

2 Stand der Technik und Forschung

Nachfolgend wird der gegenwärtige Stand der Technik hinsichtlich der Untersuchung und Simulation der Kraftfahrzeugverschmutzung skizziert. Zuallererst werden die in der Fachliteratur verwendeten und etablierten Definitionen sowie die charakteristischen Parameter eingeführt und erläutert. Anschließend werden empirische Ansätze zu den grundlegenden Randbedingungen wie Tropfendynamik, Tropfen-Wand-Interaktion und Wandfilmmodellierung angeführt. Aufgrund der hinzugekommenen Möglichkeit, numerische Strömungssimulationen mit parallelisierten Großrechnern durchzuführen, werden auch numerische Ansätze zur Simulation der Kraftfahrzeugverschmutzung vorgestellt. Anschließend soll auf die experimentellen Ansätze zur Untersuchung der Kraftfahrzeugverschmutzung und deren Fortschritt eingegangen werden.

2.1 Verschmutzungsmechanismen an Fahrzeugen

Die Fahrzeugverschmutzung wird durch den Eintrag von Wasser und dem ggf. mittransportierten Schmutz verursacht. Generell kann die Verschmutzung durch feste (Staub etc.) und flüssige (z. B. Regen) Partikeln verursacht werden. Da der Fokus im Folgenden auf der Verschmutzung durch Flüssigkeiten liegt (Regen, nasse Fahrbahn), wird im Weiteren von einem Nässeeintrag ausgegangen, wobei es sich hierbei in der Regel um Wasser-Schmutz-Gemische handelt, die sich nach *Lingman* [6] im Winter in Form von Salzlaken besonders kritisch für die Eigenschaften von Scheibenbremsen erweisen. Basierend auf den Definitionen von *Pott-hoff* [7] am FKFS in den frühen 70er Jahren kann die Fahrzeugverschmutzung in Eigen- und Fremdverschmutzung aufgeteilt werden. Die hinsichtlich der Kraftfahrzeugverschmutzung relevanten Bereiche werden in Abbildung 1 näher erläutert.

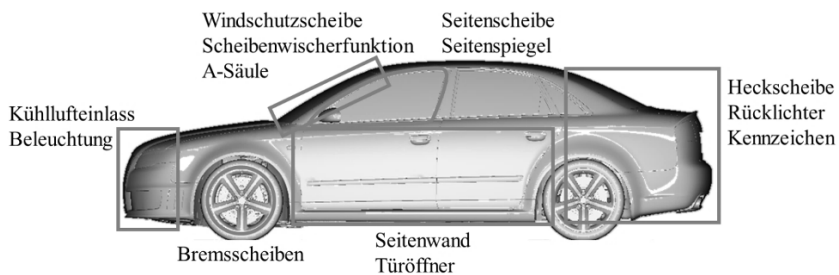


Abbildung 1: Kritische Bereiche hinsichtlich Kraftfahrzeugverschmutzung

Hierbei handelt es sich um die vordere Beleuchtung und die Kühllufteinlässe, Bereiche der Windschutzscheibe sowie den Scheibenwischbereich, die A-Säule, die Seitenscheibe mit Seitenspiegel, die Seitenwand des Türbereichs inklusive der Türöffner und Dichtungen sowie das Fahrzeugheck mit Rückscheibe, Beleuchtung und Kennzeichen.

2.1.1 Eigenverschmutzung

Die Eigenverschmutzung resultiert aus der Raddrehung im Zusammenspiel mit der nassen Fahrbahn ohne jeglichen Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer. Dieser Vorgang kann in mehrere Teilbereiche zerlegt werden. Einerseits wird das Wasser durch den Reifen nach vorne und zu den Seiten hin verdrängt. Andererseits wird das auf der Fahrbahn befindliche Wasser durch Adhäsionskräfte vom Reifen aufgenommen und – sobald die Fliehkräfte am rotierenden Rad die Adhäsionskräfte übersteigen – tangential abgesprüht. Die im Radhaus emittierten Tröpfchen können, wenn ihr Durchmesser hinreichend klein ist, gut der Strömung folgen. Die Bahn größerer Tröpfchen wird im Wesentlichen durch das Wechselspiel zwischen Strömungs- und Trägheitskräften bestimmt, das typischerweise nach einer bestimmten Laufstrecke zum Zerplatzen der abgesprühten Tröpfchen und damit zur Bildung von Sekundärtropfen führt. Dieser Prozess wird nach *Pilch und Erdman* [8] durch die Weber-Zahl beschrieben und wird im Kapitel 2.3.1 näher erläutert. Weiterhin bilden sich beim Aufprall der Tröpfchen im Radhaus Sekundärtropfen, die aufgrund ihrer geringen Trägheit der Strömung aus dem Radkasten heraus folgen können. Diese Vorgänge werden in der Literatur üblicherweise als Splash und Spray bezeichnet.

Splash steht hierbei für die größeren, abgesprühten Tropfen, die aufgrund Ihrer Masse eine große Trägheit besitzen und deren Flugbahn als ballistisch bezeichnet werden kann. Das von Kraftfahrzeugen erzeugte Splash hat keinen großen Einfluss auf die sicherheitsrelevante Verschmutzung des Fahrersichtfelds der hinterherfahrenden Fahrzeuge, da diese Tropfen generell in Bodennähe bleiben.

Spray setzt sich wiederum aus den kleineren Tröpfchen zusammen, die sich aufgrund ihrer geringen Masse und der damit verbundenen, geringen Trägheit lange in der Umströmung und im Nachlauf des Kraftfahrzeugs halten können. Sehr kleine Tropfen können sogar zu Nebelbildung führen. Spray lässt sich gemäß *NHTSA* [16] grundsätzlich auf drei wesentliche Elemente zurückführen:

- Wasser
- Eine Oberfläche, die mit diesem Wasser in Kontakt kommt
- Eine turbulente Umströmung, die Wasser aufnimmt und mitführt

Das sich in der Luft befindliche Wasser wird von der turbulenten Umströmung des Fahrzeugs mitgenommen und kann die Oberfläche des Kraftfahrzeugs benetzen. Die Seitenwand und der hintere Teil des Kraftfahrzeugs sind hinsichtlich Eigenverschmutzung sehr gefährdet. Nach *Potthoff* [7] lässt sich die Verschmutzung der Seitenwand auf Spray Phänomene zurückführen, die Verschmutzung des hinteren Fahrzeugbereichs auf Splash Phänomene.

2.1.2 Fremdverschmutzung

Die Fremdverschmutzung wird durch das Wasser verursacht, das von vorausfahrenden Fahrzeugen aufgewirbelt wurde, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben. Die Fahrzeuganströmung ist in diesem Fall mit Tropfen beladen, die an nachfolgenden Fahrzeugen zu unterschiedlichen Verschmutzungsbildern führen. Wenn diese Tropfen auf eine Fahrzeugoberfläche treffen, können sie an dieser entweder haften bleiben oder beim Aufprall zerplatzen und so Tochtertropfen (Sekundärtropfen) bilden, die sich zum Teil wieder von der Oberfläche lösen.

Die auf der Fahrzeugoberfläche verbleibenden Tropfen akkumulieren zu Rinnsalen, die im Zusammenspiel von Schwerkraft und Umströmung über die Oberfläche getrieben werden. Dies führt im ersten Schritt zur Verschmutzung der Lichtanlage sowie der Windschutzscheibe. Das auf dem Fahrzeug haftende Wasser wird aufgrund der durch die turbulente Strömung auftretenden Scherkräfte an der Oberfläche in Richtung der A-Säule und über das Dach transportiert. Daraus resultiert die Verschmutzung der Seiten- sowie der Heckscheibe. Das Wasser, das sich in Richtung der Seitenscheibe bewegt, kann über die A-Säule rinnen, falls keine adäquaten Gegenmaßnahmen, wie eine Wasserfangleiste, getroffen wurden. An der Kante zur Seitenscheibe kann dieses Wasser dann durch den A-Säulenwirbel über die Seitenscheibe hinweg bewegt werden, was zu einer Reduzierung der Sicht durch die Seitenscheibe und auf den Seitenspiegel führt. Die Verschmutzung der Seitenspiegeloberfläche kann auf die Tröpfchen in der Umströmung des Fahrzeugs sowie auf das Ablösen von Tröpfchen an den Kanten des Seitenspiegels zurückgeführt werden.

Weitere verschmutzungsrelevante Bereiche beim Kraftfahrzeug sind die Kühllufteinlässe und Kühlkanäle des Fahrzeugs, über die Wasser in den Ansaugtrakt des Motors gelangen kann. Dies könnte zu einer Erhöhung der Schadstoffemissionen sowie zu einer Beeinflussung der Leistungsentfaltung des Motors führen. Ebenso sind sicherheitsrelevante Baugruppen, wie die Bremsanlage, dem Eintrag von Wasser ausgesetzt, was aufgrund eines Wasserfilms auf der Bremscheibe zu gefährlichem Nässefading führen kann (vgl. *Spruss et al.* [17]).

Für die Untersuchung der Fremdverschmutzung ist die Oberflächenbeschaffenheit der zu untersuchenden Geometrie von entscheidender Bedeutung. Die Oberflächenspannung und der Kontaktwinkel eines Tropfens auf einer Oberfläche sind stark von deren Oberflächenbeschaffenheit abhängig und haben somit entscheidenden Einfluss auf die Bewegung von Tropfen und Rinnsalen auf der Fahrzeugoberfläche. In Abbildung 2 zeigt *Spruss* [18] eine Fahrzeug-

oberfläche mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung. Hierbei wurde zur Visualisierung ein Wasser-Fluoreszenzmittel-Gemisch unter UV-Beleuchtung eingesetzt. Die Anströmgeschwindigkeit sowie der Wasservolumenstrom sind in allen drei Fällen konstant.

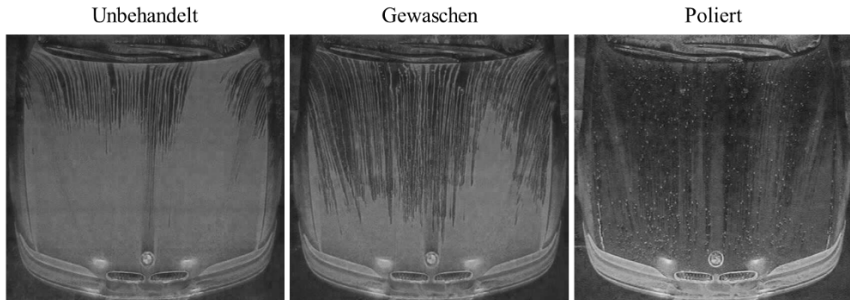


Abbildung 2: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Fließverhalten von Wasser

Die Oberflächenbeschaffenheit wurde hierbei stark variiert: Links dargestellt ist das Fließverhalten auf einer Oberfläche, die 1200 km im Straßenverkehr Regen wie auch Schnee ausgesetzt war. Es ist erkennbar, dass sich ein fast geschlossener Wandfilm auf der Oberfläche bildet. Mittig ist diese Oberfläche mit Waschmittel gereinigt worden, was zu einem weniger geschlossenen Wandfilm mit Rinnsal-Auslösungen führt. Rechts wurde die Oberfläche mit Waschmittel gereinigt und hinterher mit Wachs poliert. Aufgrund der Oberflächenbehandlung wird eine Wandfilmbildung nahezu unterbunden und das Wasser bewegt sich größtenteils in Tropfenform über die Oberfläche.

Für die Untersuchung der Fremdverschmutzung ist daher eine gleichbleibende Oberflächenbeschaffenheit als Versuchsrandbedingung notwendig, um reproduzierbare Versuchsergebnisse zu garantieren.

2.2 Experimentelle Ansätze zur Untersuchung der Fahrzeugverschmutzung

Nachfolgend werden die gegenwärtig in der Kraftfahrzeugentwicklung üblichen, experimentellen Ansätze zur Untersuchung der Fahrzeugverschmutzung skizziert. Darauf folgend wird auf die Visualisierung der Verschmutzung auf der Fahrzeugoberfläche eingegangen, wobei die zwei gängigsten Methoden näher vorgestellt werden. Im Anschluss werden die Herangehensweisen zur Untersuchung der kritischen Bereiche hinsichtlich der Kraftfahrzeugverschmutzung entsprechend der Eigen- und Fremdverschmutzungsdefinition näher erläutert sowie auf Spezialfälle eingegangen.

2.2.1 Optische Erfassung der Verschmutzung mit Kreideschlamm

1974 stellte *Potthoff* [7] ein Verfahren zur quantitativen Darstellung der Schmutzauftragung an Kraftfahrzeugen im FKFS Fahrzeugwindkanal vor. Hierbei wurde die Beaufschlagung des Fahrzeugs mit Schmutz durch das Aussprühen von in Wasser aufgeschlämmten Zusätzen wie Kreide oder ungeleimten Farbpulvern realisiert. Entsprechend der Versuchszeit sowie den geometrischen Abmaßen des Fahrzeugs wurden im Windkanal Flüssigkeitsmengen einer 12 %-igen Kreideaufschlämmung ausgesprüht, die das zu untersuchende Fahrzeug entsprechend benetzten. Nach Abtrocknung des auf dem Fahrzeug niedergeschlagenen Kreidesediments wurden die benetzten Zonen fotografisch dokumentiert. Die Auswertung des erhaltenen Schmutzauftrags erfolgte unter den Gesichtspunkten der Größe der verschmutzten Fläche, ihrer Lage und der örtlichen Verschmutzungsdichte. Drei Messverfahren wurden zur Beurteilung des letzten Punkts vorgestellt. Das erste Verfahren beruhte auf der fotoelektrischen Vermessung der infolge des Schmutzauftrags eintretenden Änderung der Leuchtdichte von Beleuchtungseinrichtungen im Durchlicht. Einen zweiten Ansatz stellte die fotoelektrische Vermessung der infolge der Verschmutzung auf Glas- und Blechteilen eingetretenen Änderung der reflektierenden Lichtmenge dar. Unter Zuhilfenahme eines Bosch-Dieselauchtesters konnte eine Bewertung über eine einfach zu kalibrierende Verschmutzungsziffer durchgeführt werden. Diese beiden Methoden lieferten bei Leuchten und Fensterscheiben objektive Aussagen bezüglich des optischen Verschmutzungseindrucks. Eine dritte Methode war die Bestimmung des auf einer Flächeneinheit niedergeschlagenen Kreidengewichts nach vorausgegangener Ofentrocknung. Diese gravimetrische Methode konnte eine absolute Beurteilung der Stärke der Schmutzablagerungen liefern. Unerwünschter Nebeneffekt dieser Verschmutzungsuntersuchung war, dass eine erhebliche Verschmutzung des Prüfstands in Kauf genommen werden musste. Insbesondere bei Prüfständen mit geschlossener Luftführung war dies kritisch.

2.2.2 Optische Erfassung der Verschmutzung mit Fluoreszenzmittel

Aufgrund der oben genannten Nachteile des Untersuchungsverfahrens durch das Einbringen von Kreideschlamm kommt heute dieser Ansatz nur noch vereinzelt zur Anwendung. Ein weitaus fortschrittlicherer und wirtschaftlicherer Ansatz zur Visualisierung der Fahrzeugverschmutzung ist die Untersuchung über einen beigemischten Tracer auf Flüssigkeitsbasis, der fluoreszierende Eigenschaft hat. Dieser Ansatz bringt die Vorteile mit sich, dass er keine intensive und zeitaufwendige Reinigung des untersuchten Fahrzeugs, des gesamten Prüfstands sowie der Luftführung benötigt. Weiterhin ist der Einfluss eines flüssigen Tracers auf das Fließverhalten des Wassers geringer, als eine Mischung mit festen Partikeln, wie es bei Kreideschlamm der Fall ist. Das mit dem fluoreszierenden Tracer angesetzte Wasser wird mit ei-

ner entsprechenden Lichtquelle angeregt, was ein Emittieren der eingebrachten Energie (UV-Licht) und somit ein Leuchten verursacht. Das auf der Fahrzeugoberfläche befindliche, leuchtende Wasser wird über ein Foto oder ein Video festgehalten und kann hinterher ausgewertet werden. Um den höchstmöglichen Kontrast zwischen Tracer und Fahrzeug zu gewährleisten, sollten diese Untersuchungen in möglichst dunkler Umgebung durchgeführt werden.

2.2.3 Analyse der Verschmutzung mit DiVeAn®

Im IVK Thermowindkanal wird bei Verschmutzungsuntersuchungen dem Wasser zur Visualisierung, wie oben beschrieben, ein bestimmter Volumenprozentsatz eines Fluoreszenzmittels, (hier UVITEX 2BT, flüssig) zugesetzt. Dieses Fluoreszenzmittel hat die Eigenschaft, dass es in einem Wellenlängenbereich von 350-380 nm Licht absorbiert und die absorbierte Energie im Wellenlängenbereich von 420-470 nm wieder emittiert. Das Gemisch aus Wasser und UVITEX 2BT, flüssig wird aufgrund der oben genannten Merkmale mit kurzwelligem UV-Licht im Bereich von ca. 365 nm angeregt, woraufhin eine hin zu längeren Wellenlängen frequenzverschobene Emission des Fluoreszenzsignals erfolgt (vgl. *Milde* [19]).

Über Fotografie oder Video kann jeder beliebige Zeitpunkt eines Verschmutzungsexperiments im Thermowindkanal festgehalten werden. Zur Auswertung der ermittelten Fotografien und Videos wird im Thermowindkanal seit 2001 die am FKFS entwickelte Bildverarbeitungssoftware DiVeAn® zur digitalen Verschmutzungs-Analyse verschmutzter Flächen am Fahrzeug verwendet (vgl. *Widdecke et al.* [20]). Dieses Verfahren analysiert den Grauwert eines digitalen Bildes bzw. eines Einzelbildes einer Filmsequenz hinsichtlich der Farbintensität eines einzelnen RGB-Farbkanals der Grundfarben rot, grün und blau. Aufgrund der Beleuchtung mit ultravioletter Licht wird bei diesem Ansatz der blaue Farbkanal für die Auswertung herangezogen, da das Fluoreszenzmittel die Eigenschaft hat, die aus dem UV-Licht absorbierte Energie hauptsächlich im blauem Farbspektrum zu remittieren. Durch eine 8-Bit-Diskretisierung des Grauwerts können somit 256 unterschiedliche Verschmutzungsstufen realisiert werden. Um belastbare Aussagen über die verschmutzte Oberfläche treffen zu können, wurden zwei Bewertungsvariablen eingeführt:

Der dimensionslose „Average Contamination Factor“ \overline{CF} dient der quantitativen Beschreibung der Fahrzeugverschmutzung, indem die mögliche Benetzung mit Schmutz zwischen unverschmutztem und maximal verschmutztem Zustand in 256 Stufen diskretisiert wird. Hierfür wird jedes Pixel i in seine RGB-Bestandteile zerlegt und der Grauwert des blauen Farbkanals (CF_i) für den gesamten, interessierenden Bereich des Bildes aufsummiert sowie der Mittelwert errechnet, siehe Gleichung 2.1. Mit dem \overline{CF} lässt sich die durchschnittliche Leuchtintensität des interessierenden Bereichs beschreiben.

$$\overline{CF} = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Mit der Einführung des „Verschmutzungsgrads“ (VG) lässt sich die benetzte Fläche bezogen auf die Gesamtfläche des für die Verschmutzung relevanten Bereichs prozentual ermitteln. Durch einen zusätzlichen Filterwert (FW) kann darüber hinaus definiert werden, ab welcher Leuchtintensität eines Pixels dieses als verschmutzt bzw. als sauber definiert wird, siehe Gleichung 2.2.

$$VG = \frac{\sum_{i=1}^n (Pixel\ i \mid (CF_i > FW)) \cdot 100\%}{n} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Zur Visualisierung wird die mit der fluoreszierenden Flüssigkeit benetzte Fläche im Untersuchungsbereich mit einer Falschfarbenskala eingefärbt, um die Verschmutzung auf der Oberfläche deutlicher hervorzuheben. Hierbei werden alle nichtrelevanten Pixel, die einen Grauwert unterhalb des Filterwerts haben, durchsichtig dargestellt, alle Pixel mit einem Grauwert oberhalb des Filterwerts entsprechend der eingeführten Farbskala. Ein Beispiel für diese Visualisierung, die Farbskala sowie der Filterwert sind in Abbildung 3 dargestellt.

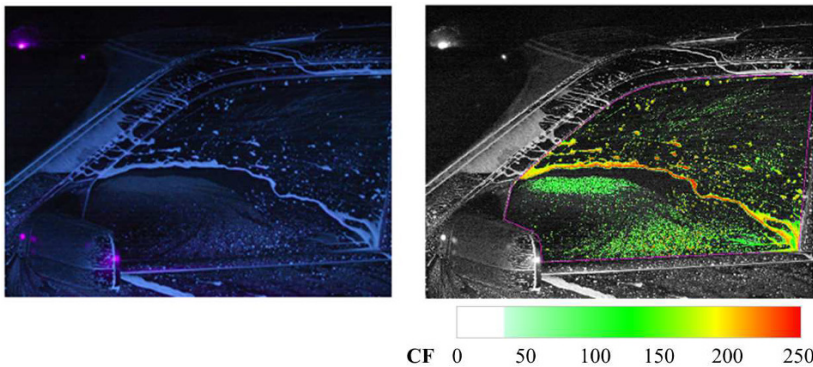


Abbildung 3: DiVeAn®-Auswertung einer benetzten Seitenscheibe, links das ursprüngliche Bild unter UV-Beleuchtung, rechts das mit DiVeAn® ausgewertete Bild sowie die Darstellung der Falschfarbenskala mit Filterwert.

2.2.4 Experimentelle Untersuchung der Eigenverschmutzung

Die Untersuchung der Eigenverschmutzung am Kraftfahrzeug findet trotz immer fortschrittlicherer Simulationsmöglichkeiten nach wie vor hauptsächlich experimentell im Fahrversuch, auf einem Prüfstand oder in einem Windkanal statt.

Vorreiter in diesem Untersuchungsfeld war *Koessler et al.* [21, 22] (1965), der vor allem das Absprühverhalten am freistehenden, rotierenden Rad wie auch die Wirksamkeit von Kotflügeln im Fokus seiner Forschung hatte. Diese Untersuchungen erfolgten über Prüfstandsversuche mit kontrollierbaren Versuchsbedingungen sowie mit Fahrversuchen an Personenkraftwagen und Lastkraftwagen. Die Prüfstandsversuche wurden bei den von Koessler untersuchten Konfigurationen mit einem Modellrad mit einem Durchmesser von 220 mm durchgeführt. Weiterhin wurde die Radrotation durch die Verwendung eines endlosen, aufgerauten Gummilaufbands realisiert, der über einen Elektromotor angetrieben wurde. Das Band war unterhalb der Aufstandsfläche des Modellrades durch eine Modellrolle gleicher Bauart wie das Modellrad unterstützt, wodurch sich eine ebene Latschfläche erreichen ließ. Das Band wurde vor dem Reifenlatsch gleichmäßig mit Wasser benetzt. Zur Erzeugung der Anströmung des Modellrades wurde ein Gebläse eingesetzt.

Pothoff [7] stellte 1974 ein neues Verfahren zur Untersuchung der Fahrzeugeigenverschmutzung vor. Hierbei handelte es sich um eine Methode für die experimentelle Untersuchung der Verschmutzung an Fahrzeugen im Maßstab 1:1 im ehemaligen FKFS Windkanal in Untertürkheim. Aufgrund fehlender Raddrehseinheiten musste der Absprühvorgang am Reifen mit verschiedenen Düsensätzen simuliert werden. Hierbei handelte es sich um vier im Absprühwinkel variierebare Keildüsensätze, die unmittelbar hinter der Radaufstandsfläche angebracht wurden sowie vier Tangentialdüsensätze, die am Radumfang montiert waren. Als Tracer wurde bei diesen Untersuchungen eine Wasser-Kreide-Suspension eingesetzt, die in [Kapitel 2.2.1](#) bereits vorgestellt wurde.

Der Einfluss der Raddrehung ist nach *Hack* [23] hinsichtlich des Verschmutzungsergebnisses besonders bei der Eigenverschmutzung von Bedeutung. Dies gilt für die Benetzung der Seitenwand des Fahrzeugs wie auch für die Sprühfahnenbildung. Aufgrund dessen ist es nach *Kuthada et al.* [24] gerade bei Untersuchungen auf dem Prüfstand notwendig, die Untersuchung der Eigenverschmutzung mit drehenden Rädern durchzuführen. Bis heute wird die Raddrehung bei dieser Art Untersuchung größtenteils dadurch realisiert, dass sich die Fahrzeugräder auf den beschichteten Rollen eines Rollenprüfstands drehen, vgl. *FKFS Thermowindkanal* [25]. Aufgrund der endlichen Krümmung der Rollenoberfläche weicht die Latschverformung des Reifens auf dem Rollenprüfstand allerdings von der Situation auf der Straße, die eine ebene Oberfläche aufweist, ab.

Um der Situation der Eigenverschmutzung auf der Straße näher zu kommen, wurde von *Pothoff* [26] am IVK 1992 ein Flachbandsystem zum mobilen Einsatz im Thermowindkanal entwickelt. Dieses System besteht aus einem Poly-V-Band, das am Ort der Radauflage durch

zwei Stützrollen unterstützt wird. Durch Einstellen des Abstands der Stützrollen sowie durch die Vorspannung des Laufbands ließ sich die Reifenaufstandsfläche einstellen, die der Straße gerecht wird. Die Wassereinbringung ließ sich entweder über die integrierte Bewässerung oder durch das direkte Einsprühen in den Reifenlatsch bewerkstelligen.

Widdecke *et al.* [20] zeigten 2001 bei Vergleichsmessungen, dass die Anwendung eines Flachbandsystems aufgrund der realistischeren Latschverformung einer Rolle vorzuziehen ist. Allerdings wurde ausgeführt, dass bei einer DiVeAn[®]-Auswertung der Eigenverschmutzung bei gleicher Bewässerung lediglich die Verschmutzungsintensität auf der auszuwertenden Fläche beim Versuch auf der Rolle anfangs einen steileren Gradienten aufweist. Trotz unterschiedlicher Latschverformung stellt sich über der Zeit ein ähnliches Verschmutzungsbild ein.

Borg und Vevang [27] verglichen 2004 die Eigenverschmutzung im Windkanal mit der Eigenverschmutzung im Fahrversuch. Die Fahrversuche hierzu fanden auf einem Prüffeld mit gleichmäßig benässtem Untergrund statt. Diese Untersuchungen bildeten die Basis für die anschließenden Windkanalversuche. Die Raddrehung wurde hierbei durch einen Rollenprüfstand realisiert. Nach Anpassung der in den Latsch eingebrachten Wassermenge, war ein korrelierendes Verschmutzungsbild zwischen Windkanal- und Straßenfahrtversuchen zu erzielen.

Bouchet *et al.* [28] führte ebenfalls auf einem Rollenprüfstand im Windkanal Untersuchungen zur Eigenverschmutzung von Fahrzeugen durch. Das Fluid wurde über Sprühdüsen direkt vor dem Reifenlatsch eingebracht. Der Fokus dieser Experimente lag allerdings nicht auf der Eigenverschmutzung des Fahrzeugs, sondern auf der abgesprühten Wassermenge, die als Fremdverschmutzung die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer betreffen kann. Hierfür wurden spezielle Messlehren hinter dem Versuchsfahrzeug installiert, die das abgesprühte Fluid auffingen und damit eine Bestimmung der Wassermenge ermöglichten.

Es ist zusammenzufassen, dass die Eigenverschmutzung neben Fahrversuchen (mit den damit verbundenen Unsicherheiten) hauptsächlich auf Prüfständen und in Windkanälen untersucht wird.

2.2.5 Experimentelle Untersuchung der Fremdverschmutzung

Wie in [Kapitel 2.1.2](#) bereits erläutert, resultiert die Fremdverschmutzung aus der Eigenverschmutzung und dem vom Reifen abgesprühten Wasser-Schmutz Gemischs eines vorausfahrenden Fahrzeugs. Wie die Eigenverschmutzung wird auch die Fremdverschmutzung im Fahrversuch oder im Windkanal untersucht, wobei der Fokus hierbei meist auf der Analyse der Seitenscheibe, des Außenspiegels und des Heckbereichs liegt.

1971 stellte Goetz [29] Konzepte für ein Windkanalsystem vor, das drei Untersuchungsbereiche abdecken sollte. Einerseits sollten hinreichend genaue, aerodynamische Untersuchungen an 1:5 Fahrzeugmodellen ermöglicht werden als auch Studien zur Fahrzeugumströmung an Vollfahrzeugmodellen. Zusätzlich sollte die Windkanalanlage die zu dieser Zeit

einmalige Möglichkeit zur Untersuchung von Verschmutzungsmechanismen an Fahrzeugen aufweisen. Hierfür wurde ein Ansatz vorgestellt, in dem der Windkanal eine teils zu öffnende Messstrecke aufweisen sollte, um die Verschmutzung des Windkanals gering zu halten.

Zur Simulation der Fremdverschmutzung war eine Vorrichtung zur Einbringung eines Wasser-Kreide Gemischs in die Fahrzeugumströmung nach der Düse vorgesehen. Hiermit sollte die Verschmutzung aufgrund von vorausfahrenden, entgegenkommenden und überholenden Fahrzeugen simuliert werden.

Pothoff [7] erläuterte 1974 die Fremdverschmutzungsanlage im großen 1:1 FKFS Windkanal in Vaihingen. Die Fremdverschmutzung wurde hierbei über einen 2,5 m breiten Absprühbalken nach der Düse mit bis zu 16 Sprühdüsensätzen je nach Fahrzeugbreite realisiert. Jeder Sprühdüzensatz bestand aus einer Schmutzwasserdüse und einer senkrecht dazu angeordneten Druckluftdüse. Die Förderung des Schmutzwassers, einer 12% igen Kreise-Wasser-Aufschwämmung, erfolgte über eine zweistufige Pumpe. Die Druckluftdüse erzeugte eine feintröpfig zerstäubtes Schmutzwasser. Der Sprühbalken wurde von zwei Hubspindeln mit Elektroantrieb aus der Bodenplatte auf die gewünschte Absprühhöhe ausgefahren. Aufgrund der technischen Nachrüstungen im 1:1 Fahrzeugwindkanal wurden die Verschmutzungsuntersuchungen ab 1995 in den IVK Thermowindkanal verlagert, vgl. *Pothoff* [26].

Eine Kombination aus Untersuchungsmethoden zur Fremdverschmutzung im Fahrversuch als auch im Windkanal wurde 2000 von *Bannister* [30] vorgestellt. Einerseits wurde die Fremdverschmutzung der Seitenscheibe und Außenspiegel im Fahrversuch auf dem Hällered Test Gelände untersucht, wobei ein Kreide-Wasser-Gemisch als Tracer zur Anwendung kam. Dieser Tracer wurde in den Nachlauf eines vorausfahrenden Fahrzeugs eingebracht. Dies wurde bewerkstelligt, indem dieses Fahrzeug bei einer Durchfahrt eines 150 m langen Kanals, dessen Untergrund mit dem Kreide-Wasser-Gemisch bedeckt war, das Fluid über die Reifen aufnahm und als Eigenverschmutzung absprühte. Das hinterherfahrende Untersuchungsfahrzeug durchfuhr dann in definiertem Abstand dieses mit dem Wasser-Kreide Gemisch beladene Strömungsgebiet. Basierend auf den Ergebnissen dieser Experimente wurden im Anschluss Untersuchungen zur Fremdverschmutzung im Volvo Windkanal durchgeführt. Über ein vor dem Untersuchungsfahrzeug installiertes Sprühgestell wurde sauberes Wasser in dessen Umströmung eingebracht. Hierbei wurden diverse Kombinationen von Sprühdüsen als auch Spiegelvarianten am Fahrzeug betrachtet, um eine dem Fahrversuch entsprechende Zusammenstellung von Düsen zu ermitteln.

Die Untersuchung der Verschmutzung von Seitenscheibe und Außenspiegel eines Fahrzeugs im IVK Thermowindkanal stellten *Widdecke et al.* und *Kuthada et al.* [20, 24] 2001 / 2002 vor. Zur Simulation der Fremdverschmutzung wurde hierbei ein höhenverstellbares Gestell mit mehreren Sprühdüsen vor der Düsenaustrittsöffnung des Thermowindkanals installiert und mit Volumenströmen von 300 l/h bis maximal 1200 l/h betrieben, was einem starken Regenschauer entsprechen soll. Zur Visualisierung der Fremdverschmutzung auf der Fahrzeugoberfläche kam der in Kapitel 2.2.3 vorgestellte Tracer zum Einsatz.

Die Fremdverschmutzung von Fahrzeugen wurde von *Borg und Vevang* [27, 31] 2004 / 2006 im Fahrversuch als auch im Volvo Windkanal experimentell untersucht. Hierfür wurden beim Fahrversuch Messdaten zur Tröpfchengröße im Nachlauf eines schweren Nutzfahrzeugs im Abstand von 25 m und 50 m auf nassem Asphalt durchgeführt. Diese Datensammlung wurde als Grundlage für die Simulation der Verschmutzung auf Glasoberflächen eines Fahrzeugs im Volvo Windkanal herangezogen. Die Simulation der Fremdverschmutzung erfolgte über die Einbringung eines Wasser-Fluoreszenzmittel-Gemischs in die Luftströmung über ein Sprühgitter. Unter UV-Beleuchtung konnte die Verschmutzung der interessierenden Bereiche analysiert und ausgewertet werden.

Wie die Eigenverschmutzung wird auch die Fremdverschmutzung sowohl im Straßenversuch als auch im Windkanal getestet, wobei die Sicherstellung der Umgebungsrandbedingungen im Windkanal sich wesentlich leichter darstellt, als es im Fahrversuch der Fall ist. Die Untersuchung im Windkanal kann als Sensitivitätsanalyse für Eigen- als auch für die Fremdverschmutzung herangezogen werden, um strömungsbeeinflussende Maßnahmen an der Geometrie eines Fahrzeugs reproduzierbar zu bewerten.

2.2.6 Besondere Anwendungsgebiete

Hervorgerufen durch Eigen- als auch durch Fremdverschmutzung lassen sich noch weitere mit der Fahrzeugverschmutzung zusammenhängende Anwendungsgebiete zeigen, die ebenfalls im Fokus des Aerodynamik Entwicklungsingenieurs liegen.

Ein Phänomen, das wie die Seitenscheiben- und Spiegelverschmutzung direkt vom Verkehrsteilnehmer wahrgenommen werden kann und die Sicht auf den Straßenverkehr massiv beeinträchtigt, ist der Wasserrückzug von der A-Säule in das Sichtfeld des Fahrers durch den Scheibenwischer. Dieses auch als Water Pullback bekannte Verhalten, das in Abhängigkeit von Frontscheiben- und A-Säulenneigung sowie Scheibenwischergeometrie auftreten kann, wird bei Windkanal-Untersuchungen der Fremdverschmutzung unter UV-Beleuchtung und mit UV-reaktivem Fluoreszenzmittel analysiert. Abhängig von Anströmgeschwindigkeit und Wischerstufe kann das Water Pullback mit einer Langzeitbelichtung oder über eine Bild-Triggerung visualisiert werden, was in Abbildung 4 links und rechts an der A-Säule rot dargestellt ist.

Im Rahmen der Untersuchung von Scheibenwischern können noch weitere Aspekte, wie das Abspritzen des Wassers bei der Rotationsbewegung des Wischerarm, auch als Overspray bekannt oder das generelle Wischpotenzial des Scheibenwischers betrachtet und bewertet werden. Aber auch andere, nicht direkt sichtbare, sicherheitsrelevante Baugruppen, wie die Bremsanlage, sind dem Nässeeintrag durch Wasser ausgesetzt, woraus sich eine Minderung der Bremsleistung ergeben kann. Dies stellt ein Sicherheitsrisiko im Straßenverkehr dar. Dieses sog. Nässefading ist besonders gefährlich, wenn es aufgrund von unterschiedlicher Zu-

strömung durch Kühlerpakete, Kühlkanäle, etc. einseitig auftritt und nicht nur eine Bremsminderung, sondern auch eine Gierbewegung des Fahrzeugs nach sich zieht.

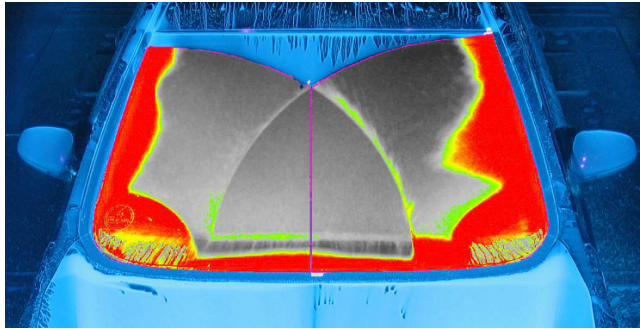


Abbildung 4: Analyse des Water Pullback (rot) mit einer Langzeitbelichtung sowie einer Auswertung mit DiVeAn®

Ein Verfahren zur Untersuchung des Nässefadings wurde 2010 von *Spruss et al.* [17] vorgestellt. Die Bremsenverschmutzung konnte über einen UV-Tracer sowie UV-LED-Clustern und Kameras in den Radhäusern visualisiert und besser verstanden werden. Weiterhin wurde ein Ansatz vorgestellt, mit dem über den Kraftfluss von der Bremsanlage über die Reifen auf die Antriebsrollen direkte Rückschlüsse auf den Haftreibungskoeffizienten zwischen Reibbelag und Bremsscheibe bei Nässe gezogen wurden. Hierfür wurden der Druck im Bremssystem sowie die Bremskräfte über eine entsprechende Aufspannung gemessen und über die geometrischen Zusammenhänge am Fahrzeug ins Verhältnis gesetzt.

2.3 Modellierung von Zwei-Phasen-Strömung

Die Modellierung der Kraftfahrzeugverschmutzung ist eine Kombination aus Teildisziplinen. Diese beinhalten die Dynamik des Tropfens in der ungestörten Anströmung, wie auch in der turbulenten Umströmung des Fahrzeugs, die Interaktion des Tropfens mit der Fahrzeugoberfläche sowie die Modellierung von Rinnsalen und Wandfilmen auf der Fahrzeugoberfläche. Diese Teildisziplinen sollen im Folgenden näher skizziert werden.

2.3.1 Beschreibende Größen der Zwei-Phasen-Strömung

Zur Beschreibung von Tropfenphänomenen wie dem Tropfenerfall, der Tropfen-Wand-Interaktion (benetzt / unbenetzt) sowie bei Rinnsalen und Wandfilmen werden üblicherweise dimensionslose Kennzahlen verwendet, um die Ergebnisse von verschiedenen Untersuchungen miteinander vergleichbar zu machen. Anhand einer Dimensionsanalyse der das Problem beschreibender Größen können diese dimensionslosen Parameter beispielsweise über das Π -Theorem nach *Buckingham* [32] hergeleitet werden. In [Abbildung 5](#) werden die wichtigsten, charakteristischen Größen für Tropfenphänomene zusammengefasst.

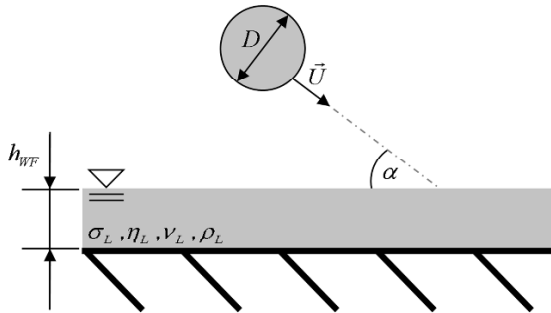


Abbildung 5: Beschreibende Parameter für Tropfenphänomene

Die Variable D bezeichnet hier den Durchmesser des Tropfens, h_{WF} ist die Höhe des vorhandenen Wandfilms. Mit σ_L , η_L bzw. ν_L und ρ_L werden die Stoffeigenschaften Oberflächenspannung, dynamische bzw. kinematische Viskosität und Dichte beschrieben. Der Winkel, der sich zwischen dem Geschwindigkeitsvektor U und der Wand aufspannt, wird mit α bezeichnet. Die das Problem charakterisierenden, dimensionslosen Kennzahlen könnten mit Hilfe der vorgestellten Parameter ermittelt werden.

Eine der wichtigsten Kennzahlen, mit der Tropfenphänomene in der Kraftfahrzeugverschmutzung beschrieben werden können, ist die Weber Zahl (We). Die Weber Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl der Strömungsmechanik. Sie stellt das Verhältnis von deformierenden Trägheitskraft der Relativströmung zur stabilisierenden Oberflächenkraft eines Tropfens dar. Sie dient dazu, Aussagen über die Verformung bzw. den Zerfall eines Tropfens treffen zu können, vgl. *Pilch und Erdman* [8].

$$We = \frac{\rho_L \cdot u^2 \cdot l}{\sigma_L} \quad \text{Gl. 2.3}$$

Mit der Ohnesorge Zahl (Oh) kann das Verhältnis zwischen der Zähigkeitskraft und der Oberflächenkraft veranschaulicht werden. Die Ohnesorge Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl der Physik. Sie beschreibt den Einfluss der Zähigkeit auf die Deformation eines Tropfens.

$$Oh = \frac{\eta_L}{\sqrt{\rho_L \cdot \sigma_L \cdot l}} \quad \text{Gl. 2.4}$$

Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss der Zähigkeit auf die Deformation eines Tropfens zu beschreiben, ist die Taylor Zahl (Ta).

$$Ta = Oh \cdot \sqrt{We} \quad \text{Gl. 2.5}$$

Mit die bedeutendste, dimensionslose Kennzahl der Strömungslehre sowie der Aerodynamik ist die Reynolds Zahl (Re). Sie stellt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften eines Fluids dar und kann aus den beiden vorher genannten Kennzahlen gebildet werden.

$$Re = \frac{\sqrt{We}}{Oh} = \frac{\rho \cdot u \cdot l}{\eta} \quad \text{Gl. 2.6}$$

Das Verhältnis der Oberflächenspannung zum Impuls in einer Flüssigkeit lässt sich durch die Laplace Zahl (La) ausdrücken.

$$La = \frac{\sigma \cdot \rho \cdot l}{\eta^2} \quad \text{Gl. 2.7}$$

Zur Beschreibung von an Wänden haftenden und entlang rinnenden Tropfen werden andere, dimensionslose Kennzahlen herangezogen. Die Kapillaritätszahl Ka stellt das Verhältnis aus viskosen Kräften zur Oberflächenspannung bei der Betrachtung von Grenzflächen zwischen Flüssigkeiten und Gasen dar.

$$Ka = \frac{\eta_L \cdot u}{\sigma_L} \quad \text{Gl. 2.8}$$

Der Einfluss der Schwerkraft auf den Tropfen kann mit Hilfe der Bond Zahl (Bo) verdeutlicht werden. Sie ist definiert als das Verhältnis von deformierender Schwerkraft zur stabilisierenden Oberflächenkraft des haftenden Tropfens. Anhand der Bond Zahl können

Schlüsse gezogen werden, ob die wirkende Schwerkraft an einem haftenden Tropfen die Form des Tropfens beeinflusst.

$$Bo = \frac{\rho \cdot g \cdot l^2}{\sigma} \quad \text{Gl. 2.9}$$

Wird die Bond Zahl $Bo = 1$ gesetzt und nach der charakteristischen Länge aufgelöst, so ergibt sich die Kapillaritätslänge κ^l zu:

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\sigma_L}{\rho_L \cdot g}} \quad \text{Gl. 2.10}$$

Die Kapillaritätslänge definiert, ab welchem Tropfenradius der Einfluss der Erdanziehung auf die Tropfenform nicht mehr zu vernachlässigen ist. Durch Gleichsetzen des Laplace Drucks σ/κ^l mit dem hydrostatischen Druck $\rho \cdot g \cdot \kappa^l$ kann die Kapillaritätslänge bestimmt werden. Ist der Tropfenradius größer als κ^l , so beeinflusst die Erdanziehung die Tropfenform. Der haftende Tropfen kann nicht mehr die Form einer Halbkugel aufrechterhalten und plattet ab.

2.3.2 Tropfenzerfall

Der Tropfenzerfall ist grundsätzlich in zwei zeitlich hintereinander ablaufende Prozesse eingeteilt: Den Primärzerfall gefolgt vom Sekundärzerfall. Beim Primärzerfall handelt es sich um das erste Herauslösen von flüssigen, zusammenhängenden Strukturen, den sog. Ligamenten, aus einem flüssigen Film, vgl. *Castleman* [9]. Dieser Prozess ist beispielsweise an einem Außenspiegel, an einem sich auf einer nassen Oberfläche rotierenden Rad aber auch im Einspritzvorgang bei Verbrennungsmotoren zu beobachten.

Der primäre Zerfall ist maßgeblich von der Interaktion zwischen dem flüssigen Film und der ihn umgebenden Gasphase abhängig, was wellenförmige Instabilitäten an der Phasengrenze hervorruft. Wirkt auf zwei aneinander grenzende Fluide unterschiedlicher Dichte eine Kraft (z.B. Gravitationskraft oder Beschleunigung), die vom dichteren Fluid in Richtung auf das spezifisch leichtere Fluid weist, so tritt die Rayleigh-Taylor Instabilität auf, die von *Rayleigh* [10] im Jahre 1883 und von *Taylor* [11] im Jahre 1950 untersucht wurde. Werden zwei geschichtete inkompressible, zähigkeitsfreie Fluide in zwei ebenen, parallelen Strömungen mit den Geschwindigkeiten u_1 und u_2 betrachtet, so kann es zu einer Grenzschichtablösung kommen. Es bildet sich zwischen den beiden Strömungsgebieten eine freie Scherschicht, die durch große mittlere Geschwindigkeitsgradienten $d\bar{u}/dy$ charakterisiert ist. Die Entwicklung

dieser Scherschicht unter einer äußeren Störung wird durch die Kelvin-Helmholtz Instabilität beschrieben und wurde 1868 von v. *Helmholtz* [12] und 1871 von *Kelvin* [13] untersucht.

In einem Bezugssystem mit einer mittleren Geschwindigkeit $u_m = (u_1 + u_2)/2$ sowie mit der Idealisierung, dass die Scherschicht unendlich dünn ist, lässt sich die Scherschicht stationär nach oben auslenken, vgl. [Abbildung 6](#). Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten im oberen Gebiet stellt sich dort ein statischer Unterdruck ein, im unteren Gebiet ein statischer Überdruck. Bei stationärer Betrachtung wirkt auf die Scherschicht eine destabilisierende Kraft nach oben.

Weiterhin wird aufgrund der asymmetrischen Geschwindigkeitsverteilung oberhalb und unterhalb der Scherschicht diese in Richtung der höheren Geschwindigkeit transportiert. Dies führt zu einer Aufsteilung.

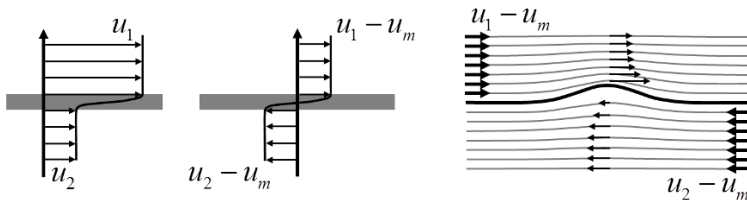


Abbildung 6: Links: Entstehung eines instabilen Strömungsprofils aufgrund unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten und Ausbildung einer Scherschicht (grau); Mitte: Bezugssystem einer unendlich dünnen Scherschicht; Rechts: Scherschichtauslenkung

Wird die freie Scherschicht räumlich sinusförmig ausgelenkt, wächst die Amplitude aufgrund der destabilisierenden Druckfelder an. Die benachbarten, stark gekrümmten „Berge“ und „Täler“ bewegen sich aufeinander zu, was zu einer Aufwicklung der Scherschicht führt, vgl. [Abbildung 7](#).

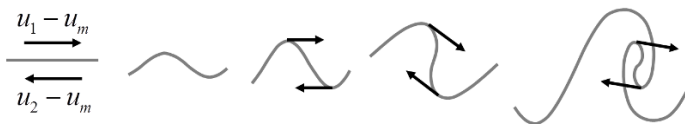


Abbildung 7: Aufwicklung einer Scherschicht bei endlichen Amplituden

Die Kelvin-Helmholtz Instabilität kann weitergefasst werden, wenn in den Strömungsschichten Fluide unterschiedlicher Dichte und Oberflächenspannung berücksichtigt werden und die Gewichtskraft miteinbezogen wird. Hierdurch ändert sich der Zusammenhang aus Quergeschwindigkeit und Druck an der Schnittstelle zwischen den Fluiden. Die Oberflächen-

spannung und die Gewichtskraft haben einen stabilisierenden Effekt auf die Kelvin-Helmholtz Instabilität.

Um das Herauslösen von Ligamenten besser zu verstehen, untersuchten 2004 *Marmottant und Villermaux* [14] den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahls unter dem Einfluss eines zum Flüssigkeitsstrahl coaxialen Gasstrahls. Ihre Untersuchungen zeigten, dass zwei hintereinander ablaufende Instabilitäten für das Herauslösen von Ligamenten und den Zerfall von Tropfen verantwortlich sind. Die ersten, achsensymmetrischen Auslenkungen des Fluids wurden auf Kelvin-Helmholtz Instabilitäten aufgrund der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen dem Fluid und dem Gas zurückgeführt.

Im Anschluss werden den achsensymmetrischen Auslenkungen zusätzlich transversale, wellenförmige Auslenkungen überlagert, was auf eine Rayleigh-Taylor Instabilität schließen ließ, vgl. Abbildung 8.

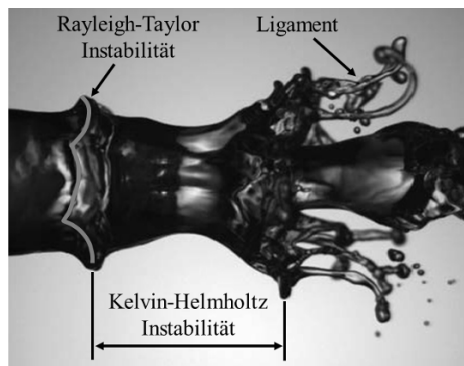


Abbildung 8: Zerfall eines Flüssigkeitsstrahls unter dem Einfluss eines zum Flüssigkeitsstrahl coaxialen Gasstrahls [14]

Kim und Moin [15] führten 2011 den Experimenten von *Marmottant und Villermaux* korrespondierende, numerische Simulationen durch. Hierbei wurde ein gekoppelter Ansatz für den Primär- und Sekundärzerfall mit einem Navier-Stokes Solver gewählt. Der Primärzerfalls basierte auf einer Modellierung der Kelvin-Helmholtz Instabilitäten unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Stabilitätsanalysen von *Marmottant und Villermaux*. Der Sekundärzerfall wurde mit einer abgewandelten Form eines der im Folgenden vorgestellten Modelle für den Sekundärzerfall berechnet.

Es existiert eine große Reihe von Ansätzen zur Modellierung des sekundären Tropfenzerfalls in der Fachliteratur. Hierbei lassen sich grundsätzlich zwei Vorgehensweisen an die Tropfenzerfallsmodellierung erkennen. Einerseits gibt es auf empirische Ansätze, die Schlüsse hinsichtlich des Zerfallsverhaltes eines Tropfens zulassen. Weiter existieren rein mathematische Ansätze. Diese zweite Gruppierung lässt sich wiederum in zwei Teilbereiche aufteilen:

In den mechanischen Zerfallsmodellen wird der Tropfen als Schwingungssystem aus zwei Massen, Feder und Dämpfer modelliert. Die das Schwingungssystem anregende Kraft resultiert aus dem Luftwiderstand des Tropfens in der Umströmung. Der zweite Teilbereich der mathematischen Ansätze basiert auf den zwei Instabilitäten des Tropfens. Zum einen den Rayleigh-Taylor Instabilitäten, mit langen Wellenlängen und zum anderen den Kelvin-Helmholtz Instabilitäten, die sich durch kurze Wellenlängen charakterisieren lassen.

Pilch und Erdman [8] haben den Tropfenzerfall detailliert erfasst. 1987 kamen sie anhand ihrer Untersuchungen zu dem Schluss, dass der Zerfall eines Tropfens kleinerer Viskosität ($Oh = 0.1$) von der Weber Zahl abhängig ist. Aus ihren Experimenten wurde eine kritische Weberzahl ($We = 12$), Zerfallszeiten mit drei verschiedenen Zeitskalen sowie mehrere, von der Weberzahl abhängige Zerfallsregime hegeleitet, die in [Abbildung 9](#) vorgestellt werden. Die hier vorgestellte Nomenklatur der sechs Zerfallsmechanismen kommt bei allen weiteren Modellen ebenfalls zur Anwendung.

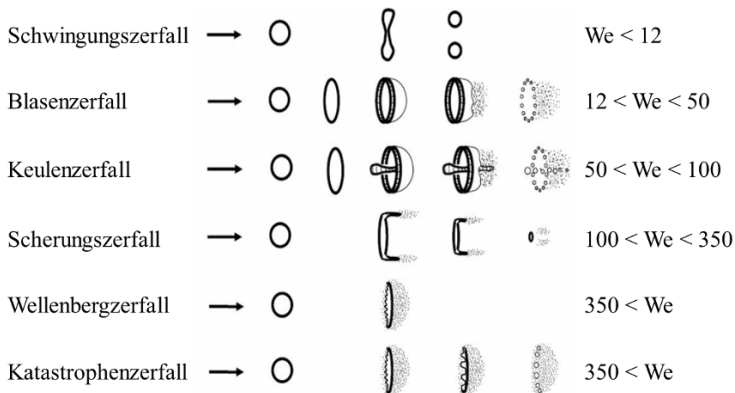


Abbildung 9: Zerfallsregime nach *Pilch und Erdman* [8]

Ebenfalls 1987 wurde ein mathematischer Ansatz, das Taylor Analogy Breakup Modell (TAB), von *O'Rourke und Amsden* [33] vorgestellt. Das Modell basiert auf der von Taylor vorgestellten Analogie zwischen einem schwingenden, verformten Tropfen und einem Feder-Masse System. Die Bewegung des Tropfens wird durch eine lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung für einen erzwungenen, gedämpften und harmonischen Oszillator beschrieben. Die äußere Kraft, die den Tropfen zum Schwingen anregt, resultiert aus der Umströmung des Tropfens. Die Dämpfung erfolgt durch seine Viskosität. Die rückstellende Kraft bringt die Oberflächenspannung auf. Ein Deformationsparameter beschreibt die Deformation des Tropfens. Der Tropfen zerfällt für die Randbedingung $We > 6$ und wenn die Auslenkung von „Nordpol“, und „Südpol“ des Tropfens in Summe so groß wie der Tropfenradius ist. Dadurch, dass die Bewegungsgleichung des Tropfens gelöst wird, ist für den Zerfall im TAB Modell

nicht nur die Weberzahl ausschlaggebend, sondern die Vorgeschichte der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Strömung. Es werden nur zwei verschiedene Zerfallsregime unterschieden, der Blasen- und der Scherungszерfall. Die Tropfengrößen nach dem Zerfall werden durch Energieerhaltung berechnet.

1992 haben *Hsiang und Faeth* [34] ihre Erkenntnisse zum Tropfenzerfall vorgestellt. Die Untersuchungen fanden in den Bereichen $We < 1000$ und $Oh < 4$ statt. Sie konnten in ihren Untersuchungen nachweisen, dass im Bereich $Oh < 0.01$ der Übergang zwischen den Zerfallsregimen bei nahezu konstanten We -Zahlen stattfindet. Auch der Einfluss der Verformung des Tropfens auf dessen Geschwindigkeit und Zerfall wurde untersucht. Die Messungen ergaben, dass die Verformung linear mit der Zeit wächst und sich maximale Verformung nach ca. 30 % der gesamten Zerfallszeit ergibt. Weiterhin sind die Tropfengrößen nach dem Zerfall bis zu einer We -Zahl von 1000 bestimmt worden.

1994 wurde von *Chen und Veshagh* in [35] ein Modell vorgestellt, das den Tropfenzerfall in turbulenten Strömungsfeldern modelliert. Hierbei wurden einige grundlegende Vereinfachungen angenommen, die die Berechnung des Tropfenzerfalls erleichtern. Es wurde dabei angenommen, dass die sich aus dem Zerfall ergebenden Tochtertropfen immer eine Kugelform annehmen und dass der ursprüngliche Muttertropfen beim Zerfall lediglich in zwei Tochtertropfen zerfallen kann. Der gesamte Zerfallsprozess wiederum kann aus mehreren Tropfenzerfällen bestehen.

1997 stellte *Tanner* [36] das Enhanced Taylor Analogy Breakup Modell (ETAB) vor. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des TAB Modells. Es kommt nach wie vor die Differenzialgleichung des TAB Modells für die Tropfenverformung zur Anwendung. Der Zerfallsprozess wird durch einen exponentiellen Zusammenhang modelliert, der den mittleren Tochtertropfenradius mit der Zerfallszeit des Muttertropfens korreliert. Eine Energiebilanz führt zu einem Ausdruck für die Geschwindigkeit der Tochtertropfen normal zur Trajektorie des Muttertropfens. Die notwendige Zerfallsbedingung ist, wie beim TAB Modell, $We > 6$. Der Tropfen zerfällt in mehrere Tropfen, deren Durchmesser nach einer bestimmten Verteilungsfunktion berechnet werden. Die Verteilungsfunktion selbst ist abhängig vom Zerfallsmechanismus, wobei beim ETAB Modell nur der Blasen- und Scherungszерfall Anwendung finden.

Basierend auf der Stabilitätsanalyse wurde 2003 von *Larmi und Tiainen* [37] das Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor Modell vorgestellt. Es beinhaltet sowohl die Kelvin-Helmholtz Instabilität der Oberflächenwellen als auch die Rayleigh-Taylor Instabilität des Tropfens. Insofern stellt es ein Modell für den Katastrophenzerfall dar.

Tanner [38] stellte 2003 das Cascade Atomization and Breakup Modell (CAB) vor. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des ETAB Modells. Im ETAB Modell sind nur die beiden Zerfallsmechanismen Blasen- und Scherungszерfall abgebildet. Das CAB Modell wurde um den Katastrophenzerfall erweitert. Das CAB Modell benötigt lediglich eine Konstante für alle drei Zerfallsmechanismen. Im Gegensatz dazu benötigt das ETAB- wie

auch das TAB Modell eine Modellkonstante pro Zerfallsmechanismus. Was sich allerdings nicht geändert hat, ist die Differentialgleichung, die die Verformung des Tropfens beschreibt. Auch die notwendige und die hinreichende Zerfallsbedingung unterscheiden sich nicht vom TAB/ETAB Modell. Weiter wird angenommen, dass die Zahl der Tochtertropfen proportional zur Anzahl der kritischen Muttertropfen ist. Aus diesem Zusammenhang folgt mit der Massenerhaltung zwischen Mutter- und Tochtertropfen das Zerfallsgesetz, das identisch zum ETAB Modell ist.

Das Turbulence Taylor Analogy Breakup Modell (TTAB) wurde 2005 von *Trinh und Chen* [39] vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine Modifikation des TAB Modells. Diese Modifikation bildet den Einfluss der Turbulenz auf den Tropfenzerfall ab und war notwendig, da die Turbulenz den Tropfenzerfall beschleunigt, indem sie die Oberflächenspannung schwächt. Hierfür wurde in die Differenzialgleichung des TAB Modells ein zusätzlicher Kraftterm eingefügt, der die Turbulenz abbilden soll. Die zweite Modifikation des Modells betrifft die Berechnung der Durchmesser der Tochtertropfen. Der sekundäre Zerfall wird für Muttertropfen als auch für Tropfen, die aus einem Zerfallsprozess hervorgehen, angewendet. Zerfällt ein Muttertropfen, so wird angenommen, dass die turbulenten Größen erhalten bleiben und gleichmäßig auf die Tochtertropfen verteilt werden.

2.3.3 Tropfen-Wand-Interaktion

Neben der reinen Interaktion von Tropfen mit der sie umgebenden Atmosphäre ist die Kollision mit einer festen Geometrie eine weitere, wesentliche Teildisziplin in der Fahrzeugverschmutzungsmodellierung. In der Literatur hat sich hinsichtlich der Beschreibung von Tropfen-Wand-Interaktionen die Einteilung in die Bereiche Haften, Ausbreitung, Reflexion und Splashing durchgesetzt. Die Formen des Haftens und der Ausbreitung lassen sich hierbei mit dem Überbegriff Deposition zusammenfassen.

Die ersten Veröffentlichungen zur Tropfen-Wand-Interaktion lassen sich auf die von *Worthington* [40] im Jahre 1876 durchgeführten Untersuchungen zum Tropfenaufprall auf feste Wände im Prof.-Helmholtz-Labor in Berlin zurückführen. Worthington variierte bei den vorgestellten Untersuchungen das benutzte Fluid (Wasser, Quecksilber, Alkohol), den Tropfendurchmesser sowie die Fallhöhe und deren Einfluss auf den Tropfenaufprall auf eine feste, horizontale, glatte Glasplatte. Zwei grundlegende Mechanismen konnten beobachtet werden und sind in [Abbildung 10](#) dargestellt. Einerseits war zu erkennen, dass die sich ergebenden Muster auf der Oberfläche nach dem Aufprall symmetrische Formen um den Auftreffpunkt annahmen. Andererseits konnte nach der ersten Ausbreitung des Fluids beobachtet werden, dass das Zentrum im Fluid beim Zurückziehen säulenförmig nach oben bewegt wurde, was als Worthington-Jet bezeichnet wird.

In einer weiterführenden Arbeit erweiterte Worthington [41] im Jahre 1882 seinen Versuchsaufbau, um den Tropfenaufprall auf eine benetzte Oberfläche zu beobachten. Zur Untersuchung des Aufpralls von Tropfen auf benetzte Oberflächen wurde die horizontale Platte gegen ein Wasserbad ausgetauscht, dessen Filmhöhe anhand des Wasservolumens eingestellt werden konnte. Worthington variierte zudem die Tropfendurchmesser sowie die Fallhöhe, um hieraus den Geschwindigkeitseinfluss auf das Splashing zu bestimmen. Ähnlich zu den Experimenten auf der horizontalen Platte waren Symmetrien zum Auftreffpunkt erkennbar.

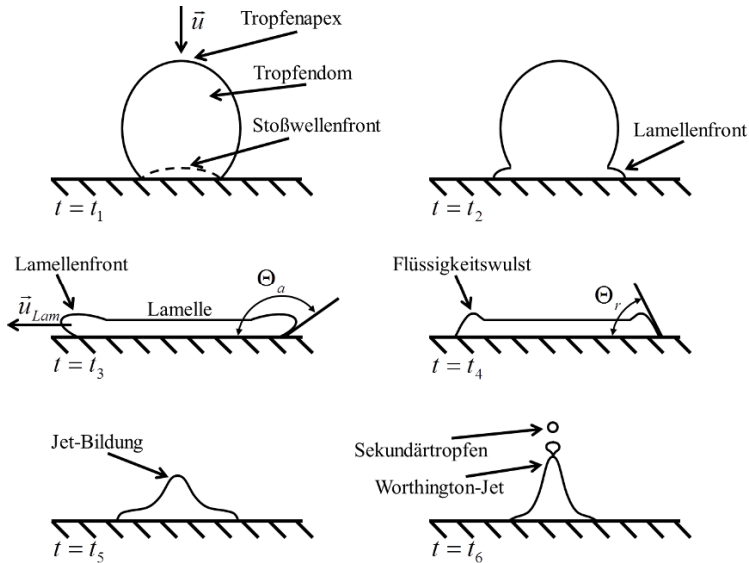


Abbildung 10: Zeitlicher Ablauf eines Tropfenaufpralls auf eine trockene Oberfläche ($t = t_1$), Lamellenfrontbildung ($t = t_2$), Lamellenausbreitung ($t = t_3$), Lamellenrückzug ($t = t_4$), Jetbildung ($t = t_5$) sowie Bildung eines Worthington Jets mit Sekundärtropfen ($t = t_6$)

Abhängig von Tropfendurchmesser und Fallhöhe war weiterhin nach dem Aufprall auf die benetzte Wand eine kreisförmige Kraterbildung mit der Generierung von Sekundärtropfen erkennbar, was in späterer Literatur als Corona-Splashing bezeichnet ist, vgl. [Abbildung 11](#). Im Anschluss an diesen Prozess konnte der bereits vorgestellte Worthington-Jet beobachtet werden. Eine Erweiterung der Untersuchungen von Worthington stellt die Veröffentlichung von Engel [42] aus dem Jahr 1955 dar, in der der Aufprall eines Wassertropfens auf eine glatte Glasoberfläche aus zwei Perspektiven mit einer Hochgeschwindigkeitskamera untersucht wurde.

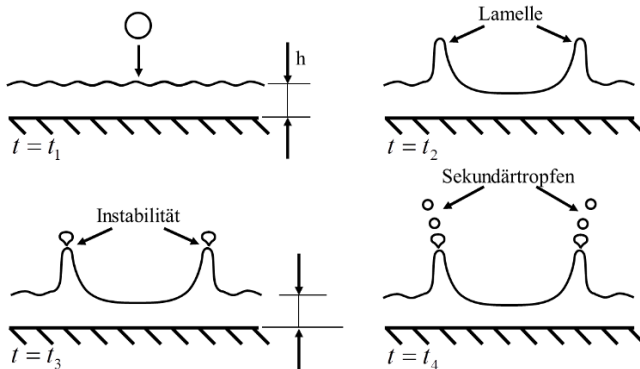


Abbildung 11: Zeitlicher Ablauf eines Tropfenaufpralls auf eine benetzte Wand ($t = t_1$), Lamellenfrontbildung ($t = t_2$), Instabilitätsbeginn ($t = t_3$) und Corona Splashing ($t = t_4$)

Variiert wurden hierbei die Fallhöhe des Tropfens auf 1.5 ft sowie 20 ft. Anhand der optischen Messdaten wurde auf die radiale Geschwindigkeitsverteilung während des Tropfenaufpralls geschlossen. Engel stellte basierend auf den durchgeführten Experimenten einen Berechnungsansatz vor mit dem der Tropfenradius ab dem Zeitpunkt des Aufpralls zeitlich aufgelöst bestimmbar war.

Stow und Hadfield [43] untersuchten 1981 den Einfluss der Oberflächenrauigkeit zusammen mit dem Tropfendurchmesser und der Aufprallgeschwindigkeit auf das Ausbreitungs- und Splashing-Verhalten von Tropfen beim Aufprall auf feste Oberflächen. Es konnte anhand der experimentellen Daten gezeigt werden, dass die Oberflächenrauigkeit keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tropfens beim Aufprall nimmt, was 1993 von *Asai et al.* [44] bestätigt wurde. Weiter konnten *Stow und Hadfield* einen Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Generierung von Sekundärtropfen zeigen. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Interaktion zwischen der rauen Oberfläche und des Tropfens eine Instabilität in der Ausbreitungswelle des Tropfens verursacht und eine Sekundärtropfenbildung nach sich zieht.

Nach der Tropfenausbreitung stellt sich bei der Deposition ein Gleichgewichtszustand, das Haften des Tropfens, ein. Befindet sich ein Fluid in Kontakt mit einer festen Oberfläche, umgeben von einer Gasphase, so ist die Kontaktlinie definiert als Schnittlinie, an der sich alle drei Phasen berühren. Im Gleichgewicht schließt die Tangente durch die Kontaktlinie an der Grenzfläche zwischen Fluid und Gasphase mit der festen Oberfläche einen Kontaktwinkel θ ein. Dieser Kontaktwinkel reicht von 0° für die vollständige Benetzung einer Oberfläche bis hin zu 180° für nicht benetzbare Oberflächen. Interaktionen zwischen Fluiden und festen Oberflächen mit Kontaktwinkeln unter 90° werden als hydrophil und über 90° als hydrophob bezeichnet.

An der Kontaktlinie lassen sich drei Oberflächenspannungen feststellen, was in Abbildung 12 illustriert ist:

- $\sigma_{\text{fest-flüssig}}$ zwischen fester Oberfläche und Fluid
- $\sigma_{\text{flüssig-gas}}$ zwischen Fluid und Gasphase
- $\sigma_{\text{gas-fest}}$ zwischen Gasphase und fester Oberfläche

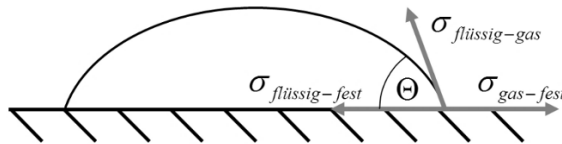


Abbildung 12: Oberflächenspannungen und Kontaktwinkel an einem haftenden Tropfen im Gleichgewichtszustand

Befindet sich ein Tropfen im Gleichgewicht auf einer idealen, horizontalen Oberfläche, so lassen sich diese drei Oberflächenspannungen zur young'schen Gleichung bilanzieren, vgl. Young [45]:

$$\sigma_{\text{gas-fest}} = \sigma_{\text{flüssig-gas}} \cdot \cos \Theta_{\text{Young}} + \sigma_{\text{fest-flüssig}} \quad \text{Gl. 2.11}$$

Liegt ein Gleichgewicht vor, so ergibt sich demnach für ein Fluid auf einer Oberfläche ein definierter Kontaktwinkel. Voraussetzung hierfür ist, dass keinerlei dynamische Kräfte wirken und dass es sich bei der Oberfläche um eine ideal platte handelt. Um der Oberflächenrauigkeit Rechnung zu tragen führte Wenzel [46] im Jahre 1936 eine zusätzliche Variable r ein, mit der die young'sche Gleichung linear erweitert wurde, vgl. Gleichung 2.12.

$$\cos \Theta_{\text{Wenzel}} = r \cdot \cos \Theta_{\text{Young}}$$

Gl. 2.12

Dies basiert auf der Annahme, dass sich mit steigender Oberflächenrauigkeit die Kontaktfläche zwischen Fluid und Oberfläche erhöht, was zu einer Beeinflussung des Kontaktwinkels führen muss.

1944 stellten Cassie und Baxter [47] einen Berechnungsansatz für den Kontaktwinkel vor, der die chemische Heterogenität einer Oberfläche berücksichtigt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein Tropfen gleichzeitig auf zwei verschiedenen Oberflächen mit den benetzten Flächenanteilen f_{A1} und f_{A2} haftet und sich zwei Kontaktwinkel Θ_1 und Θ_2 ergeben. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 2.13 dargestellt.

$$\cos\Theta_{Cassie} = f_{A1} \cdot \cos\Theta_1 + f_{A2} \cdot \cos\Theta_2 \quad \text{mit } f_{A1} + f_{A2} = 1 \quad \text{Gl. 2.13}$$

Unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit r kann der Gleichgewichtszustand eines Tropfens auf einer chemisch heterogenen Oberfläche anhand der Cassie-Baxter-Gleichung beschrieben werden:

$$\cos\Theta_{Cassie-Baxter} = r \cdot f_A \cdot \cos\Theta_{Young} + f_A - 1 \quad \text{Gl. 2.14}$$

Wirken dynamische Kräfte, so ist eine Definition des Kontaktwinkels im Gleichgewicht unzureichend. Es ist eine Abhängigkeit zwischen dem Kontaktwinkel und dem Abstand zur Kontaktlinie sowie zur Geschwindigkeit der Kontaktlinie zu beobachten. Die in der Literatur zur Bestimmung dynamischer Kontaktwinkel existierenden Modelle lassen sich in zwei Ansätze klassifizieren: Einerseits bedienen sie sich der hydrodynamischen Theorie, andererseits der Theorie der molekularen Änderung der Bewegungsgrößen [48].

Im hydrodynamischen Ansatz wird ein Verhältnis zwischen dem mikroskopischen Kontaktwinkel Θ_m und dem makroskopischen, dynamischen Kontaktwinkel Θ_{dyn} angenommen. Hierzu definierte Cox [49] 1986 drei differenziert zu betrachtende Bereiche. Abbildung 13 veranschaulicht dies anhand der Kontaktlinie eines sich ausbreitenden Tropfens auf einer festen Oberfläche im Mittelschnitt. Der äußere Bereich liegt im makroskopischen und somit im Bereich der Größenskala des Tropfenradius R , es ist der wahrnehmbare Kontaktwinkel Θ erkennbar. Der mittlere Bereich ist charakterisiert als ein Bilanzierungsbereich aus viskosen Kräften und der Oberflächenspannung des Tropfens. Dies führt zu einer Beugung der Grenzfläche und einer Änderung des mikroskopischen Kontaktwinkels Θ_m . Die Größe dieses Bereichs wird mit $3 \cdot Ka \cdot R / \Theta$ angenommen, beginnend an der Stelle, an der die Grenzfläche des Tropfens von einer konkaven in eine konvexe Form übergeht. Der innere Bereich liegt in einer Größenskala, in der mikroskopische Details im Bereich weniger Nanometer großen Einfluss auf den mikroskopischen Kontaktwinkel Θ_m nehmen.

Der Einfluss der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tropfens auf den mikroskopischen Kontaktwinkel Θ_m wird von Voinov [51], Dussan [52] und Cox [49] eingehend diskutiert. Gemäß den nach Cox definierten Bereichen können die auftretenden Kontaktwinkel an einem haftenden Tropfen in diesen Bereichen Unterschiede aufweisen.

Weiterhin können sich nach De Gennes [53] in allen drei Bereichen die Kontaktwinkel unterscheiden, da diese abhängig sind von der Oberflächenrauigkeit, von der chemischen Beschaffenheit sowie beeinflusst werden durch mögliche gelöste Substanzen auf der Oberfläche.

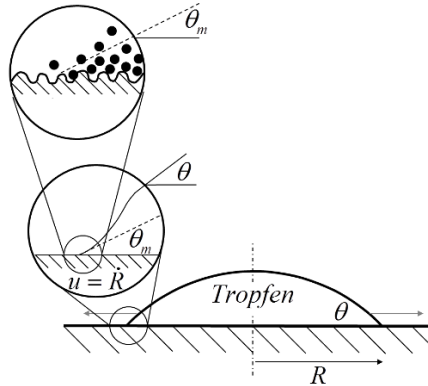


Abbildung 13: Kontaktwinkel in verschiedenen Größenbereichen, vgl. *Bonn et al.* [50]

Wird einem auf einer Oberfläche haftenden Tropfen Volumen hinzugefügt bzw. entzogen, so ist zu beobachten, dass die Position und die Kontaktlinie des Tropfens unverändert bleibt und der Tropfen die Volumenänderung durch eine Anpassung des Kontaktwinkels kompensiert, vgl. [Abbildung 14](#).

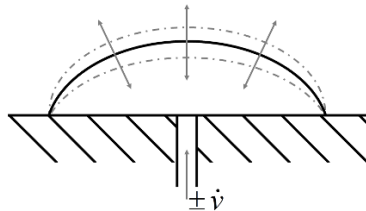


Abbildung 14: Kontaktwinkelanpassung eines Tropfens bei Volumenänderung

Dieser Effekt lässt sich aufgrund der Oberflächenrauigkeit erklären: Da eine Oberfläche nicht ideal glatt ist, muss die Kontaktlinie auf der Oberfläche Unebenheiten im mikroskopischen Skalenbereich überwinden, vgl. [Abbildung 15](#). Unter der Voraussetzung, dass der Kontaktwinkel im mikroskopischen Bereich an den unebenen Oberflächen konstant ist, wird der Kontaktwinkel im makroskopischen Bereich abhängig von der Unebenheit als unterschiedliche Kontaktwinkel θ_1 und θ_2 wahrgenommen, während die Bewegung der Kontaktlinie über die Unebenheit nicht wahrnehmbar ist. In makroskopischer Betrachtung bleibt die Position der Kontaktlinie also unverändert, wohingegen sich der Kontaktwinkel ändert. Dieses Phänomen wird in der Literatur häufig als Kontaktwinkelhysterese bezeichnet.

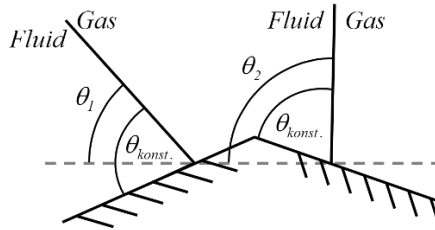


Abbildung 15: Einfluss mikroskopischer Unebenheiten (schwarz) auf einer makroskopisch horizontalen Oberfläche (grau gestrichelt) auf Kontaktwinkels

Innerhalb eines Bereichs zweier Kontaktwinkel, dem voranschreitenden (engl.: advancing) Kontaktwinkel θ_a und dem zurückweichenden (engl. receding) Kontaktwinkel θ_r , bleibt die Kontaktlinie ortsfest. Der Tropfen kompensiert eine Volumenänderung bzw. den Einfluss von außen angreifender Kräfte über die Anpassung des Kontaktwinkels. Dieser Zusammenhang ist in [Abbildung 16](#) veranschaulicht und zeigt die Änderung des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Kapillaritätszahl.

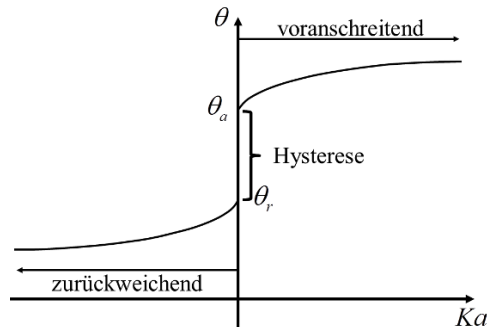


Abbildung 16: Kontaktwinkelhysterese

Anhand des Kontaktwinkels und der Kontaktwinkelhysterese sind die Definition von hydrophilen und hydrophoben Interaktionen von Fluiden und Oberflächen sowie die Mobilität eines Tropfens beschreibbar.

Brochard [54] untersuchte 1989 das statische Haften eines Tropfens auf einer horizontalen Ebene, wobei eine prinzipielle Unterscheidung zwischen kleinen und großen Tropfen getroffen wird. Brochard identifizierte bei kleineren Tropfen die Form einer Halbkugel, die eine Abhängigkeit zum Kontaktwinkel θ aufweisen. Bei großen Tropfen hingegen ist eine Abplattung des Tropfens zu einer scheibenähnlichen Form zu beobachten. Zur Beschreibung der sich einstellenden Tropfenform kommt die Kapillaritätslänge κ^{-1} als charakteristische Größe zur Anwendung. Es wird angenommen, dass für $l < \kappa^{-1}$ die Form des Tropfens als Halbkugel

angegeben werden kann. Wird die charakteristische Größe überschritten, also $l > \kappa^{-1}$, so nimmt der Tropfen eine scheibenähnliche Form an. *Brochards* Ansatz weist im Übergangsbereich von $l \approx \kappa^{-1}$ das Manko auf, dass Überschneidungen der beiden Beschreibungsvarianten auftreten und somit keine exakte Beschreibung in diesem Bereich definiert ist.

Einen Ansatz zur Ermittlung der maximalen Tropfenausbreitung lieferten *Chandra und Avedisian* [55] im Jahre 1991. Die maximale Tropfenausbreitung kann demnach durch eine Betrachtung der Energieerhaltung beschrieben werden. Berücksichtigt werden bei diesem Ansatz die kinetische Energie $E_{kin I}$ sowie die Oberflächenenergie $E_{surf I}$ vor dem Aufprall des Tropfens auf die Wand und die kinetischen Energie $E_{kin II}$ sowie die Oberflächenenergie $E_{surf II}$ mit dem zusätzlichen Anteil der dissipierten Energie E_{diss} nach dem Aufprall. Die Tropfengeometrie wird in diesem Ansatz für die Energiebetrachtung vor dem Aufprall als Kugel idealisiert. Zum Zeitpunkt maximaler Ausbreitung kann die kinetische Energie $E_{surf II}$ nach dem Aufprall gleich Null gesetzt werden. Mit Vereinfachungen für die Oberflächenenergie und Annahmen für den Kontaktwinkel folgt eine analytische Abschätzung für die maximale Tropfenausbreitung.

Rein [56] stellte 1993 ein Tropfenausbreitungsmodell vor, das sich in drei Teilbereiche einteilen lässt. Es wird unterschieden zwischen der Stoßwellenbildung, der Tropfendeformation, der Lamellenbildung sowie dem Zusammenziehen der Lamelle nach maximaler Ausbreitung, vgl. [Abbildung 10](#). Die Stoßwellenbildung hat laut Rein vernachlässigbaren Einfluss auf die Lamellenbildung sowie auftretende Splashing-Vorgänge, was von *Yarin und Weiss* [57] 1995 bestätigt wurde.

Ebenfalls 1995 konnten *Scheller und Bousfield* [58] in ihren Untersuchungen bei Reynoldszahlen größer als zehn zeigen, dass der Kontaktwinkel auf die Tropfenausbreitung nur geringen Einfluss nimmt. Hierbei wurden physikalische Stoffgrößen wie die Viskosität und die Oberflächenspannung variiert, weiterhin die Beschaffenheit der Oberfläche, die auf den Kontaktwinkel Einfluss nimmt, sowie der Tropfendurchmesser und die Aufprallgeschwindigkeit. Sie lieferten als Resultat ihrer experimentellen Untersuchungen eine empirische Korrelation für den maximalen Tropfenausbreitungsdurchmesser. Zeitgleich stellten *Mundo et al.* [59] ein einfaches Re -abhängiges Modell zur Bestimmung des Tropfenaufpralls auf feste Wände vor.

Kalb [60] stellte 2001 einen Ansatz zur Berechnung der Splashinggrenze und Tochtertropfenbildung bei benachbartem Tropfenaufprall vor. Hierbei trifft die sich ausbreitende Lamellenfront auf einen bereits auf der Oberfläche haftenden Tropfen. Die Bildung von Sekundärtropfen ist abhängig vom Aufprallwinkel des Tropfens, dem Abstand zwischen aufprallenden und haftenden Tropfen, der Lamellengeometrie und der Lamellengeschwindigkeit vor dem Aufprall auf den haftenden Tropfen, vgl. [Abbildung 10](#). Diese, auf seinen Untersuchungen basierende Splashinggrenze wird über eine kritische Kapillaritätszahl $Ka_{Lam, krit}$ für die Lamelle gebildet (vgl. [Kapitel 2.3.1](#)). Übersteigt Ka_{Lam} die von Kalb eingeführte kritische Grenze $Ka_{Lam, krit}$ tritt Splashing auf, was zu Tochtertropfen führt.

Rioboo et al. [61] stellten 2002 ein erweitertes, vierphasiges Tropfenausbreitungsmodell vor. Die vier Phasen lassen sich aufteilen in kinematische Phase, Ausbreitungsphase, Entspannungsphase und Benetzungs- bzw. Gleichgewichtsphase. In der kinematischen Phase ist die Ausbreitung unabhängig von den physikalischen Eigenschaften des Fluids und der Oberfläche. Weiterhin bildet sich in dieser ersten Phase noch keine Ausbreitungslamelle aus. Die Eigenschaften wie Viskosität, Dichte, Oberflächenspannung sowie die Bewegungscharakteristika wie Tropfengeschwindigkeit und -durchmesser machen sich erst in der Ausbreitungsphase bemerkbar. In dieser Phase breitet sich die Lamelle bis zum maximalen Durchmesser aus. Rioboo et al. geben die Abhängigkeit des Lamellenradius R_{Lam} von der Zeit t in den ersten zwei Phasen mit $R_{Lam} \sim t^{1/2}$ an. In der darauffolgenden Entspannungsphase ist die maximale Ausbreitung erreicht und die Lamelle verbleibt in Ruhe.

Darauffolgend beginnt sie, sich zusammenzuziehen. Die Benetzungs- bzw. Gleichgewichtsphase charakterisiert den Zustand, wenn die Oberfläche benetzt ist und sich im Fluid ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Maichle [62] untersuchte 2007 diese im Gleichgewicht befindlichen, an einer horizontalen Wand haftenden Tropfen mit Hilfe der direkten numerischen Simulation (DNS) mit Schwerpunkt auf dem Ausbreitungsdurchmesser l_A sowie der Höhe h_A . Die DNS-Untersuchungen wurden hierfür jeweils als Halbkugel mit einem Durchmesser d_{HK} auf einer horizontalen Oberfläche initiiert. Bedingt durch die Gravitation und die Zähigkeit des Fluids kommt es zu einer oszillierenden Bewegung. Die Kontaktlinie des Tropfens breitet sich dabei aus und zieht sich wieder zusammen, bis sie an einer bestimmten Position haften bleibt und sich die endgültige Form des Tropfens einstellt. Der Ausbreitungsdurchmesser und die Höhe des Endzustands aus den DNS-Rechnungen wurden zu einem nahezu stationären Zeitpunkt bestimmt, als nur noch minimale Änderungen dl in der Simulation auftraten. In weiterführenden Untersuchungen wurde beobachtet, dass sich ab bestimmten Tropfengrößen nur noch der Ausbreitungsdurchmesser l_A signifikant ändert, die Höhe h_A aber nahezu unbeeinflusst bleibt. Dies deutet auf einen Übergang zum Wandfilm hin. Maichle lieferte zudem eine analytische Beschreibung der Form eines haftenden Tropfens auf einer horizontalen Oberfläche. Hierbei wurde der Tropfen auf ein symmetrisches Problem reduziert, sodass die Kontaktlinie stets als kreisrunde Form angenommen und der Endzustand des Tropfens auf ein Rotationsellipsoid reduziert werden kann.

2.3.4 Rinnsale und Wandfilme

Zeitlich nach der Tropfen-Wand-Interaktion erfolgt die Fluidbewegung auf Oberflächen als Rinnsale oder Wandfilme. Dieser weitere zu modellierende Zweig in der Kraftfahrzeugverschmutzung wurde in der Vergangenheit in grundlegenden Untersuchungen an einfachen ge-

ometrischen Grundkörpern sowie teilweise an Vollfahrzeuggeometrien untersucht. Im Folgenden soll die Modellierung von Rinnsalen und Wandfilmen umrissen werden.

Ataki und Bart [63] untersuchten 2002 das Fließverhalten von Glycerin-Wasser-Rinnsalen auf einer angestellten Platte im Experiment. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag auf einem laminaren Rinnsal mit konstant gehaltenem Fluidvolumenstrom ohne Anströmung. Die Höhe sowie das Profil des Rinnsals wurden mechanisch über einen Taster über ein kameraunterstütztes Sensorsystem bestimmt. Mit Zuhilfenahme der Querschnittsfläche des Rinnsals, die sich aus der Höhen- und Profilmessung ergeben hat, konnte die Geschwindigkeit unter Berücksichtigung des vorgegebenen Volumenstroms ermittelt werden. Eine entsprechende CFD Simulation wurde mit der Software FLUENT[®] durchgeführt, wobei das implementierte VOF-Modell (Volume of Fluid) zum Einsatz kam. Die Simulationsergebnisse stimmten mit den experimentellen Daten mit einer Abweichung von 8 % überein, wobei festgestellt werden konnte, dass der Kontaktwinkel zwischen Fluid und Plattenoberfläche einen hohen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat.

Das VOF-Modell in FLUENT[®] wurde ebenfalls bei den Untersuchungen von *Gu et al.* [64] 2004 eingesetzt. In ihren Untersuchungen wurde der Einfluss von gewellten Oberflächen, Flüssigkeitseigenschaften und zusätzlicher Variation der Gasphasengeschwindigkeit auf das Verhalten von Wandfilmen an einer um 45° geneigten Platte betrachtet. Hierbei wurde eine rein theoretische Parameterstudie in CFD durchgeführt.

Grundlegende Untersuchungen an einer Platte mit verschiedenen Anstellwinkeln wurden 2006 von *Hoffmann et al.* [65] in Experiment und Simulation durchgeführt. Das Fließverhalten von Flüssigkeiten auf einer angestellten Edelstahlplatte wurde mit Hilfe einer CCD Kamera beobachtet. Die Fließgeschwindigkeit des Films wurde mit dem Particle Tracking Velocimetry (PTV) Verfahren nach *Adrian* [66] ermittelt. Eine Überströmung der Platte lag dabei nicht vor. Die dazugehörigen, numerischen Simulationen wurden mit ANSYS CFX5[®] durchgeführt. Das darin implementierte Berechnungsverfahren basiert auf einem Euler-Euler Ansatz mit dem Experiment angepassten Vereinfachungen wie statischem Kontaktwinkel zwischen Fluid und Plattenoberfläche. Weiterhin wurde das Berechnungsmodell an der Grenzfläche zwischen Fluid und Oberfläche auf ein VOF-Modell reduziert, um den numerischen Aufwand gering zu halten. In der Simulation konnten die Fluidgeschwindigkeit, die Filmhöhe sowie der benetzte Bereich auf der Platte identifiziert werden.

Einen Ansatz zur Simulation der Fahrzeugverschmutzung mit STAR-CD[®] stellten *Campos et al.* [67] 2006 vor. Präsentiert wurden Spray, die Filmbildung sowie die Filmbewegung aufgrund des Einflusses der Gravitation an einer angestellten Platte. Die Gasphase, das Spray sowie der flüssige Wandfilm konnten durch einen gekoppelten Ansatz berechnet werden. Dieser Ansatz wurde im Weiteren auf ein zweistufiges Simulationsmodell zur Ermittlung der Fahrzeugverschmutzung übertragen: Einerseits die Lösung des gasförmigen Strömungsfelds, andererseits die Lösung für die Partikel sowie die Wandfilme in Form einer Ein-Wege-

Kopplung. Dieser Ansatz lieferte qualitative Ergebnisse für die Fluid-Phase bezogen auf Motorhauben-, A-Säulen- sowie Heckverschmutzung.

Die Bewegung von flüssigen Wandfilmen über feste Oberflächen wurde ebenfalls von *Anderson und Coughlan* [68] 2006 untersucht und mit FLUENT[®] simuliert. Hierbei wurde das implementierte VOF-Modell um sogenannte User Defined Functions (UDF) erweitert, um die Strömung eines dünnen Films auf einer Oberfläche darzustellen und die Bildung eines Films berechnen zu können. Die Ansammlung von Tropfen, die Strömungsmuster von Wasserfilmen und das Herausbrechen von Tropfen aus dem Film konnten mit den UDF's vorhergesagt werden.

Borg und Vevang [31] benutzten 2006 ebenfalls FLUENT[®] um die Fahrzeugverschmutzung unter Zuhilfenahme der numerischen Simulation vorherzusagen. Hierbei wurden zwei Modelle für die Simulation von Tropfenbewegungen vorgestellt. Die Gasphase wurde über die Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen numerisch gelöst, wohingegen die auf Kugeln reduzierten Tropfen in einem Lagrange'schen Bezugssystem über eine Ein-Wege-Kopplung modelliert werden. Weiterhin wurden vereinfachte Tropfen-Wand-Interaktionsmodelle (Haften, Verteilen) sowie ein Wandfilmmodell mit drei Varianten (Haften, Verteilen, Aufplatzen) eingeführt, die allerdings nur für einen dünnen Film gültig sind.

Ein weiterer Ansatz zur Simulation der Fahrzeugverschmutzung wurde von *Kuthada und Cyr* [69] 2006 beschrieben. Dieser, auf einer Ein-Wege-Kopplung basierende Ansatz, wurde im Anschluss an eine vorhergehende Lattice-Boltzmann Simulation der Umströmung mit Exa PowerFLOW[®] angewendet. Das im Post-Processor PowerVIZ integrierte Lagrange'sche Particle Tracking Tool, das die Partikeln auf Kugeln reduziert, fand hier erfolgreich Anwendung, indem die Auftreffpunkte der eingebrachten Partikeln auf der Fahrzeugoberfläche ermittelt wurden. Fluidbewegungen auf der Oberfläche konnten mit diesem Ansatz jedoch noch nicht realisiert werden.

Ebenfalls auf einer Ein-Wege-Kopplung basiert der von *Kruse und Chen* [70] 2007 vorgestellte Simulationsansatz. Hier wurde die Umströmung um das Fahrzeug im ersten Schritt mit FLUENT[®] numerisch simuliert. Im Anschluss an diese Berechnung wurde eine Euler-Lagrange'sche Particle Tracking Simulation mit dem von GM entwickelten Simulationscode WATER[®] durchgeführt. Das Potenzial zur Berechnung von Tropfenaufprallvorgängen auf trockenen und benetzten Wänden, für das Vereinigen von flüssigen Partikeln und das Benetzen von Oberflächen wurde gezeigt.

Die Eigenschaften von nichtnewton'schen Fluiden auf schräg angestellten Platten untersuchten *Haeri und Hashemabadi* [71] 2008 in Experiment und Simulation. Die im Experiment ermittelte Bewegung von hochviskosem Fluid auf unterschiedlich stark angestellten Platten bildete die Basis dieser Untersuchung, die im Anschluss mit OpenFOAM[®] 1.3 simuliert worden ist. Hierfür wurde ein um ein zusätzliches Potenz-Gesetz erweitertes VOF-Modell integriert. Es wurde ein Zusammenhang für die Filmhöhe in Abhängigkeit von Re , We

und Fr vorgestellt. Allerdings sind im Bereich der Fahrzeugverschmutzung Simulationen von hochviskosen Fluiden von untergeordnetem Interesse.

Außerhalb der bisher genannten, die Umströmung von Körpern betreffenden Ansätze zur Modellierung von Rinnsal- und Wandfilmmodellierung erzielten unter anderem *O'Rourke und Amsden* [72] 1996 im Bereich der Simulation von innermotorischen Strömungsvorgängen Fortschritte in der Wandfilmmodellierung mit KIVA-3[®]. Unter der Voraussetzung dünner Wandfilme, laminarer Filmbewegung und unter der Vernachlässigung von Splashing-Phänomenen wurde ein numerisches Berechnungsmodell für die Dynamik von flüssigen Wandfilmen im Bereich der Saugrohreinjection von Verbrennungsmotoren vorgestellt. Die Filmbewegung resultiert einerseits aus einer Scherkraft, die aus der Grenzschicht der über dem Film befindlichen Gasphase induziert wird; andererseits über den Impuls von auftreffendem Spray sowie über eine reibungsfreie Randbedingung an der Oberfläche. Weiterhin konnte die Teilung des Wandfilms an scharfen Kanten sowie der Wiedereintritt von Partikeln in die Gasphase realisiert werden.

2000 erweiterten *O'Rourke und Amsden* [73] ihr in [72] vorgestelltes Wandfilmmodell mit Berechnungsansätzen für die Tropfen-Wand-Interaktion nach *Yarin und Weiss* [57] sowie nach *Mundo et al.* [59]. Die in KIVA-3[®] implementierten Kriterien für das Splashing auf trockenen Oberflächen sind abhängig von der Filmdicke, der normalen Tropfengeschwindigkeit zur Wand, dem Tropfendurchmesser, der Fluidichte und Viskosität sowie der Oberflächenspannung des Fluids. Das Splashing Limit beim Aufprall auf benetzte Wände basiert auf der Einführung einer kritischen, Stoßwellengeschwindigkeit. Zudem verfeinerten *O'Rourke und Amsden* das Wandfilmmodell um einen Filmträgheitsterm sowie um die Berücksichtigung von Druckgradienten im Film aufgrund des Aufpralls eines Tropfens. Somit lässt sich die Filmausbreitung aufgrund von auftreffenden Tropfen zusätzlich berücksichtigen.

Ein Beitrag zur Untersuchung der
Kraftfahrzeugverschmutzung in Experiment und
Simulation

Spruß, I.

2016, XIX, 157 S. 123 Abb., 89 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-13028-2