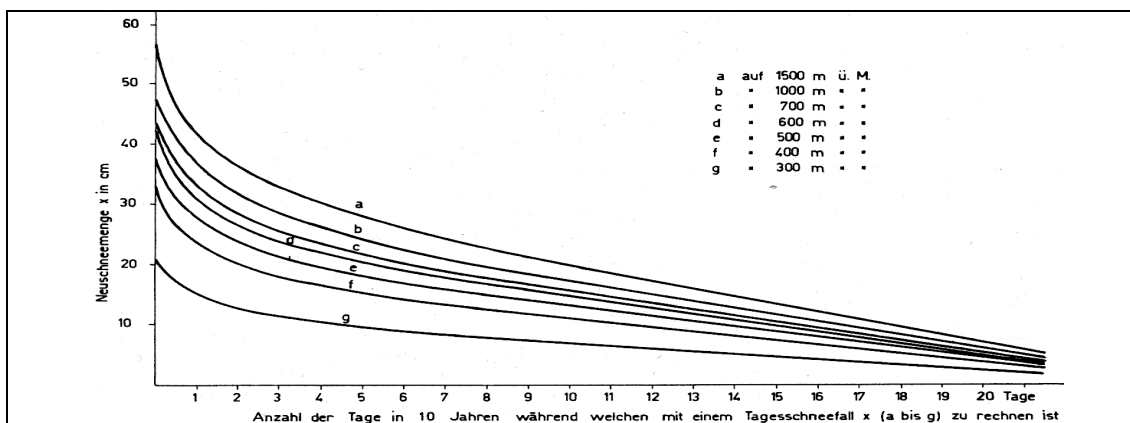


Abb. 2.1.3.2: Schneefall-Tagesintensitäten nach ZULAUF [1966]

Eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Gebieten in Abhängigkeit von der Winterintensität ist aufgrund der Forschung der BASt [BREITENSTEIN 1994 und 1995] möglich. Als Parameter für die Intensität sind Frost-, Schnee- und Eistage massgebend; mit archivierten Daten des Deutschen Wetterdienstes kann eine Berechnung der Intensität rückwirkend durchgeführt werden.

2.1.4 Winterglätte auf Verkehrsflächen

Entscheidend für die Glätte auf Verkehrsflächen ist die Frage, durch welche Niederschlagsart eine Glätteschicht entsteht. Nach dem Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Winterdienst [FGSV 1997] werden vier Glätteformen unterschieden:

Form	Entstehung durch ...
Reifglätte	... Ablagern und Gefrieren von Luftfeuchtigkeit
Schneeglätte	... Festfahren bzw. Festtreten von Schnee oder Gefrieren von Schneematsch oder Schneeresten
Eisglätte	... Gefrieren vorhandener Feuchtigkeit (wird auch als überfrierende Nässe bezeichnet)
Glatteis	... Eisregen (Temperatur der Tropfen unter 0° C) oder Regen auf eine unterkühlte Verkehrsfläche (homogene Eisschicht)

Tab. 2.1.4.1: Glätteformen und ihre Entstehung nach FGSV [1997]

Unter Berücksichtigung der vielen auf einer Straße unter Verkehr wirkenden Einflüsse kann davon ausgegangen werden, dass als Ursachen einer Glätteschicht besonders die nicht-atmosphärischen Randbedingungen wie Druckkräfte auf die Fahrbahn („Walkarbeit“), Energieeintrag durch Reifen, Luftverwirbelungen von Schneeflocken und Streusalz durch die Fahrzeuge sowie die Verkehrsstärke Einfluss haben. Bei sehr langsam fahrendem und stockendem Verkehr (Stau) kommt noch die Strahlungswärme der Motoren hinzu; kurzzeitiges Auftauen und erneutes Gefrieren bewirkt zusätzlich eine schnelle Vereisung des Straßenbelags.

Fazit:

Durch das gemäßigte Klima kann im größten Teil des Jahres in Deutschland mit schnee- und eisfreien Fahrbahnen gerechnet werden. Selbst an Wintertagen herrschen glatte Fahrbahnzustände meist nur stundenweise vor. In extremen Situationen sind die Auswirkungen des Winters aber offenkundig. Welche Form der winterlichen Glätte auftritt, ist abhängig von den Temperaturverhältnissen und vom Vorhandensein von Wasser. Glättebildungsprozesse können durch den Einsatz von Taumitteln gemindert werden. Hinzu kommen die von der Verkehrsstärke abhängigen Einflüsse auf die Fahrbahn als Druckkräfte und Energieeintrag.

2.2 Besonderheiten des Verkehrsablaufs im Winter

2.2.1 Allgemeines

Die Winterdienstforschung der letzten 20 Jahre (und hier vornehmlich die Erforschung der Bedeutung des Winterdienstes für die Verkehrssicherheit) hat immer wieder versucht, gemessene Geschwindigkeiten mit gemessenen Verkehrsstärken in Beziehung zu setzen [ÖBERG 1981, DURTH / HANKE / NEUHOF 1983, ÖBERG / RAGNARSSON 1987, DURTH ET AL. 1996]. Hierdurch war es möglich, Rückgänge der Verkehrsnachfrage und der Verkehrsstärke bei winterlicher Witterung im Vergleich zu nicht-winterlichen Fahrbahnzuständen für einzelne Winterereignisse zu quantifizieren. Nach sorgfältiger Literaturanalyse für diese Arbeit kann festgestellt werden, dass die Daten von meist nur stundenweise anhaltenden und unterschiedlich ausgeprägten Winterereignissen stammen; sie haben deshalb eine grosse Streuung.

Die für die Beurteilung von Verkehrszusammenbrüchen im Winter wichtige Kenntnis der Kapazität bei unterschiedlichen Witterungs- und Straßenzuständen existiert bislang nicht. Dies gilt auch für definierte Randbedingungen wie „hell / dunkel“, „niedrige / hohe Güterverkehrsanteile“, „werktags / sonn- und feiertags“, „ebene Strecken / Steigungsstrecken“ usw. Deshalb kann die mögliche Kapazität im Winter immer nur durch den Vergleich von Messungen des Verkehrsablaufs im Winter mit unter „Idealbedingungen“ erstellten Fundamentaldiagrammen abgeschätzt werden.

Im folgenden werden daher zunächst die Zustandsformen des Verkehrs, die Verkehrsnachfrage, die Verkehrsstärke und die Kapazität aus einschlägigen verkehrstechnischen Untersuchungen beschrieben. Die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Verkehrsstärke, -dichte und Geschwindigkeit (Fundamentaldiagramm) wird dabei weitgehend vorausgesetzt; auf sie wird nur kurz eingegangen. Abschliessend werden Aussagen zu Geschwindigkeiten im Winter/Nicht-Winter-Vergleich getroffen, und es wird auf Zeitverluste aus Störungen eingegangen.

2.2.2 Zustandsformen des Verkehrs

WILLMANN [1978] beschreibt, dass Einflussfaktoren auf den Verkehrszustand von der Fahrbahn (Linienführung in Lage- und Höhenplan, Querschnittsgestaltung, Fahrbahndeckenart und Fahrbahnzustand), von den Fahrzeugen (Typ und Eigenschaften), von den Fahrern (Verhalten und Fahrfertigkeiten) und vom Verkehr (Verkehrsstärke und -dichte sowie Verkehrszusammensetzung) abhängig sind. Als weitere Faktoren werden die Verkehrsregelung (Geschwindigkeitsbeschränkung, Überholverbot und Warnzeichen), aber auch die Witterung (Helligkeit, Wind, Regen, Schnee, Nebel) genannt.

Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs bzw. -zustands können Modelle verwendet werden, die diese Einflussfaktoren zumindest teilweise berücksichtigen. Es gibt grundsätzlich zwei unterschiedliche Möglichkeiten, den Verkehrsablauf zu beschreiben:

- die mikroskopische Betrachtung von Einzelfahrzeugen und
- die makroskopische Betrachtung von Fahrzeugkollektiven.

Mikroskopische Untersuchungen geben Aufschluss über die kinematischen Grössen der einzelnen Fahrzeuge (Geschwindigkeiten, Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge), also „die Bewegungsabläufe der einzelnen Verkehrselemente“ [KÖHLER 1974]. Der Bewegungsablauf der Fahrzeuge allein und zueinander kann in Form von Abstandsmodellen (einfaches Abstandsmodell, erweiterte Fahrzeugfolgemodelle, Modell des relativ sicheren Abstands) oder als psycho-physische Wahrnehmungsmodelle nachgebildet werden.

Das **einfache Abstandsmodell** geht von einem konstanten Fahrzeugfolgeabstand (a) aus, über den - unter der Annahme einer konstanten Fahrzeuglänge (l_F) - sich die Verkehrsdichte (k) einer Strecke wie folgt berechnen lässt:

$$k = 1 / (l_F + a)$$

Für die Verkehrsstärke (q) gilt dann

$$q = v_m / (l_F + a)$$

so dass die Verkehrsstärke nach diesem Ansatz linear mit dem Mittelwert der momentanen Geschwindigkeit (v_m) zunimmt.

Erweiterte Fahrzeugfolgemodelle gehen von Mindestfolgeabständen aus, die einen sicheren Halt auch bei plötzlichem Stillstand des vorausfahrenden Fahrzeugs ermöglichen. Wenn das Fahrzeug nach der Bremsung noch einen Sicherheitsabstand (l_s) zum Vorderfahrzeug einhalten soll, ergibt sich der benötigte Abstand zu:

$$a = \Delta t_a \cdot v + (v^2 / 2 \cdot g \cdot \mu) + l_s + l_F$$

so dass sich die mögliche Verkehrsstärke (q) wie folgt ergibt:

$$q = v_m / (l_s + l_F + \Delta t_a \cdot v + (v^2 / 2 \cdot g \cdot \mu))$$

In der Realität fahren unterschiedliche Fahrer mit teils sehr unterschiedlichen Abständen zu den vorausfahrenden Fahrzeugen, so dass **Fahrzeugfolgemodelle** entwickelt wurden, die den ständig ablaufenden Prozess des Wahrnehmens und Reagierens (bremsen, beschleunigen, Geschwindigkeit halten) berücksichtigen.

Im Gegensatz zu diesen deterministischen (d.h. eine bestimmte statistische Grösse betreffenden) Modellen wird bei den **psycho-physischen Abstandsmodellen** davon ausgegangen, dass bei grossen Abständen Geschwindigkeitsdifferenzen keinen Einfluss auf das Fahrverhalten des Folgefahrzeugs ausüben und bei geringen Abständen die Wahrnehmungsschwelle geschwindigkeits- und abstandsabhängig ist. Aus Vergleichen von Bewegungslinien lassen sich dann kritische Zustände, Stillstände und auch Kapazitäten ermitteln.

Betrachtet man ein Kollektiv von Fahrzeugen und erfasst dabei Grössen, die dieses Kollektiv insgesamt beschreiben (Verkehrsstärke und -dichte, mittlere Geschwindigkeiten, Zu- und Abfluss etc.), so führt man direkt eine makroskopische Untersuchung des Verkehrsgeschehens durch. **Makroskopische Verkehrsflussmodelle** machen sich die aus der Hydromechanik bekannte Kontinuumsgleichung zu eigen. Hier werden Streckenabschnitte in Segmente unterteilt, in denen homogene und stationäre Verkehrszustände vorliegen. Dadurch ergeben makroskopische Modelle Parameter, die sich messtechnisch nur indirekt bestimmen lassen.

Eine zentrale Rolle in der „Theorie des Verkehrsflusses“ [LEUTZBACH 1972] kommt der Frage zu, wie die drei wesentlichen, den Verkehrsablauf charakterisierenden Parameter **Verkehrsstärke**, **Verkehrsdichte** und **mittlere Geschwindigkeit** miteinander verknüpft sind. Wichtigste Schlüsse aus der Theorie des stationären Verkehrsflusses (makroskopische Betrachtung) sind, dass mit zunehmender Verkehrsdichte die mittlere Geschwindigkeit sinkt und dass jenseits einer kritischen Verkehrsdichte die Verkehrsstärke mit weiter anwachsender Verkehrsdichte zurückgeht, d.h. die Verkehrsstärke eines Straßenquerschnitts ist begrenzt. Anschaulich dargestellt werden kann dieser Zusammenhang in Fundamentaldiagrammen (Abb. 2.2.2.1).

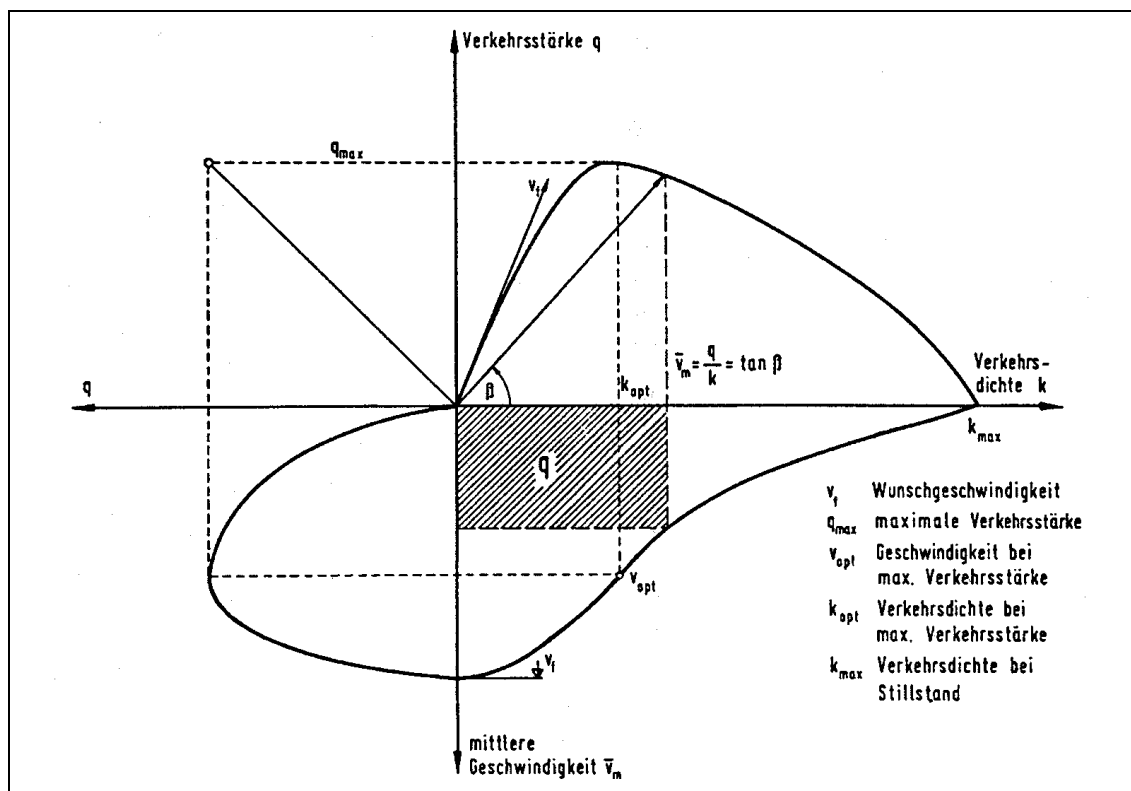


Abb. 2.2.2.1: Schematisiertes Fundamentaldiagramm zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit nach RESSEL [1994]

Allgemein bekannt ist, dass sich der Verlauf des Fundamentaldiagramms näherungsweise nur für den stabilen Bereich beschreiben lässt und deshalb streng genommen nur für freien und teilgebundenen Verkehr gilt. Selbst hier besteht kein fester Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke (q) und Verkehrsdichte (k), da beispielsweise die Witterung (Regen, Schneefall, Glatteis, Nebel etc.) das Abstandsverhalten der Fahrzeuge bestimmt und somit direkt die Verkehrsdichte beeinflusst.

Vergleiche von Messwerten gleicher Strecken zu unterschiedlichen Zeiten haben gezeigt, dass es „das“ Fundamentaldiagramm nicht gibt, da es ständigen Änderungen unterworfen ist, die von äusseren Randbedingungen wie Zusammensetzung des Verkehrs, Sicht- und Lichtverhältnissen, Witterung, Engpässen, Lkw-Pulks usw. abhängen [UERLINGS 1980, PONZLET 1996]. Fundamentaldiagramme bzw. stationärer Modelle gelten also streng genommen nur für die untersuchte Messstrecke und den Beobachtungszeitraum [BOLTZE 1999].

Bei der Bestimmung von Verkehrszuständen unterscheidet man in Anlehnung an das Fundamentaldiagramm drei Bereiche:

- freier Verkehr (uneingeschränkte Überholmöglichkeit),
- teilgebundener Verkehr (eingeschränkte Überholmöglichkeit) und
- gebundener Verkehr (keine Überholmöglichkeit oder Stau).

STREMMER [1984] schlägt als feinere Differenzierung sieben Verkehrszustandsklassen vor (Tab. 2.2.2.1). Dabei wird die quantitative Klassifikation durch Schwellenwerte festgelegt, die als lokale Messgrößen unter zeitlicher Veränderung direkt messbar sind.

Verkehrszustandsklasse	Merkmale
Verkehrsruhe	- Verkehrsstärke (q) und -dichte (k) sind nahezu Null - es befinden sich kaum Fahrzeuge im Streckenabschnitt
Schwacher Verkehr	- geringe bis mittlere Verkehrsstärke (q) und -dichte (k) - mittlere Reisegeschwindigkeit weicht nicht oder nur geringfügig von Dichtewellengeschwindigkeit und den mittleren lokalen Geschwindigkeiten am Ein- und Ausgangsquerschnitt ab - Differenz der mittleren lokalen Geschwindigkeiten auf den einzelnen Fahrstreifen gross
Starker Verkehr	- Verkehrsdichte (k) gross - Zufluss am Eingangsquerschnitt gross - Dichtewellengeschwindigkeit weicht von der Reisegeschwindigkeit ab
Staugefahr	- sehr hohe Verkehrsdichte (k) und sehr grosser Zufluss - Abnahme der Reisegeschwindigkeit und niedrige lokale Geschwindigkeiten - Angleichung der Fahrstreifengeschwindigkeiten
Kurzer Stau	- Verkehrsdichte (k) steigt an, ohne dass sich die Verkehrsstärken (q) am Ein- und Ausgangsquerschnitt wesentlich ändern - Reisegeschwindigkeit klein gegenüber den lokalen Geschwindigkeiten an den Messquerschnitten
Mengenstau	- Verkehrsdichte (k) steigt sehr stark an - Einbrüche der lokalen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke am Eingangsquerschnitt - geringe Verkehrsstärke (q) am Ausgangsquerschnitt
Streckenblockierung	- Verkehrsstärke (q) am Ausgang gleich Null - Stau pflanzt sich bedingt durch hohen Zufluss entgegen der Fahrtrichtung fort - an den stromaufwärts liegenden Messquerschnitten entsprechende Einbrüche von Verkehrsstärke (q) und Geschwindigkeit

Tab. 2.2.2.1: Klassifikation von Verkehrszuständen nach STREMMER [1984]

Zwischen konstanten Zuständen treten in der Praxis naturgemäss Übergangszustände auf. BECKER [1989] beschreibt fünf „Verkehrsstufen“, die in den Richtlinien für den Verkehrswarndienst der Polizei zur Erstellung von Rundfunkmeldungen unterschieden werden. Die Merkmale dieser Verkehrsstufen werden u.a. durch Verkehrsstärken beschrieben; sie beziehen sich auf ideale Witterungs- und Straßenzustandsbedingungen (Tab. 2.2.2.2).

Verkehrsstufe	Merkmale	Rundfunkdurchsage
1	störungsfreier Verkehr in Stärken von 0 bis 600 Fz/h und FS	schwacher Verkehr
2	störungsfreier Verkehr in Stärken von 600 bis 1.200 Fz/h und FS	lebhafter Verkehr
3	störungsfreier Verkehr in Stärken von mehr als 1.200 Fz/h und FS	dichter Verkehr
4	Verkehrsdichte lässt keine Wahl der Fahrgeschwindigkeit zu	zähfließender Verkehr
5	Verkehr steht	Stau

Tab. 2.2.2.2: Verkehrszustände als Verkehrsstufen nach BECKER [1989]

MANGOLD ET AL. beschreiben in ihrer Untersuchung der „Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung“ [1996] Verkehrszustände in Abhängigkeit von Verkehrsstärke- und Verkehrsdichteklassen. Dabei werden die Klassengrenzen für die Verkehrsstärke [Pkw-E/h] und die Verkehrsdichte [Pkw-E/km] je Fahrstreifen angegeben. Die Beschreibung endet bei Verkehrsstärken von mehr als 1.800 Pkw-E/h und Verkehrsdichten von $k > 15$ Pkw-E/km bzw. k ($q = q_{\max}$). Verkehrsstärken winterlicher Verkehrszustände wurden wegen ihres seltenen Auftretens in der Untersuchung nur argumentativ beschrieben. Die aufgeführten Zustandsklassen gelten demzufolge nur für „ideale Witterungszustände“ (Tab. 2.2.2.3).

Verkehrszustand [-]	Verkehrsstärkeklasse [-]	Klassengrenzen [Pkw-E/h]	Klassenbreite [Pkw-E/h]	Verkehrsdichteklasse [Pkw-E/km]
frei	geringer Verkehr	0 - 360	360	$0 < k < 5$
frei bis teilgebunden	schwacher Verkehr	> 360 - 720	360	$0 < k < 5$
teilgebunden	mässiger Verkehr	> 720 - 1.080	360	$5 < k < 15$
teilgebunden bis gebunden	mittlerer Verkehr	> 1.080 - 1.440	360	$5 < k < 15$
voll gebunden	starker Verkehr	> 1.440 - 1.800	360	$15 < k < k$ ($q=q_{\max}$)
voll gebunden	sehr starker Verkehr	> 1.800	-	$15 < k < k$ ($q=q_{\max}$)
(Anm.: nach Untersuchung von Pkw-Äquivalenzwerten wurde 1 Lkw mit 2 Pkw-E gleichgesetzt)				

Tab. 2.2.2.3: Verkehrszustände abhängig von Verkehrsstärke- und -dichteklassen nach MANGOLD / TRÄGER / LINDENBACH [1996]

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen „HBS“ [FGSV 2001] werden Verkehrszustände in sechs Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) eingeteilt. Folgende Beschreibung liegt den einzelnen Qualitätsstufen zugrunde (Tab. 2.2.2.4):

Stufe	Beschreibung
A	Die Kraftfahrer werden äusserst selten von anderen beeinflusst. Der Auslastungsgrad ist sehr gering. Die Fahrer können ihre Geschwindigkeit in dem Rahmen frei wählen, den die Streckencharakteristik zulässt. Sie besitzen innerhalb des Verkehrsstroms in vollem Umfang Bewegungsfreiheit, auch hinsichtlich der Wahl des Fahrstreifens. Der Verkehrsfluss ist frei.
B	Es treten geringfügige Einflüsse durch andere Kraftfahrer auf, die das individuelle Fahrverhalten jedoch nur unwesentlich bestimmen. Der Auslastungsgrad ist gering. Die Geschwindigkeiten erreichen näherungsweise das von den Fahrern angestrebte Niveau. Der Verkehrsfluss ist nahezu frei.
C	Die Anwesenheit der übrigen Verkehrsteilnehmer macht sich deutlich bemerkbar. Die individuelle Bewegungsfreiheit ist eingeschränkt. Der Auslastungsgrad erreicht etwa 75%. Die Geschwindigkeiten sind nicht mehr frei wählbar. Der Verkehrszustand ist stabil.
D	Es treten ständige Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern auf, bis hin zu Konfliktsituationen und gegenseitigen Behinderungen. Der Auslastungsgrad ist hoch. Die Möglichkeiten der individuellen Geschwindigkeits- und Fahrstreifenwahl sind stark eingeschränkt. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
E	Die Kraftfahrzeuge bewegen sich weitgehend in Kolonnen. Der Auslastungsgrad ist sehr hoch. Bereits geringe oder kurzfristige Zunahmen der Verkehrsstärke können zu Staubildung und Stillstand führen. Es besteht die Gefahr eines Verkehrszusammenbruches bei kleinen Unregelmässigkeiten innerhalb des Verkehrsstromes. Der Zustand des Verkehrsflusses wechselt von der Stabilität zur Instabilität. Die Kapazität der Richtungsfahrbahn wird erreicht.
F	Das der Strecke zufließende Verkehrsaufkommen ist grösser als die Kapazität. Der Verkehr bricht zusammen, d.h. es kommt zu Stillstand und Stau im Wechsel mit Stop-and-go-Verkehr. Diese Situation löst sich erst nach einem deutlichen Rückgang der Verkehrsnachfrage wieder auf. Die Strecke ist überlastet.

Tab. 2.2.2.4: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs nach dem HBS [FGSV 2001]

Die Qualitätsstufen sind zunächst unabhängig von äusseren Umfeldbedingungen definiert. Wird jedoch beispielsweise eine Berechnung der Kapazität bzw. zulässiger Verkehrsstärken für einzelne Autobahnabschnitte und damit die Zuordnung zu einer Qualitätsstufe nach dem im Handbuch vorgeschlagenen Verfahren durchgeführt, muss berücksichtigt werden, dass die Grundlagen hierfür in Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagrammen liegen, die nur für die Umfeldbedingungen „hell“ (= Tageslicht) und „trocken“ (=Fahrbahnzustand) gelten; Umfeldbedingungen „dunkel“ und

„nass“ gehen durch Abminderungsfaktoren in das Verfahren ein. Insbesondere winterliche Umfeldbedingungen werden bislang nicht berücksichtigt.

Fazit:

Verkehrszustände hängen von der Fahrbahnbeschaffenheit, den Fahrern, den Fahrzeugen, der Verkehrszusammensetzung, der Verkehrsregelung und der Witterung ab. Zur Beschreibung von Verkehrszuständen wurden makroskopische und mikroskopische Verkehrsflussmodelle entwickelt. Die drei wesentlichen, den Verkehrsablauf charakterisierenden Parameter sind Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit. Wichtigste Schlüsse aus der Theorie des stationären Verkehrsflusses sind, dass mit zunehmender Verkehrsdichte die mittlere Geschwindigkeit sinkt und dass jenseits einer kritischen Verkehrsdichte die Verkehrsstärke mit weiter anwachsender Verkehrsdichte zurückgeht, d.h. die Verkehrsstärke eines Straßenquerschnitts ist begrenzt. Anschaulich dargestellt werden kann dieser Zusammenhang in Fundamentaldiagrammen. Unter dieser Voraussetzung ist die an einem Querschnitt auftretende Verkehrsstärke eine Funktion der Geschwindigkeit. Besitzt diese Funktion ein Maximum, so wird dies als Leistungsfähigkeit bezeichnet. In den Begriffsbestimmungen der FGSV [2000] wird die bisherige Beschreibung der Leistungsfähigkeit durch den Begriff Kapazität ersetzt; dieser wird im folgenden verwendet.

2.2.3 Verkehrsnachfrage, Verkehrsstärke und Kapazität

Die Kenntnis der Kapazität eines Strecken- oder Straßennetzes in Abhängigkeit von der Witterung ist bei der Beschreibung des Verkehrszustandes von entscheidender Bedeutung. Bei der Ermittlung der Kapazität besteht jedoch die grundlegende Schwierigkeit, dass häufig nur wenige empirische Daten vorliegen, die systematische Vergleiche zulassen. So ist man bei der Darstellung eines winterlichen Verkehrsgeschehens, das man nicht selbst am Orte erlebt hat, weitgehend auf Aussagen angewiesen, die zwangsläufig durch spezifische Perspektiven und Erwartungen mitgeprägt sind. Durch möglichst vielfältige Zeugnisse liesse sich dieser Mangel begrenzt vermindern. Da verkehrstechnische Messungen in der Regel nicht bei winterlichen Fahrbahnen durchgeführt werden, muss auch bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage, der Verkehrsstärken und der Kapazität im Winter häufig auf Quellen empirischer Untersuchungen anderer Jahreszeiten oder auf Modellrechnungen zurückgegriffen werden.

Verkehrsnachfrage

An Wintertagen nehmen in **Deutschland** nach DURTH / HANKE / LEVIN [1989a] die Verkehrsnachfrage (hier als DTV ermittelt) zwischen 7% (allgemeiner Durchschnitt an Dauerzählstellen „Montag bis Freitag“) und 15-17% („Samstag / Sonntag“) ab. Zeitweilig wurden aber auch Zunahmen zwischen 11 und 41% erfasst. Dieser Effekt wird mit der Verschiedenartigkeit der untersuchten Verkehrs- und Straßentypen, deren Lage im Netz und den damit zusammenhängenden Verlagerungseffekten erklärt. In einer späteren Untersuchung ermittelten DURTH / BARK / LEVIN / MATTHEß [1996] ebenfalls, dass der Rückgang der Verkehrsnachfrage bei Winterwitterung am Wochenende ausgeprägter als an Werktagen ist. Insgesamt ergab sich eine Abnahme der Verkehrsnachfrage an Werktagen zwischen 9 und 26%, an Samstagen von über 30% und an Sonntagen von über 40%.

In **Österreich** ergab eine Untersuchung von Schneefalltagen, dass der Schnee die Verkehrsnachfrage praktisch halbierte [SCHARSCHING 1988]. Eine im Jahre 1989 vom österreichischen KURATORIUM FÜR VERKEHRSSICHERHEIT, INSTITUT FÜR VERKEHRSTECHNIK UND UNFALLSTATISTIK auf Bundesstraßen und Autobahnen durchgeführte Untersuchung zeigte indessen, dass sich im Winterzeitraum, am Jahresdurchschnittswert gemessen, ein Rückgang der Verkehrsnachfrage bei trockenen Fahrbahnen um 14%, bei nassen um 22% und bei winterlichen Fahrbahnen um 33% ein-

stellt. Die Verkehrsnachfrage geht während der Wochentage Montag bis Freitag im Vergleich zum Gesamt-Jahresdurchschnitt bei trockenen Fahrbahnverhältnissen auf 91%, bei nassen auf 86% und bei winterlichen auf 75% zurück. Die an Samstagen, Sonn- und Feiertagen ermittelten Werte zeigten noch ausgeprägtere Rückgänge: bei trockenen Fahrbahnen auf 74%, bei nassen auf 64% und bei winterlichen Fahrbahnen auf 53%.

Untersuchungen über den Verkehrsablauf im Winter werden in **nordischen Ländern**, in den **USA** und **Japan** häufiger durchgeführt als in Mitteleuropa, da der Winter dort ausgeprägter ist und auch länger anhält als bei uns. Die Ergebnisse dieser Forschungen können nur bedingt auf unsere Verhältnisse übertragen werden. Schätzungen über den Rückgang der Verkehrsnachfrage bei Schnee liegen auch aus **England** und **Skandinavien** vor [ELLINGHAUS 1983]: danach führte Schnee in England zu einem Rückgang von etwa 16%, in den skandinavischen Ländern um 30%. In Schweden wurden bei den unterschiedlichen Fahrbahnbedingungen Eis, Schnee und trockene Fahrbahn im Winter keine Veränderungen in der Verkehrsnachfrage festgestellt [ÖBERG / GREGERSEN 1991, MÖLLER / WALLMAN / GREGERSEN 1991]. Im Winterverlauf und abhängig von Tageszeit und Woche wurden jedoch deutliche Schwankungen in der Pkw-Verkehrsnachfrage registriert. Diese lagen in einem Rückgang zwischen 3 und 30% (in Wintermitte) im Vergleich zwischen Beginn und Ende eines Winters. Auch GIAEVER [1993] schätzt einen Nachfragerückgang bei Schneefall um bis zu 20%; BLAKSTAD [1992] konnte einen Rückgang unter normalen winterlichen Bedingungen von 22% feststellen.

MC BRIDE [1978] untersuchte den Einfluss winterlicher Fahrbahnbedingungen auf die Verkehrsnachfrage in den **USA**. Zu Beginn der Untersuchung wurden die Anspruchsniveaus für den Winterdienst der einzelnen Bundesstaaten ermittelt, um Vergleiche durchführen zu können. Anschließend wurde die Verkehrsnachfrage ermittelt. Der Rückgang bei Winterwitterung lässt sich wie folgt beschreiben: Straßen mit Verkehrsbelastungen bis 2.000 Kfz/h haben Nachfragerückgänge von höchstens 22% (Rückgänge überwiegend zwischen 10 und 15%), Straßen mit Verkehrsbelastungen zwischen 2.000 und 4.000 Kfz/h haben Rückgänge zwischen 20 und 23% und Straßen mit Verkehrsbelastungen zwischen 4.000 und 6.000 Kfz/h ergaben Rückgänge in der Nachfrage von rd. 27%. Es lässt sich folgern, dass hochbelastete Straßen im Winter stärker gemieden werden.

Verkehrsstärke und Kapazität

Das Handbuch für die Bemessung von Straßen (HBS 2000) stellt die Längsneigung und die Fahrstreifenanzahl als massgebliche Größen dar, die maximale Verkehrsstärke bzw. die Kapazität bestimmen. Offensichtlich stehen diese Parameter in engem Zusammenhang mit der Verkehrsstärke und vor allem der Verkehrszusammensetzung (GV-Anteile). Tabelle 2.2.3.1 gibt die Kapazitäten der Autobahnstrecken mit Längsneigungen < 2% wieder; sie wurden aus empirischen Untersuchungen in **Deutschland** von BRILON / GROßMANN / BLANKE [1993] abgeleitet.

Geschwindigkeitsregelung und Lage der Strecken	Kapazität [Kfz/h] von Strecken mit geringen Längsneigungen (< 2%)					
	zweistreifige Richtungsfahrbahnen			dreistreifige Richtungsfahrbahnen		
	Lkw-Anteil [%]			Lkw-Anteil [%]		
	0	10	20	0	10	20
- ohne Geschwindigkeitsbeschränkung ...						
... innerhalb Ballungsraum	4.200	3.900	3.600	5.800	5.400	5.000
... ausserhalb Ballungsraum	3.600	3.500	3.400	5.400	5.100	4.800
- mit Geschwindigkeitsbeschränkung ...						
... innerhalb Ballungsraum	4.400	4.100	3.800	6.200	5.800	5.400
... ausserhalb Ballungsraum	3.800	3.700	3.600	5.800	5.500	5.200

Tab. 2.2.3.1: Empirisch ermittelte Kapazitäten nach dem HBS 2000 [Stand: Dezember 2000]

Eine von GRABE [1997] durchgeführte Auswertung von Dauerzählstellen ergab, dass für **deutsche Autobahnen** maximale Verkehrsstärken bzw. eine Kapazität von bis zu 2.000 Kfz/h und Fahrstreifen ein realistischer Wert ist, der sowohl für zweistreifige als auch für dreistreifige Richtungsfahrbahnen gilt.

Da die einzelnen Fahrstreifen ganz unterschiedliche Lkw-Anteile und damit deutlich differierende Kapazitäten haben, lag es nahe, Kapazitäten einer Richtungsfahrbahn als die Summe der Fahrstreifenkapazitäten zu bestimmen. Wird für den rechten Fahrstreifen ein GV-Anteil von 50%, für den linken ein solcher von 10% angenommen sowie bei dreistreifigen Richtungsfahrbahnen 10% für den mittleren und 0% für den linken, so ergeben sich nach GRABE [1997] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit unten aufgeführte simulierte Kapazitäten (Tab. 2.2.3.2). Die Werte stimmen gut mit den im Handbuch aus empirischen Erhebungen ermittelten Werten überein

V [km/h]	q 1 (= RFS) [Fz/h]	q 2 (= MFS) [Fz/h]	q 3 (= LFS) [Fz/h]	Σ q 1 + q 2 [Fz/h]	Σ q 1 + q 2 + q 3 [Fz/h]
60	1.665	2.001	2.099	3.666	5.765
70	1.645	1.962	2.052	3.607	5.659
80	1.608	1.908	1.990	3.516	5.506
90	1.561	1.845	1.922	3.406	5.328
100	1.509	1.780	1.852	3.289	5.141
110	1.455	1.714	1.782	3.169	4.951
120	1.402	1.650	1.714	3.052	4.766
130	1.350	1.588	1.649	2.938	4.587

Tab. 2.2.3.2: Simulierte Kapazitäten für unterschiedliche Geschwindigkeiten nach GRABE [1997]

Amerikanische Untersuchungen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen im Grenzbereich zwischen noch fließendem und bereits gestautem Verkehr ergaben maximale Verkehrsstärken von 5.500 bzw. 6.000 Fz/h [HALL / LAM 1988]. Dabei wurden auf allen Fahrstreifen rd. 2.000 Fz/h erfasst, so dass eine Zusammenfassung zu einem Querschnitt auf 6.000 Fz/h zulässig erscheint. AGYEMANG-DUAH / HALL [1991] untersuchten 52 Tage in den Spitzenstunden die Verkehrsstärken, die Fahrstreifenbelegungen und die Geschwindigkeiten auf einem Teilstück des Queen Elisabeth Way in Ontario (**Kanada**). Dabei konnte festgestellt werden, dass die maximal aufgetretenen Verkehrsstärken bei noch fließendem Verkehr zwischen 2.200 und rd. 2.300 Pkw/h je Fahrstreifen lagen.

Im Rahmen der Untersuchung zur Umnutzung von Standstreifen auf **deutschen Autobahnen** [ROHLOFF 2000] wurden auf dreistreifigen Streckenabschnitten mehr als 5.500 Kfz/h beobachtet; ähnlich hohe Verkehrsstärken ergaben Untersuchungen für Verkehrsplanungen zur EXPO 2000 in Hannover von SCHNÜLL / HOFFMANN / KLOPPE [1998 und 1999] und DAMMANN [2000].

Untersuchungen an hochbelasteten Stadtautobahnen in **Kanada** schätzen, dass maximale Verkehrsstärken zwischen 2.200 und 3.200 Fz/h je Fahrstreifen bewältigt werden können, bevor ein Stau auftritt [HURDLE / MERLO / ROBERTSON 1997]. Diese Werte sind ausgesprochen gross und übertreffen die in der deutschen Literatur veröffentlichten Kapazitäten. Sie konnten bislang auch nicht empirisch gestützt werden, wohl aber aus beobachteten Werten mit definierten und variierten Randbedingungen modelliert und statistisch abgesichert extrapoliert werden.

PONZLET [1996] untersuchte die Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Kapazitäten in **Deutschland** empirisch, wobei Vergleiche linearer q-v-Beziehungen für einzelne Tagesarten bei vergleichbaren Umfeldbedingungen durchgeführt wurden. Ergebnis dieser Vergleiche ist, dass für unterschiedliche Tagesarten auch unterschiedliche q-v-Beziehungen gelten, die jedoch an den einzelnen untersuchten Messquerschnitten erheblich variieren können. Aus einem Vergleich der

maximalen Verkehrsstärken ergeben bei Dunkelheit einen Rückgang um ca. 10%, bei Nässe und Helligkeit um ca. 15% und bei Nässe und Dunkelheit um ca. 30% (jeweils im Vergleich mit dem Zustand Hell und Trocken). Im Rahmen dieser Untersuchung wurden auch Datensätze untersucht, in denen mehr als 2 mm Niederschlag als Schnee innerhalb von 7 Stunden registriert wurde. Ausser einer erkannten Geschwindigkeitsreduzierung wurden keine Aussagen zur Kapazität getroffen.

Grundsätzlich kann aus qualitativen Beobachtungen abgeleitet werden, dass die Kapazität bei Winterglätte erheblich niedriger liegt als normal. DURTH / HANKE / LEVIN [1989a] schätzten, dass die Kapazität eines Fahrstreifens auf bis ein Drittel der „idealen Witterungsbedingungen“, also um zwei Drittel, zurückgeht. Geschwindigkeitsmessungen von DURTH / BARK / LEVIN / MATTHEß [1996] im Winter auf **deutschen** Autobahnen ergaben, dass zweistreifige Richtungsfahrbahnen vermutlich bereits bei einer Verkehrsstärke von 2.000 Kfz/h ihre Kapazität erreichen; dies entspricht einem Rückgang um 45% (Vergleichswert 3.600 Kfz/h).

Im Jahre 1994 untersuchten IBRAHIM / HALL Strecken mit hohen Verkehrsstärken in **Kanada** und speziell die Auswirkungen widriger Witterungsverhältnisse auf das Geschwindigkeitsverhalten und die Kapazität. Heftiger Schneefall verursachte im Vergleich zu trockenen Bedingungen eine Abnahme der maximalen Verkehrsstärken um bis zu 48%. Anzumerken ist, dass diese Ergebnisse sich nur auf zwei Messstellen gründen (Tab. 2.2.3.3) und somit nicht statistisch abgesichert sind.

	Messstelle A		Messstelle B	
	äusserst linker Fahrstreifen	Mittel aus allen drei Fahrstreifen	äusserst linker Fahrstreifen	Mittel aus allen drei Fahrstreifen
trockene Bedingungen				
- Verkehrsstärke [Kfz/h]	3.000	2.160	2.400	2.400
- Geschwindigkeit [km/h]	100	90	80	85
heftige Schneefälle				
- Verkehrsstärke [Kfz/h]	1.560	1.200	1.560	1.680
- Geschwindigkeit [km/h]	55	40	40	80

Tab. 2.2.3.3: Maximale Verkehrsstärken bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen nach IBRAHIM / HALL [1994]

Im Rahmen eines Projektes zur Ermittlung von Unfallraten im Winter wurde auch die Grösse des Rückgangs der maximalen Verkehrsstärken in vier **amerikanischen Bundesstaaten** ermittelt [HANBALI / KUEMMEL 1993]. Dafür dienten Messstellen, die vergleichbare Verkehrsbelastungen aufwiesen und mit gleicher Winterdienststrategie betreut wurden. Die an elf Messstellen durchgeführten Untersuchungen ergaben in Abhängigkeit von der Tageszeit, der Art der Straßenkategorie, dem Wetter- und Straßenzustand und dem Fahrerverhalten unterschiedliche Rückgänge der maximalen Verkehrsstärken. Für verschiedene Schneefallhöhen konnten an den Messstellen „winterliche Verkehrsbelastungen“ ermittelt und „Verkehrsbelastungen unter normalen Bedingungen“ gleicher Wochentage gegenübergestellt werden (Tab. 2.2.3.4). Es ist anzunehmen, dass die gemessenen „maximalen Verkehrsstärken“ wegen der unterschiedlichen Rückgänge aber eher die Verkehrsnachfrage als die Kapazität zeigen.

Schneefallhöhen	Rückgänge der maximalen Verkehrsstärken	
	werktags	sonn- und feiertags
< 2,5 cm	7 bis 17 %	19 bis 31 %
2,5 bis 7,5 cm	11 bis 25 %	30 bis 41 %
7,5 bis 15,0 cm	18 bis 43 %	39 bis 47 %

Tab. 2.2.3.4: Rückgänge der maximalen Verkehrsstärken bei Schneefall nach HANBALI / KUEMMEL [1993]

Fazit:

Unbestritten ist, dass im Winter i.d.R. eine geringere Verkehrsnachfrage als im Sommer herrscht. Dies ist zumindest an „wirklichen“ Wintertagen und für Innerortsstraßen der Fall, da die Verkehrsteilnehmer schon aus Sicherheitsgründen vom Pkw auf den Öffentlichen Personennahverkehr umsteigen oder Fahrten auch ganz unterlassen. Für Autobahnabschnitte trifft die Aussage nur bedingt zu, da z.B. an Werktagen viele Verkehrsteilnehmer durch Dienst- und Geschäftstätigkeit zur Fahrt gezwungen werden. An Wochenenden mit Winterwitterung geht jedoch hier die Verkehrsnachfrage besonders zurück. Auswirkungen der Winterwitterung auf die Kapazität liegen bislang nur als Schätzungen vor, in denen davon ausgegangen wird, dass die Kapazität um zwei Drittel zurückgeht. Kapazitäten ohne Winterwitterung können nach deutschen Literaturquellen unter günstigen Randbedingungen auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen mit bis zu 4.200 Kfz/h und auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen mit bis zu 6.200 Kfz/h angegeben werden; amerikanische Untersuchungen geben noch größere Kapazitäten an.

2.2.4 Mittlere Geschwindigkeiten

Gemessene Geschwindigkeiten sind lokal erfasste Größen, die für die Messwertanalyse in mittlere momentane Geschwindigkeiten umgerechnet werden können. Dies erfolgt mit hinreichender Genauigkeit wie folgt:

$$V_m = V_{lok} - (S_{lok}^2 / V_{lok})$$

mit: V_m = durchschnittliche momentane Geschwindigkeit [km/h]

V_{lok} = durchschnittliche lokale Geschwindigkeit [km/h]

S_{lok}^2 = quadrierte Standardabweichung der lokalen Geschwindigkeiten

Nach BRILON [1971] kann für Betrachtungen von Geschwindigkeiten auf Autobahnen, bei denen die räumlichen Gegebenheiten (Streckenführung, Steigungen etc.) innerhalb längerer Streckenabschnitte annähernd gleich bleiben und somit der Zustand der „Stationarität über den Weg“ [LEUTZBACH 1972] erreicht wird, die Umformung der lokalen Geschwindigkeiten in momentane Geschwindigkeiten als ausreichend angesehen werden. Die mittlere momentane Geschwindigkeit kann dann mit der mittleren Reisegeschwindigkeit gleichgesetzt werden.

Für Untersuchungen der Geschwindigkeiten im Winter sind Mittelwerte hinreichend genau. Ein Mittelwert vertritt eine statistische Gesamtheit umso besser, je geringer die Streuung der Einzelwerte ist, d.h. je homogener die Stichprobe ist [SCHLICHTER 1971]. Dies ist im Winter nicht immer der Fall; Vergleichsdaten stellen aber meist eine homogene Stichprobe dar. Ein Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten an Autobahnen mit unterschiedlicher Fahrstreifenanzahl ist zulässig, aber nur dann, wenn die einzelnen Fahrstreifen getrennt und die mittleren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von ihrer Verkehrsbelastung untersucht werden (also unabhängig von ihrer Lage im Querschnitt und unabhängig von den Überholmöglichkeiten). Daraus folgt, dass mittlere Fahrstreifengeschwindigkeiten unter o.g. Annahmen durchaus geeignet sind, Autobahnen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Fahrstreifen miteinander zu vergleichen.

HEIDEMANN / WIMBER [1994] beschreiben, dass sich das mittlere Geschwindigkeitsniveau in den letzten Jahrzehnten kaum verändert hat. Grundlage ihrer Untersuchung waren mittlere Pkw-Geschwindigkeiten der Dauerzählstellen auf **deutschen Autobahnen**, verteilt über den Jahresgang als Monatswerte. Aus Tab. 2.2.4.1 lässt sich ablesen, wie die mittleren Geschwindigkeiten in

den Wintermonaten absinken; besonders ausgeprägt sind die Rückgänge im Januar; bezogen auf einen Ganzjahres-Mittelwert von rd. 110 km/h beträgt der Rückgang etwa 11%.

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V _m [km/h]	98	102	109	112	113	114	113	115	113	112	110	104

Tab. 2.2.4.1: Mittlere Pkw-Geschwindigkeiten auf Autobahnen im Jahresgang nach HEIDEMANN / WIMBER [1994]

PONZLET [1996] ermittelte in seiner Untersuchung ebenfalls jahreszeitliche Einflüsse des Geschwindigkeitsverhaltens auf **deutschen Autobahnen**. Danach ist die einer bestimmten Verkehrsstärke zugeordnete Geschwindigkeit im Winter höher als im Sommer. Vereinfacht heisst das, dass bei vergleichbarer Verkehrssituation im Winter schneller gefahren wird als im Sommer. Diese Erkenntnis steht scheinbar im Widerspruch zu der Veröffentlichung von HEIDEMANN / WIMBER. Dort wurde festgestellt, dass im Sommer schneller gefahren wird als im Winter; von ihnen wurde jedoch der Einfluss des Tageslichts und des Wetters nicht berücksichtigt. Da es in den Sommermonaten mehr Stunden mit Umfeldbedingungen gibt, die schnelles Fahren ermöglichen, überwiegt bei der Analyse aller Messwerte der Einfluss des Tageslichts und verfälscht das Ergebnis.

Aufgabe **nordischer Untersuchungen** war herauszufinden, wie Winterwetter auf die Geschwindigkeitswahl wirkt [GIAEVER 1993, ENBERG / MANNAN 1998]. Festgestellt wurde, dass bei guten Winterbedingungen (trockene Fahrbahnen / kalte Lufttemperaturen / keine Niederschläge) die durchschnittlichen Geschwindigkeiten auf demselben Niveau wie im Sommer liegen. Regen oder Reifglätte haben geringen Einfluss; bei Schneefall gehen die mittleren Geschwindigkeiten um durchschnittlich 15% (entspricht 17 km/h) zurück. Nach ÖBERG / RAGNARSSON [1987] gehen die mittleren Geschwindigkeiten auf „glättegefährdeten“ Fahrbahnen gegenüber griffigen Fahrbahnen um 10 bis 15 km/h zurück, was etwa 20% entspricht. Frühere Untersuchungen von ÖBERG [1981] zeigen, dass die mittleren Geschwindigkeiten bei Winterglätte gegenüber Nässe um 7% (um 5 km/h von 82 km/h auf 77 km/h) abnehmen. WALLMAN / WRETTLING / ÖBERG [1997] beschreiben, dass die Pkw bei schneebedeckten Fahrbahnen mit mittleren Geschwindigkeiten von 75 bis 90% fahren, die auf schnee- und eisfreien Fahrbahnen gemessen werden; die Rückgänge liegen also zwischen 10 und 25%.

IBRAHIM / HALL [1994] stellten die in Tab. 2.2.4.2 aufgeführten mittleren Geschwindigkeitsrückgänge in **Kanada** fest (Tab. 2.2.4.2). Der Quelle kann auch entnommen werden, dass das Niederschlagsereignis starker Schneefall die grössten Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten hat (grösser als Starkregen), wo hingegen leichter Regen oder leichter Schneefall ähnlich geringe Auswirkungen haben. Also ist der Einfluss auch von der Stärke des Niederschlags abhängig. Dies liegt an den eingeschränkten Sichtweiten und der Grösse des Wasserfilms auf der Fahrbahn.

Vergleich von ...	Rückgang um ...
... trockenem mit regnerischen Bedingungen	... 1 bzw. 2 km/h
... regnerischen mit winterlichen Bedingungen	... 9 bis 50 km/h
... trockenem mit winterlichen Bedingungen	... 35 bis 50 km/h

Tab. 2.2.4.2: Geschwindigkeitsrückgänge bei unterschiedlichen Witterungszuständen nach IBRAHIM / HALL [1994]

MC BRIDE [1978] stellte Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Straßen-, Witterungs- und Verkehrszuständen in der **USA** zusammen (Tab. 2.2.4.3). Leider lassen sich seine prozentualen Reduktionen nicht direkt mit Geschwindigkeitswerten anderer Untersuchungen vergleichen.

Straßenzustand	Rückgänge ohne zähfließenden Verkehr [%]	Rückgänge bei zähfließendem Verkehr [%]
- trocken	0	16
- nass	0	16
- nass bei Schneefall	13	21
- nass bzw. Schneematsch	22	36
- Schneematsch / leichte Schneedecke	30	36
- leichte Schneedecke bei Schneefall	35	nicht erfasst
- festgefahrene Schneedecke bei Schneefall	42	nicht erfasst

Tab. 2.2.4.3: Prozentuale Geschwindigkeitsrückgänge bei unterschiedlichen Straßenzuständen nach MC BRIDE [1978]

In **Deutschland** wurden in den 80er und 90er Jahren Untersuchungen der mittleren Geschwindigkeiten im Winter von der TU Darmstadt durchgeführt. Bei Glätte gingen sie auf Autobahnen bis zu 40% zurück [DURTH / HANKE / NEUHOF 1983]. Nach Durchführung des Winterdienstes und bei Vorliegen gestreuter Fahrbahnen lagen die mittleren Geschwindigkeiten zwar über denen bei Glätte, allerdings immer noch knapp 10% unter den Nass-Werten. Eine spätere Untersuchung [DURTH / HANKE / LEVIN 1989] zeigte ähnliche Ergebnisse, nämlich Abnahmen bis zu 35%. An Steigungsstrecken mit Längsneigungen von über 4% ergaben sich bei unterschiedlicher Witterung Pkw-Geschwindigkeitsabnahmen von 15 bis 25% [DURTH / BARK / LEVIN / MATTHEß 1996]. Ebene Strecken wiesen folgende mittlere Geschwindigkeiten auf (Tab. 2.2.4.4):

Straßenzustand	V_{Pkw} [km/h]	V_{Gv} [km/h]
trocken	120	90
glatt	70	70
gestreut	95	80

Tab. 2.2.4.4: Mittlere Geschwindigkeiten nach DURTH ET AL. [1996]

MANGOLD [1996] konnte im Rahmen von Vergleichsmessungen auf der BAB A7 bei Kassel (unbeeinflusstes Fahren der Verkehrsteilnehmer) bei leichtem Schneefall oder Schneetreiben Geschwindigkeitsreduktionen von ca. 5 km/h (mittlere Pkw-Geschwindigkeiten) feststellen. Trotz Sichtbehinderungen und liegengebliebenem Schnee auf dem linken Fahrstreifen fielen die Abnahmen nur gering aus. Als Ursache wird mangelndes Gefahrenbewusstsein angeführt. Winterliche Fahrbahnzustände bei Dunkelheit wurden im Rahmen von Vergleichsmessungen nur über wenige Stunden erfasst. Dunkelheit hat aber wegen veränderter Fahrzeugkollektive (hier nächtlicher GV-Anteil von 73,5%, am Tage 17,4%) nur einen scheinbaren Einfluss auf die mittleren Geschwindigkeiten. Weder Pkw noch Lkw reagieren erkennbar auf die veränderten Verhältnisse; Lkw-Geschwindigkeiten steigen sogar geringfügig an. Zusätzlich wurden für unterschiedliche Umfeldbedingungen Summenhäufigkeitsdiagramme ermittelt: überlagerte Witterungseinflüsse weisen einen stärkeren Einfluss auf die mittleren Geschwindigkeiten auf als einzelne; die Kraftfahrer nehmen die Gefahr erst durch Kumulierung wahr und stellen dann ihre Fahrweise darauf ein.

Fazit:

Umfeldeinflüsse wie schwierige Witterungsbedingungen verursachen sinkende Geschwindigkeiten. Dabei hängt der Grad des Rückgangs von der Vertrautheit der Fahrer mit der angetroffenen Situation ab. Dunkelheit oder feuchte Fahrbahnen führen zu geringeren Geschwindigkeitsrückgängen als z.B. Schneetreiben. Eine Reaktion auf verkehrliche Problemsituationen mit zurückgehenden mittleren Geschwindigkeiten fällt deutlicher aus als die Reaktion auf die Witterung. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der unmittelbare Zwang, der durch dichten Verkehr entsteht, keinerlei oder zumindest kaum Spielraum für das Geschwindigkeitsverhalten lässt, während das alleinige Vorhandensein einer Gefahr durch die Witterung dem Kraftfahrer im Prinzip noch volle Handlungsfreiheit

lässt. Ein winterlicher Straßenzustand erlaubt nur erheblich niedrigere mittlere Geschwindigkeiten als trockene Fahrbahnen: die Rückgänge der mittleren Geschwindigkeiten liegen dann bei bis zu 40%. Nach Betreuung durch den Winterdienst werden regelmäßig wieder höhere mittlere Geschwindigkeiten gemessen. Das gilt für den Pkw- wie auch für den Güterverkehr (GV). Die mittleren Geschwindigkeiten der beiden Kollektive nähern sich bei winterlichen Straßenzuständen an, d.h. es findet eine Homogenisierung des Verkehrs statt.

2.2.5 Störungen und Zeitverluste

Störungen im Verkehrsablauf werden in Anlehnung an KELLER / HAMPE / SCHMICKL [1983] als „Auswirkung eines durch eine bestimmte Ursache ausgelösten Vorfalls“ definiert. Vereinfacht kann gesagt werden, dass Störungen im Verkehrsablauf in den meisten Fällen als Stau auftreten.

Bedingt durch die Witterung ändern sich die Umfeldbedingungen und damit die Kapazitäten einzelner Streckenabschnitte (vgl. Kap. 2.2.4). Bei geringen Verkehrsstärken besteht eine grosse Wahrscheinlichkeit, dass aus witterungsbedingten Vorfällen keine Staus entstehen; bei ungünstigeren Randbedingungen ist andererseits die Gefahr der Staubildung sehr gross. SPETH [1986] beschreibt, dass es mit Reduzierung der Geschwindigkeit bei entsprechenden Verkehrsbelastungen sehr schnell zu Stauungen oder Zusammenbrüchen des Verkehrs kommen kann.

SCHAECHTERLE ET AL. [1988] untersuchten Verkehrsstauungen auf Autobahnen und deren Auswirkungen. Auf ihrer 108 km langen Untersuchungsstrecke der Autobahn A8 zwischen Heimsheim und Ulm traten während der Untersuchung im Mittel täglich etwa drei Stauungen auf; zusammen wurden 87 Stauereignisse des Typs „Schnee- und Eisglätte“ mit einer mittleren Länge von 7,0 km und einer mittleren Dauer von 3,3 h ermittelt, zudem drei Extremereignisse mit Dauern von mehr als 5 Stunden und vier Ereignisse mit Längen von mehr als 10 km. Eine prozentuale Verteilung der Stauursachen in Abhängigkeit von der Staulänge der Typen „Schnee- und Eisglätte“ (insgesamt 2,1% aller Verkehrsstauungen) sowie „Starker Verkehr“ (insgesamt 5,7% aller Verkehrsstauungen) zeigt, dass diese Staus mit zunehmender Häufigkeit länger sind als andere (hier nicht aufgeführte) Stautypen (Tab. 2.2.5.1); in der Regel nimmt mit der Staulänge auch die Staudauer zu.

	Staulänge [km]					
	0,5	2,0	4,0	6,5	11,0	16,0
Schnee- und Eisglätte [%]	1	2	3	5	6	8
Starker Verkehr [%]	2	3	4	7	11	28
	Staudauer [h]					
	0,5	1,5	2,5	4,0	7,5	12,0
Schnee- und Eisglätte [%]	1	2	4	4	3	2
Starker Verkehr [%]	4	6	6	9	7	0

Tab. 2.2.5.1: Prozentuale Verteilung von Staulänge und Staudauer der Stautypen „Schnee- und Eisglätte“ und „Starker Verkehr“ nach SCHAECHTERLE ET AL. [1988]

Um ein Mass für die Behinderung durch Stau zu erhalten, wurde das Produkt aus Staulänge und Staudauer ermittelt und als Staumass bezeichnet (dargestellt in Tab. 2.2.5.2). Als Vergleichswert für unterschiedliche Stauursachen dient das relative mittlere Staumass über alle Stauereignisse mit dem Wert 1,0 [-]. Je nach Stauursache lag das relative Staumass zwischen 0,4 (Kfz-Panne, hier nicht aufgeführt) sowie 2,4 (Schnee- und Eisglätte) und 1,7 (starker Verkehr). Hieraus ist zu folgern, dass Schnee- und Eisglätte zu grossen Störungen führen: die grössten Staulängen wurden infolge Schnee- und Eisglätte **und** starkem Verkehr festgestellt. Der Grund hierfür liegt in der Ausdehnung der Niederschlagsfelder über Abschnitte mit zugleich hoher Verkehrsbelastung.

	abs. Staumass [km • h]	rel. Staumass [-]
Schnee- und Eisglätte	23,1	2,4
Starker Verkehr	16,3	1,7

Tab. 2.2.5.2: Absolutes und relatives Staumass der Stautypen „Schnee- und Eisglätte“ sowie „Starker Verkehr“ nach SCHAECHTERLE ET AL. [1988]

Im besonders strengen Winter 1981/82 war der Anteil der Staus durch Schnee- und Eisglätte auf dem untersuchten Abschnitt mit bis zu 70% sehr hoch. Zusammen mit den Staus durch starkes Verkehrsaufkommen wurden 90% aller Staus allein durch diese beiden Stauursachen ausgelöst. Die Ursache Schnee- und Eisglätte trat bereits bei geringen Verkehrsstärken unter 20.000 Kfz/24h auf. Starke Steigungs- und Gefällestrecken waren häufiger von Stauungen durch Schnee- und Eisglätte betroffen als Strecken in ebenem Gelände oder mit geringer Längsneigung.

Die Anzahl der von Störungen betroffenen Fahrzeuge hängt von der Fahrzeugdichte, der Staudauer und der mittleren Geschwindigkeit (sofern kein völliger Stillstand erreicht wird) ab. Für die mittlere Fahrzeugdichte im Stau kann nach SCHAECHTERLE ET AL. [1988] unter Berücksichtigung der Verkehrsmischung in erster Näherung von bis zu 100 Fahrzeugen je Fahrstreifen und Kilometer ausgegangen werden, wenn man berücksichtigt, dass in Teilabschnitten des betroffenen Bereiches gefahren wird und damit grössere Fahrzeugabstände auftreten als bei einer stehenden Fahrzeugkolonne. Die mittlere Geschwindigkeit eines den Stau durchfahrenden Fahrzeuges wird mit 4 km/h angenommen. Mit diesen Grundlagen errechnet sich die Zeit, die ein Fahrzeug für die Durchfahrt durch einen Stau benötigt, aus der Division der Staulänge durch die mittlere Geschwindigkeit. Eine Division der Staudauer durch diesen Wert gibt an, wie oft ein „völlig neuer Fahrzeugpulk“ im Stau steht. Die Anzahl betroffener Fahrzeuge je Fahrstreifen ist nicht von der Staulänge abhängig und berechnet sich nach der Formel:

$$\text{Anzahl der betroffenen Fahrzeuge} = \text{Fahrzeugdichte} \cdot \text{Staudauer} \cdot \text{Durchschnittsgeschwindigkeit}$$

Zur Ermittlung von Zeitverlusten wird die Grösse Fahrzeugstunden-Stau definiert. Sie gibt an, wie viele Fahrzeuge wie lange vom Stau betroffen sind. In erster Näherung wird davon ausgegangen, dass die massgebliche Staulänge etwa 75% der ermittelten Staulänge ist, da Stauaufbau und Stauauflösung überschläglich berücksichtigt werden müssen. Es ergibt sich unter Zuhilfenahme der oben berechneten Anzahl betroffener Fahrzeuge die Formel :

$$\text{Fahrzeugstunden-Stau} = 0,75 \cdot \text{Staulänge} \cdot \text{Staudauer} \cdot n \cdot \text{Fahrzeugdichte}$$

mit: n = Anzahl der vom Stau betroffenen Fahrstreifen

Probleme bei diesen Berechnungen bereitet die fehlende Kenntnis einer Fahrzeugdichte im Winter, da im Stauzustand die Verkehrsdichte und die mittlere Fahrgeschwindigkeit des betroffenen Streckenabschnittes von Bedeutung sind. HEIDEMANN [1989] quantifiziert aufgrund theoretischer Berechnungen die Verkehrsdichte und Verkehrsstärke für einen Stau in Abhängigkeit von einem GV-Anteil (Tab. 2.2.5.3); in der Praxis konnten diese Werte aufgrund von Stationaritäts- bzw. Korrelationsproblemen bei der Dichtebestimmung nicht nachgewiesen werden.

zweistreifige Abschnitte	Dichte [Kfz/km]	Verkehrsstärke [Kfz/h]	dreistreifige Abschnitte	Dichte [Kfz/km]	Verkehrsstärke [Kfz/h]
0% GV-Anteil	85	3.600	0 GV-Anteil	130	5.500
10% GV-Anteil	75	3.200	10% GV-Anteil	115	4.800
20% GV-Anteil	65	2.800	20% GV-Anteil	105	4.350

Tab. 2.2.5.3: Simulierte Verkehrsdichte in Abhängigkeit eines GV-Anteils nach HEIDEMANN [1989]

Nach GIESA [1974] ist Zeitmehrbedarf eine Zunahme des Zeitbedarfs beim Vergleich von Zeitbedarfswerten. Das bedeutet, dass für die gleiche Wegstrecke unter verschiedenen Witterungsbedingungen unterschiedlicher Zeitbedarf besteht. Liegen widrige Witterungszustände vor, so vergrößert sich der Zeitbedarf. Durch einen Sommer-Winter-Vergleich des Zeitbedarfs kann dann ein Zeitmehrbedarf bestimmt werden. Faktoren, die den Zeitbedarf beeinflussen können, sind entweder von der Straße (Linienführung, Querschnittsausbildung, Sichtweiten, Deckenzustand) oder vom Verkehr abhängig (Stärke und Zusammensetzung). Ausserdem kommen noch Faktoren wie klimatische Verhältnisse, Tageszeit, Verkehrsgesetzgebung, Fahrgewohnheiten und Eigenschaften der Verkehrsteilnehmer hinzu.

	V_{Pkw}	V_{Lkw}	Zeit(mehr)bedarf Pkw	Zeit(mehr)bedarf Lkw
	[km/h]	[km/h]	[min/Kfzkm]	[min/Kfzkm]
trocken	120	90	0,50	0,67
glatt	70	70	0,86	0,86
gestreut	95	80	0,63	0,75
Zeitmehrbedarf trocken - glatt			+0,36	+0,19
Zeitmehrbedarf glatt - gestreut			-0,23	-0,11

Tab. 2.2.5.4: Geschwindigkeiten und Zeitmehrbedarf im Winter nach DURTH / BARK / LEVIN / MATTHEß [1996]

DURTH / BARK / LEVIN / MATTHEß [1996] verwenden zur Bestimmung eines Zeitmehrbedarfs protokollierte Fahrbahnzustände sowie Geschwindigkeiten aus Induktionsschleifenmessungen. Sie kommen damit zu einem Zeitmehrbedarf von 0,36 min/Kfzkm (Pkw) und von 0,19 min/Kfzkm für den Güterverkehr. Nach einer Streuung durch den Winterdienst können die Zeitmehrbedarfswerte zum Teil wieder kompensiert werden. Das Ergebnis zeigt Tab. 2.2.5.4.

Fazit:

Störungen des Verkehrsablaufs im Winter treten in den meisten Fällen als Staus auf; ihre räumliche Länge und zeitliche Dauer übersteigt meist die der vergleichbaren nicht-winterlichen Störungen, da die auftretende Verkehrsnachfrage zumeist vergleichbar bei zugleich deutlich geringerer Kapazität ist. Starke Steigungs- und Gefällestrrecken sind häufiger von Störungen durch Schnee- und Eisglätte betroffen als Strecken in ebenem Gelände oder mit geringer Längsneigung. Wird die von der Störung betroffene Anzahl an Fahrzeugen ermittelt, lässt sich ein Zeitmehrbedarf berechnen. Probleme bereitet hierbei die fehlende Kenntnis einer Verkehrsdichte im Winter.

2.3 Massnahmen zur Verbesserung des Verkehrsablaufs im Winter

2.3.1 Allgemeines

Als wesentliche Massnahme zur Verbesserung des Verkehrsablaufs gilt, dass eine Veränderung der gesellschaftlichen Strukturen wirksamer und ökonomischer ist als die negativen Auswirkungen durch Verkehrsmanagement und den Einsatz von Technik zu optimieren. Die zunehmende Flexibilisierung von Arbeits-, Geschäfts-, Schul- und Urlaubszeiten, der Einkauf in elektronischen Supermärkten unabhängig von Öffnungszeiten usw. hilft Fahrten zu reduzieren und als Folge Staus zu vermeiden. Nach ABERLE [1998] lassen sich mit Koordinierungsmassnahmen durchaus Transportoptimierungen im Güterverkehr durchführen, Auslastungsgrade durch verbesserte Fahrzeuglogistik erhöhen, Fehllieferungen reduzieren sowie verkehrs- und produktionsgesteuerte Transportprozesse weiter begünstigen. Dazu wird in der Zukunft auch die Verbreitung der Informationstechnologie beitragen. Neben diesen eher politisch und nicht auf die besondere Situation des Verkehrs im Winter zgedachten möglichen Lösungen gibt es aber auch Massnahmen, die direkt der Stauvermeidung und der Verbesserung des Verkehrsflusses im Winter dienen können.

2.3.2 Wetter- und Winterdienst

Die verantwortlichen Stellen des Straßenwinterdienstes sehen sich heute vor die Forderung gestellt, dass der Winterdienst schneller und leistungsfähiger werden muss [SCHLUP 1994]. Leistungsfähig bedeutet in diesem Zusammenhang einen Winterdienst, der die Vermeidung von Unfällen und Störungen zu leisten vermag. Deshalb wurde in der Schweiz zu Beginn der 80er Jahre eine Untersuchung zur **generellen Leistungssteigerung im Winterdienst** durchgeführt. Die Analyse zeigt, dass Verbesserungen in den Bereichen Personal, Material, Fahrzeuge, Geräte und Verwaltungsaufwand nützlich sind. Im Bericht von SCHLUP wird vor allem auf Fragen der Organisation (Dringlichkeitsstufen, Standard, Bereitschaftsdienste), der Ausrüstung (Hilfsmittel, Fahrzeuge, Geräte) und der Infrastruktur (Taumittelsprühanlagen etc.) eingegangen. Neben modernen Hilfsmitteln wie Wetterradar und Straßenzustandserfassungssystemen (Glättemeldeanlagen) können auch die Infrastruktur (Taumittelsprühanlagen) und der Gehöfte (Ausstattung mit Hochsilos) zur Leistungssteigerung beitragen; alle fördern die Schnelligkeit des Winterdienstes.

Ein weithin unbestelltes Feld ist die **Personalschulung** [SCHLUP 1993], die sich nicht nur auf die staatlichen Winterdienste erstrecken sollte, sondern auch für Personal von Fremdfirmen gilt [GUTIERREZ-BOLIVAR / VILANOVA 1998]. Ausserdem müssen **Einsatzentscheidungen** für das Personal jederzeit und innerhalb kürzester Zeit getroffen werden können. Dafür ist der Einsatzleiter in den Nachtstunden über die Daten der Glättemeldeanlagen zu informieren. Mit der heutigen Technik ist es möglich, mit einem Notebook und Modem die Abfrage der aktuellen Sensorendaten auch von zu Hause aus durchzuführen [SCHLUP 1993]. Ein anderer Weg ist die Steuerung der Einsätze durch eine Winterdienstzentrale, wie es beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe seit dem Winter 1997/98 praktiziert wird [NIEBRÜGGE 1997, 1999].

Ferner ist der „**optimierte Winterdienst**“ [DURTH / HANKE 1983, 1987, 1989, HANKE 1989, LEVIN 1992) zu nennen. Hier werden Strecken mit besonderen Gefahrenpunkten (Steigungs- und Gefällestrecken) möglichst frühzeitig bedient; in einer Dringlichkeitsreihung der Strecken wird die Verkehrsstärke eines Abschnittes als das „absolut massgebende Kriterium“ [HANKE 1989] angesehen. Einsatzrouten können durch den Bau von weiteren Betriebsumfahrten und Winterdienststützpunkten verbessert werden [HAHN 1992]. Der Abstimmung des Winterdienstes an den Netzgrenzen kommt ebenfalls weitreichende Bedeutung zu, um hier zeitliche Lücken im Unterhaltungszustand zu vermeiden. Mittels GPS-Geräten können Winterdienstfahrzeuge durch den Einsatzleiter jederzeit geortet werden [KERANEN 1998]. Dies ist bei Umdispositionen gegenüber der Sprechfunktechnik von Vorteil; Mobil-Telefone bieten ähnliche Möglichkeiten.

Der flächendeckende Einsatz des **Straßenzustands- und Wetter-Informationssystems** SWIS, der Bau und die Einrichtung von **Glättemeldeanlagen** (GMA) und **Taumittelsprühanlagen** (TMS) [HAHN 1992] sowie **neueste Gerätetechnik** erhöhen ebenfalls die Leistungsfähigkeit des Winterdienstes. Auf Autobahnen kann an „neuralgischen Punkten“ [HANKE 1998c] auch der Einsatz von Kehrblasgeräten sinnvoll sein. Nach einem Bericht aus Japan werden **Temperaturmessungen** längs der Fahrbahn mittels Glasfaserkabel durchgeführt [SCHARSCHING 1998]. Bei diesem Verfahren wird ein Glasfaserkabel in der Fahrbahn verlegt. Dieses kann aufgrund der Rückstreuung von gepulstem Licht bis zu Distanzen von 30 km die Fahrbahntemperatur auf 1°C genau und einem Abstand von 1m messen. In Finnland werden Fahrbahntemperaturen nicht nur bei der **Thermal-kartierung** mit Spezialfahrzeugen aufgezeichnet, sondern auch durch die Einsatzfahrzeuge selbst, so dass der aktuelle Zustand immer bekannt ist, wenn Fahrzeuge im Einsatz sind [PILLI-SIHVOLA 1996]. Durch die permanente Datenerfassung [NIEBRÜGGE 1996, VKS 1993] kann der Winterdienst an den real vorliegenden Bedingungen ausgerichtet und dadurch weiter optimiert werden.

PANI / TROITSKY / TOTARO / KHAIKINE [1998] haben ein neues **System zur Bestimmung des Straßenoberflächenzustandes** entwickelt. Anders als bestehende Methoden an punktuellen meteorologischen Stationen eignet sich das System für den Gebrauch in fahrenden Kraftfahrzeugen. Mittels einer radiometrischen Kamera wird der Straßenoberflächenzustand der gesamten Fahrbahnbreite aufgenommen und in einem on-board-computer gespeichert. Der zugehörige Ort im Straßennetz wird über GPS-Empfänger bestimmt. Nach Abschluss der Messfahrt können die Daten mittels Datenträger einer Winterdienstzentrale übergeben werden. Wahlweise können die Daten zeitgleich während der Aufzeichnung über Funk (GSM) der Zentrale digital übermittelt werden. Mithilfe dieses Systems ist es möglich mit grosser Genauigkeit den Straßenzustand zu erfassen und die gefährdeten Stellen des Straßennetzes umgehend abzustreuen, sofern das System in einem Einsatzfahrzeug installiert ist.

RIEDL [1998] berichtet über ein japanisches **Glatteisvorhersage-System**. In Sapporo wird seit 1995 ein Konzept entwickelt, wie staatliche Winterdienstorganisationen und private Unternehmen Informationen **im Internet** austauschen und die Einsatzpläne koordinieren können. In Zukunft soll das System ausgeweitet werden, so dass auch Katastrophenhilfsdienste, Rettungsdienste, Fernseh- und Radiostationen Informationen über das Ausmass eines Winterereignisses bekommen können. In Finnland können seit 1996 alle erfassten Wetter-, Verkehrs- und Straßenzustandsdaten mittels modernster **Informationstechnologie** per TV, Video-Text, Radio, RDS-TMC, Internet, Telefon bzw. Mobiltelefon, Info-Terminals und Verkehrsmanagementanlagen an die Straßennutzer weitergegeben werden [PILLI-SIHVOLA 1996]. Der dänische Winterdienst wird von dem **Computer-programmsystem VINTERMAN** unterstützt [JAQUET 1994]. Es wurde entwickelt, um der Straßenunterhaltungsbehörde die Überwachung der Wetter- und Straßenzustandsbedingungen zu erleichtern, während der praktischen Einsätze Unterstützung zu bieten und die Arbeit der Rechnungserstellung zu übernehmen. Durch das Programmsystem werden ständig Informationen gesammelt und dem **Eiswarnsystem**, dem staatlichen **Wetterdienst**, einem **Wetterradarsystem** und dem **Straßenbetriebsdienstpersonal** zur Verfügung gestellt. Das Programm selbst kombiniert diese Daten, informiert die diensthabenden Personen und schlägt einen ständig aktualisierten Massnahmenplan vor.

2.3.3 Verkehrstechnik

Nach KRAUSE [1997] können Verkehrsbeeinflussungsanlagen massgeblich zur Stauvermeidung beitragen. Hauptanwendungsbereiche sind das frühzeitige Warnen vor Stau, schlechten Witterungsbedingungen und besonderen Ereignissen. Ausserdem wird bei hohen Verkehrsbelastungen der Verkehrsfluss durch flexible Geschwindigkeitsbeschränkungen harmonisiert.

In vielen Ländern arbeiten bereits automatisch betriebene und durch Wettersensoren gesteuerte Geschwindigkeitsbeeinflussungsanlagen und dynamische Informationstafeln. Hierdurch wird der Verkehrsfluss bei vielen Witterungsbedingungen weitgehend flüssig und sicher gesteuert. Bei extremen Witterungsbedingungen wird in Finnland beispielsweise ein Tempolimit von 80 km/h angezeigt, sonst dürfen im Winter generell nur 100 km/h gefahren werden [PILLI-SIHVOLA 1996]. Trotz deutlicher Erfolge ist die Verkehrsbeeinflussung kein Allheilmittel zur Lösung der Verkehrsprobleme im Winter. „So kann z.B. der Stau, der aufgrund von Witterung und Überlastung entsteht, zwar besser abgesichert, entschärft und verflüssigt werden, vollständig vermieden wird er dagegen nicht, sobald die Kapazität der Straße überschritten ist“ [KRAUSE 1997].

Aus Sicht von KNOFLACHER [1985] könnte zur Kompensation der Kapazitätsseinbußen eines Autobahnquerschnitts im Winter ein Tempolimit dienen. Kritische Bereiche könnten, weil „... ein Teil der Belastung durch nachgeordneten Winterdienst verringert wäre, intensiver betreut werden“. Die nachgeordnete Unterhaltung wird möglich, weil das Tempolimit Gefahrenstellen ausschliesst.

2.3.4 Besondere Massnahmen

Nach dem Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen - Teil: Winterdienst [FGSV 1997] gehören zu den erweiterten Massnahmen gegen Glätte eishemmende Fahrbahnbeläge und Fahrbahnheizungen. Beide Massnahmen wurden in den 60er und 70er Jahren zur Bekämpfung der Winterglätte entwickelt; heute werden sie jedoch aus einem gestiegenen Kosten- und Umweltbewusstsein kaum eingesetzt. Hinzu kommt, dass eishemmende Fahrbahnbeläge bei Nässe ggf. die Griffigkeit der Fahrbahn und damit die Verkehrssicherheit herabsetzen können.

Extreme Witterung kann auch zu unkonventionellen Lösungen führen. Aus den nordischen Ländern, ist bekannt, dass Straßensperrungen für eine bestimmte Dauer vorgenommen werden [GUSTAVSSON 1996, DANIELSON 1998] oder der Verkehr in Konvois durch wintergefährdete Abschnitte geleitet wird [LEIREN 1994]. Hier ist zu berücksichtigen, dass neben der Witterung auch das Verkehrsaufkommen ganz unterschiedlich zu dem der Bundesrepublik Deutschland ist. Zudem ist für Fahrzeuge, die im Winter alpine Topographie befahren, Winterausrüstung (Schneeketten und Winterreifen, Schaufel, Abschleppseil, Taschenlampe, ausreichendes Frostschutzmittel und vor Fahrtantritt ein voller Tank) gesetzlich vorgeschrieben. Es wird davor gewarnt, die Fahrzeuge im Falle eines Liegenbleibens zu verlassen. Dies dient der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer und auch dazu, den Verkehr nach einer Sperrung oder einem Stau schnell wieder in Gang zu bringen.

Ein anderer Weg könnte eine Winter-Maut darstellen. Diese wird nach REINHOLD [1997] abgeleitet: danach erscheint die Notwendigkeit einer Staumaut ausschliesslich für Strecken gegeben, die Kapazitätsengpässe aufweisen und die man aus Kostengründen nicht ausbauen kann. Zudem müsste eine Anfälligkeit der Strecke für Staus im Winter vorliegen. Als Vorschläge kommt eine der beiden folgenden Vorgehensweisen in Betracht: das Erheben einer grenzkostenspezifischen Maut, bei der jedes Fahrzeug individuell für die Kosten, die es anderen verursacht, bezahlen müsste oder das Festlegen einer pauschalen Maut, die so hoch sein müsste, dass kein Stau auftritt.

Fazit:

Maßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsablaufs im Winter lassen sich in gesellschaftspolitische Maßnahmen, in Maßnahmen für den Wetter- und Winterdienst, für die Verkehrstechnik und in besondere Maßnahmen einteilen. In der Literatur finden sich Anregungen, deren wirtschaftliche Auswirkungen aber meist nicht hinreichend untersucht wurden und bei denen es fraglich ist, ob sie überhaupt verwirklicht werden sollten; sie sind bislang ungenutztes Potential und hier als ein Beitrag zur Diskussion zu verstehen.

2.4 Folgerungen für die Arbeit

Die Auswertung der Literatur ergab, dass eine ausreichende Kenntnis der Besonderheiten des Verkehrs auf Autobahnen bei **Winterwitterung** bislang weitgehend fehlt, weil im gemässigten Klima in Deutschland im grössten Teil des Jahres mit schnee- und eisfreien Fahrbahnen gerechnet werden kann. Selbst an Wintertagen herrschen winterliche Fahrbahnzustände meist nur stundenweise vor; nur in extremen Situationen sind die Auswirkungen des Winters offenkundig.

Zustandsformen des Verkehrs bilden sich sowohl durch die vorliegenden Verkehrsstärken als auch durch die Witterung aus. **Rückgänge in der Verkehrsnachfrage** bei Winterwitterung wurden in mehreren Forschungsarbeiten beschrieben: die Angaben variieren von wenigen Prozent bis zu 40%, in Ausnahmen bis zu 50%. Zur besseren Übersicht wird die Quellenlage hierfür in **Anlage 2.4.1** zusätzlich noch einmal zusammengestellt dargestellt. Aus der Literatur können folgende vier Schlüsse gezogen werden:

- Der durchschnittliche Rückgang der Verkehrsnachfrage hängt von Intensität und Dauer der Winterereignisse ab.
- Der durchschnittliche Rückgang der Verkehrsnachfrage an Werktagen ist nicht so gross wie an Wochenenden.
- Der durchschnittliche Rückgang der Verkehrsnachfrage in Spitzenstunden ist nicht so gross wie ausserhalb der Spitzenstunden.
- Der durchschnittliche Rückgang der Verkehrsnachfrage in Spitzenstunden an Wochenenden ist nicht so gross wie in Spitzenstunden an Werktagen.

Kapazitäten unter Idealbedingungen (Helligkeit und trockene Fahrbahn) in aktuellen verkehrstechnischen Untersuchungen liegen Messwerte für deutsche Autobahnen von bis zu 2.200 Kfz/h und Fahrstreifen; für dreistreifige Richtungsfahrbahnen werden zwischen 5.800 und 6.200 Kfz/h angegeben. Über **Kapazitäten winterlicher Fahrbahnen** liegen nur Schätzungen vor; es werden Rückgänge zwischen 20 und 60% vermutet, die im Extremfall nur ein Drittel der Kapazität darstellen.

Die Auswertung der Literatur hat ferner gezeigt, dass es deutliche Unterschiede in der Erfassung und Bewertung der **Geschwindigkeitsrückgänge bei winterlichen Straßenzuständen** gibt. Dies hängt vermutlich vorrangig von Ziel und Art der Erhebungen ab; nachgeordnet von der Art der vorherrschenden Witterungszustände. Obendrein ist der Untersuchungsort von Bedeutung. Nordische Untersuchungen weisen die geringsten Rückgänge auf. Dies ist wohl auf die grosse Erfahrung der Verkehrsteilnehmer mit winterlichen Fahrbahnzuständen, die geringeren Verkehrsstärken und die immer noch weit verbreitete Ausrüstung der Fahrzeuge mit Spikesreifen zurückzuführen. In den USA bzw. in Deutschland variieren die Geschwindigkeiten dagegen deshalb sehr stark, da ungemein viele unterschiedliche Fahrbahnzustände wie z.B. „regennass mit Schneefall“, „schneebedeckt“, „schneeglatt“, „reifglatt“, „eisglatt“, „gestreut“ usw. auftreten können.

Wie zu erwarten wirken sich glatte Fahrbahnen am stärksten auf die mittleren Geschwindigkeiten aus, da hier die reduzierte Griffigkeit zu einer langsameren Fahrweise zwingt. Die Geschwindigkeitsrückgänge liegen für den Pkw-Verkehr bei bis zu 40%, was - bei Annahme eines nicht-winterlichen mittleren Geschwindigkeitsniveaus von ca. 120 km/h - etwa 50 km/h entspricht.

Andere Fahrbahn- bzw. Witterungszustände haben geringere Auswirkungen (die Rückgänge liegen zwischen 15 und 27%). Es zeigt sich, dass der Güterverkehr bei winterlichen Fahrbahnzuständen nur selten langsamer fährt; zusammen mit der geringeren Verkehrsnachfrage nachts wird dem Güterverkehr freiere Fahrt gewährt. Zur Übersicht über die unterschiedlichen Ergebnisse bisheriger Untersuchungen wird die Quellenlage nochmals in **Anlage 2.4.2** dargestellt.

In der Literatur gibt es nur wenige Quellen zur Ermittlung von **winterlich bedingten Zeitverlusten**. Die von DURTH / HANKE / LEVIN [1989a] und DURTH / BARK / LEVIN / MATTHEß [1996] durchgeführten Untersuchungen zur Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes können Zeitverluste aus verminderten Geschwindigkeiten quantifizieren. Die Berücksichtigung **winterlich bedingter Störungen** fehlt hingegen in der Literatur bislang.

Massnahmen zur Verbesserung des Verkehrsablaufes im Winter werden in der Literatur vorrangig durch einen optimierten und damit effektiven und effizienten Wetter- und Winterdienst gesehen. Es ist jedoch zu bezweifeln, ob organisatorische Massnahmen allein für grosse Verkehrsstärken ausreichen und nicht weitergehende Massnahmen zu fordern sind. Zur Begründung und Rechtfertigung dieser sind Grundlagen erforderlich, die mit dieser Arbeit geschaffen werden sollen.