

# Reflexionsverhalten von Interieur-Materialien im Kraftfahrzeug

Markus Schöneich; Vorentwicklung Innenlicht Daimler AG  
Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer; IPeG - Leibniz Universität Hannover  
Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann; LTI - Karlsruher Institut für Technologie

## Zusammenfassung

Die vom Kraftfahrzeuginsassen subjektiv wahrgenommene indirekte Beleuchtung ist das Resultat aus physio- und psychologischen Einflüssen des menschlichen Betrachters. Bei der Beleuchtungsvariante wird diese unter anderem von der Art der angeleuchteten Fläche und der Lichtquelle mitbestimmt. Zur Reduzierung der Variantenvielfalt bei der Fahrzeug-Innenlicht-Entwicklung werden oftmals baureihenübergreifende Leuchtmodule verwendet. Die emittierenden, leitenden und verteilenden Lichtmodule sind somit als annähernd konstant anzunehmen, währenddessen die angeleuchtete Fläche nahezu frei vom Kunden konfigurierbar ist und von der gewählten Interieur-Ausstattung abhängt.

Das nachfolgende Paper beschreibt eine mögliche Modellbildung für eine lichttechnische Oberflächencharakterisierung typischer texturierter Materialien im Fahrzeuginnenraum. Dabei setzt sich das Modell für die Oberfläche aus der spektralen Remissionseigenschaft, dem Streuverhalten sowie der Topologie zusammen. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt auf der Erstellung der sog. Wellenlinie der Topologie von genarbttem bzw. texturiertem Leder. Zur objektiven Messdatengenerierung des Modells werden hierbei, angefangen bei der klassischen BRDF bis hin zu genormten Flächencharakteristika – wie dem Flächenrauheitswert –, bereits vorhandene und meist genormte Kenngrößen verwendet. Somit wird im Vergleich zu den bisherigen Möglichkeiten eine Übertragbarkeit des Modells mit geringen Einflussfaktoren bezüglich der Datenermittlung, der Datenverarbeitung und der Datenextrahierung erreicht.

**Schlüsselwörter:** Variantenvielfalt; indirekte Beleuchtung; Simulation & Modellbildung; Fahrzeuglichttechnik; BRDF; Topologie; Remissionsspektrum

## 1 Einleitung

Die Anzahl an Lichtquellen zur Fahrzeuginnenraumbeleuchtung erwartet in den nächsten Jahren erneut einen großen Anstieg. Während im Jahr 2016 lt. Decker [1]



noch im Durchschnitt ein Kraftfahrzeug mit 50 LEDs ausgestattet war, so wird bereits für das Jahr 2021 eine Anzahl von rund 300 LEDs pro Fahrzeug prognostiziert. Ein Hintergrund der Wachstumsrate ist die steigende Designmöglichkeit durch multiple Integration von mehrfarbigen Leuchten oder Beleuchtung und die hohe Kundennachfrage für diese Sonder- oder auch Standardausstattung. Währenddessen klar abgegrenzte leuchtende Linien (sog. direkte Ambientebeleuchtung) designcharakteristische Züge unterstreichen, akzentuiert die indirekte Ambientebeleuchtung durch das lokale (linienförmige) Beleuchten von meist natürlichen Materialien mit weichen Kanten.

Dabei ist die vom Kraftfahrzeuginsassen subjektiv wahrgenommene, indirekte Beleuchtung – im Gegensatz zur direkten Beleuchtung – von weiteren Faktoren abhängig. Die physio- und psychologisch geprägte Wahrnehmung wird unter anderem von der Art der angeleuchteten Fläche und der Lichtquelle definiert. Als Lichtquelle werden derzeit sogenannte Multichannel-LEDs eingesetzt, die schmalbandig im roten, grünen und blauen Bereich Licht emittieren. Mittels additiver Farbmischung können nun beliebige Mischfarben innerhalb des sich aufspannenden Farbgamuts durch prozentuale Anteilsmischung angesteuert werden. In Kombination mit einem Lichtleiter und einer Streuoptik bilden diese das Lichtmodul, das zur Reduzierung der Variantenvielfalt bei der Fahrzeug Innenlicht Entwicklung oftmals baureihenübergreifend verwendet wird. Im Gegensatz hierzu ist die angeleuchtete Fläche nahezu frei innerhalb der möglichen Interieur-Ausstattungsvariante vom Fahrzeugbesteller konfigurierbar. So kann beispielsweise aus beigen, schwarzen, grauen oder auch gesättigten Farbtönen mit unterschiedlicher Narbung für die (Kunst-)Ledermaterialien gewählt werden. Die Folge ist ein ausstattungspezifisches, wahrnehmbares Erscheinungsbild der angeleuchteten Fläche trotz vergleichbarer Lichtquelle und Lichtleiter.

Damit für die indirekte Beleuchtung nicht sämtliche Varianten zur Bewertung und Validierung vollständig simulativ nachgestellt werden müssen, stellt sich die Frage, wie ein mögliches modulares Oberflächencharakteristikum für die angeleuchteten Flächen im Fahrzeuginnenraum aussehen könnte. Die folgenden Untersuchungen werden an verschiedenen Ledervarianten durchgeführt und sind auf Planware bzw. Folien übertragbar.

## 2 Stand der Technik

Heutzutage werden verschiedene Modelle eingesetzt, um die Reflexionen an Oberflächen zu beschreiben. Einige orientieren sich hauptsächlich am normativ gemessenen bidirektionalen Streuverhalten (BRDF) währenddessen andere anhand von werkzeugspezifischen Prozessmustern die Oberflächenkontur im CAD Modell abbilden. Ein Auszug derzeit gängiger Möglichkeiten wird im Folgenden diskutiert.

## 2.1 BRDF

Die Bidirektionale Reflektanz-Verteilungs-Funktion (engl.: bidirectional distribution function; kurz: BRDF) beschreibt das winkelabhängige Reflexionsverhalten eines elektromagnetischen Strahls. Der aus einem bestimmten Winkel auftreffende Strahl wird in verschiedene Richtungen anteilmäßig verteilt.

Diese Variante ist Stand der Technik und ermöglicht eine Beschreibung der globalen Streueigenschaften an der lokal gemessenen Oberfläche. Dabei kann zwischen Grauwert-BRDF und Farbwert-BRDF unterschieden werden. Die Farbwert BRDF inkludiert zusätzlich noch die spektralen Farbeigenschaften der gemessenen Oberfläche.

Nach Definition wird die BRDF für ein makroskopisch planares Material gemessen, wobei hierbei die BRDF nach [2] „weder allein auf Materialeigenschaften noch auf das Oberflächenrelief“ zurückzuführen ist. Die Diskussion, bei welcher Vergrößerung und unter welchen Voraussetzungen eine Flächenebene als planar angenommen werden kann, soll im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet werden.

Die Rahmenbedingungen zur Ermittlung der BRDF bieten folgende Möglichkeiten und sind nur begrenzt innerhalb einer übergreifenden Spezifikation oder Norm abgedeckt:

- Spektrum des einfallenden Strahls
- Auflösung der Winkel-Messrasterung
- Detektorgröße
- Größe und Intensität des einfallenden Strahls

Außerdem liegen noch technische und physikalische Rahmenbedingungen bei der realen Messung vor. So wird beispielsweise der aus dem Normal einfallende, kreisförmige Strahlkegel unter einem flachen Einfallswinkel zu einem Oval. Die einfallende Strahlungsleistung verteilt sich somit auf eine größere Fläche und variiert im flachen Winkel somit Axial.

Die folgende Abbildung zeigt den gleichen gemessenen lokalen Abschnitt eines Materials unter verschiedenen Größen des einfallenden Strahldurchmessers. Der Durchmesser der blau dargestellten BRDF liegt bei 8mm, der grauen bei 11mm und der roten bei 14mm.

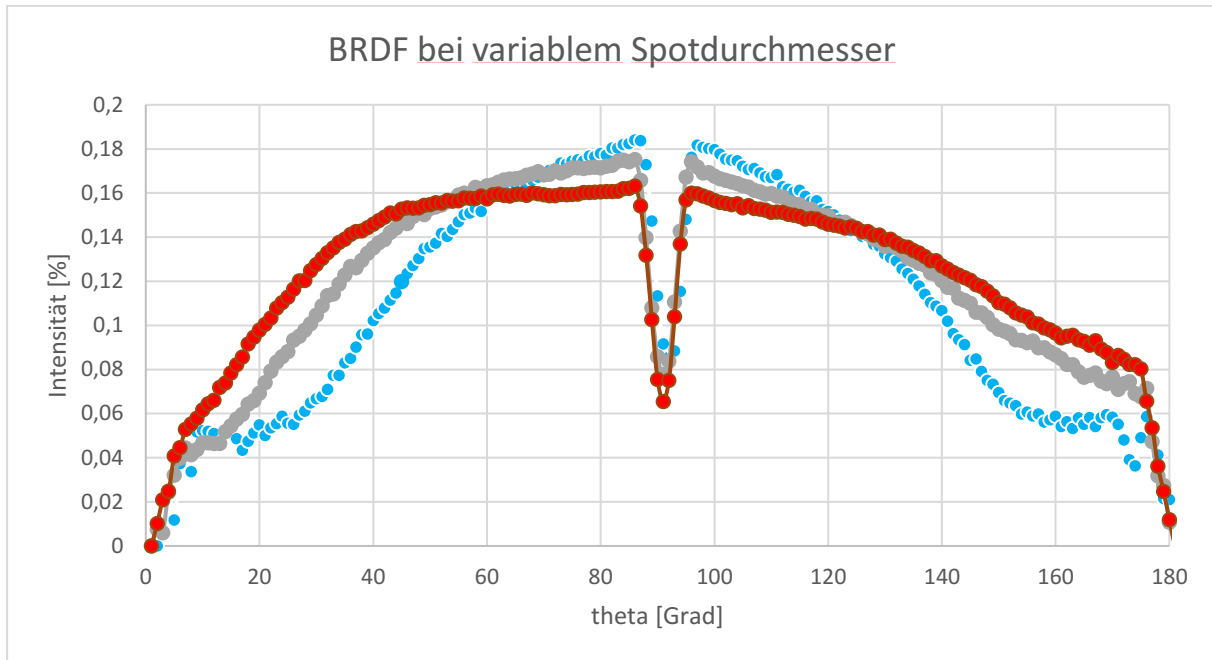


Abbildung 1: Schnittdarstellung BRDF eines Materials unter variablem Spottedurchmesser

Zu erkennen ist die deutliche Abweichung der gemessenen BRDF. Dabei wurde zur eindeutigeren Darstellung nur eine Schnittebene extrahiert. Eine Vergleichbarkeit einer Materialprobe bei Variation der Größe des Spottedurchmessers zeigt bereits den Einfluss einer einzelnen vorherig erwähnten Einflussgröße einer BRDF beispielhaft auf. Der Einschnitt (hier bei  $\theta=90^\circ$ ) in den Messdaten ist bedingt durch die Abschattung des Sensors aufgrund der Lichtquellenposition.

## 2.2 VDI 3400

Anstatt das Reflektanz-Verhalten an einer Oberfläche zu messen und dem Oberflächenmodell anschließend diese Streueigenschaften zuzuweisen, gibt es die Möglichkeit die Oberflächenkontur in den CAD Daten anzupassen. Diese Variante basiert auf der Norm nach VDI 3400 [3]. Diese beschreibt typische Rauigkeiten, die hauptsächlich werkzeugtechnischen Ursprungs sind und aus der elektroerosiven Bearbeitung von metallischen Oberflächen hervorgegangen sind.



Abbildung 2: Referenzmusterplatte nach VDI 3400 [4]

Je nach Erfahrungswert des Simulations-Durchführenden nimmt dieser einen vergleichbaren Wert für die genarbte Oberfläche an, die aber mit den eigentlichen topologischen Eigenschaften der realen Textur nicht korreliert. Bisher konnten keine Überschneidungen festgestellt werden, um eine Systematik zu erkennen und zu definieren. Die wahrgenommene Farbe der Oberfläche wird mit dieser Methode nicht berücksichtigt und muss additiv berücksichtigt werden. Abbildung 2 zeigt eine Referenzmusterplatte zur Bewertung der Oberflächen.

Diese Möglichkeit ist somit mit einem subjektiven Einflussfaktor behaftet, der nicht numerisch beziffert werden kann. Eine Vergleichbarkeit anhand von Ziffern ist an dieser Stelle somit nicht zielführend.

Nachdem der aktuelle Stand der Technik vorgestellt wurde, soll nun im Folgenden eine weitere Möglichkeit mittels objektiver Modellbildung aufgezeigt werden.

### 3 Beschreibung des Reflexionsverhaltens

Als Grundgedanke sollen verschiedene Messverfahren genutzt werden, um das Reflexionsverhalten von genarbten Oberflächen abzubilden. Dabei werden verschiedene Messverfahren und Charakteristika fusioniert und in ein differenziertes Modell aus gewählten Merkmalen übertragen. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert. Zum einen soll die Körperfarbe, die Narbung der Oberfläche und die Streueigenschaften differenziert und unabhängig voneinander ermittelt werden.

#### 3.1 Modellgrundgedanke

Die bisherigen Messmethoden und Modellvarianten haben meist keine Trennung der Eigenschaften ermöglicht, so dass beispielsweise bei der gewöhnlichen BRDF ebenfalls die Textur und die Farbe der Probe eine Rolle gespielt haben. Das neue Modell verfolgt folgenden schematisch aufgezeigten differenzierten Ansatz:

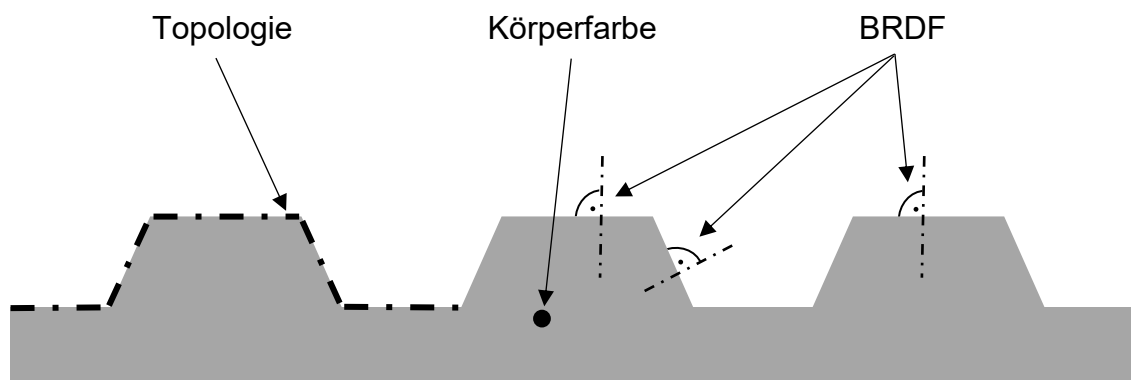


Abbildung 3: schematischer Aufbau Modellkonzept

Die Oberflächenkontur (Topologie) wird unabhängig von der BRDF und der Körperfarbe mit einem 3D Scanner gemessen. Die Körperfarbe wird als Remissionsspektrum winkelunabhängig gemessen und die Streueigenschaften (BRDF) entsprechen hauptsächlich dem des Grundmaterials und sind nicht durch die Topologie mitbestimmt.

### 3.2 Beschreibung der Körperfarbe

Im ersten Schritt soll die Körperfarbe des angeleuchteten Materials ermittelt werden. Gewöhnliche aktuelle Prozesse in der Automobilindustrie sehen diesbezüglich meist eine subjektive durch den menschlichen Betrachter durchgeführte Bewertung im Vordergrund. Hierzu wird ein Grundmuster erstellt, das unter bestimmten klimatischen Bedingungen vor äußeren und inneren Veränderungen möglichst konstant gehalten wird. Dieses Muster dient als Maßstab und somit hauptsächlich als Referenz zu einer anderen Probe. Unter definierten Winkeln wird das Referenzmuster mit der Probe in einer Abmusterungskabine verglichen. Innerhalb der Kabine wird die Musterplatte und die Referenzplatte beispielsweise von einer genormten D65 Lichtquelle beleuchtet. Der subjektive Einfluss durch die physiologische und psychologische, sowie zeitlich sich ändernde Leistungsfähigkeit des Bewerter bleibt bestehen und definiert die größten Einflussfaktoren der Variante.

#### 3.2.1 Konventionelle Farbmessgeräte

Um Farben objektiv messen zu können, können Farbmessgeräte zur numerischen Klassifikation verwendet werden. Hierbei wird unter genormten Einfallswinkel- und Ausfallswinkeln die Lichtspektränderung durch den Einfluss der Probe ermittelt. Die gemessene Farbe bzw. der gemessene Farbort wird somit in Bezug auf ein Referenzlichtspektrum bewertet bzw. gewichtet.

Es kann beispielsweise der gemessene Farbort einer durchgängig eingefärbten Probe aufgrund einer Narbung oder des Glanzes zu einem lokal unterschiedlichen Farbort führen. Dabei spielt der Messfleckdurchmesser des analysierten Probenstücks ebenso eine Rolle, wie die Geometrie und Ausprägung der Narbstruktur innerhalb des Analysebereichs. Dieses Messsystem eignet sich vorrangig für topologisch planare Flächen, da in diesem Rahmen hohe Wiederholgenauigkeiten erreicht werden können. Je gröber die vorhandene Narbung ist, desto geringer wird die Wiederholgenauigkeit der durchgeführten Analyse. Ein Vergleich einer Probe mit Narbung und ohne Narbung würde trotz nahezu identischen Grundwerkstoff bei gerichteter Messbeleuchtung zu einem unterschiedlichen Farbort führen. Diffuse Messbeleuchtung könnte diesen Einfluss reduzieren.

#### 3.2.2 Messung des Remissionsspektrums

Um eine Referenzlichtspektrun- und richtungsunabhängige Definition der Körperfarbe zu erhalten, soll das Remissionsspektrum ermittelt werden. Hierzu wird

die Probenoberfläche gleichmäßig aus allen Halbraumrichtungen mit einem möglichst vollständigen Lichtspektrum beleuchtet. So kann unabhängig von der beleuchtenden Lichtquelle ein sogenanntes Remissionsspektrum des Körpers ermittelt werden. Aufgrund der diffusen Beleuchtung besteht kein Topologieeinfluss.

Messtechnisch kann beispielsweise die Probenöffnung einer Ulbrichtkugel genutzt werden. Bei geschlossener Probenöffnung wird die Referenzlichtquelle eingeschaltet und auf einen Referenzwert gesetzt. Im zweiten Schritt wird der Probenöffnungsdeckel durch die Probenoberfläche ersetzt und die Referenzlichtquelle erneut eingeschaltet. Über die Differenzmethode aus geschlossener Kugel und Kugel mit Probenkörper wird nun das Remissionsspektrum ermittelt. Dieses Remissionsspektrum ist unabhängig von der Positionierung oder Ausrichtung der Probe, solange die Probenfläche sehr viel größer als die topologische Ausprägung ist.

### 3.2.3 Vergleich der Verfahren

Währenddessen konventionelle Farbmesssysteme eine Abweichung der Wiederholgenauigkeit der gemessenen Proben mit unterschiedlichen Narbausprägungen beim Normlichtspektrum D65 bei 10% erreicht haben, konnte bei den Remissionwertmessungen mittels der Ulbrichtkugel eine Abweichung von <1% erreicht werden. Die subjektive Bewertungsmethode lässt sich nicht in Zahlen fassen, ist aber mit einer nicht kalkulierbaren Abweichung der Wiederholgenauigkeit für das Farbmesssystem anzunehmen.

Es wird daher empfohlen das Remissionsspektrumverfahren als valides Klassifizierungsverfahren zu nutzen.

## 3.3 Ermittlung der Narbung/Textur

Ähnlich wie bei der Farbabmusterung steht bei der Narbabmusterung im Interieur aktuell der subjektive Vergleich in der Automobilindustrie im Vordergrund. Hintergrund ist erneut u.a. die Vergleichbarkeit gleicher numerischer Kennzahlen zweier Proben, die subjektiv wahrgenommen eine deutliche Varianz aufzeigen. Das zu untersuchende Interieur-Material ist Leder. Dieses wird je nach Ausstattungsvariante für unterschiedliche Bereiche im Fahrzeug verwendet. Das natürliche Material weist eine hohe Varianz auf, das unter anderem durch folgende Faktoren beeinflusst wird.

Einflussfaktoren des Grundmaterials:

- Rasse des Rindes
- Geschlecht
- Farbe des Felles
- Alter des Tieres

Einflussfaktoren bei der Verarbeitung:

- Absolute Schichtdicke
- Gleichmäßigkeit der Schichtdicke
- Temperatur
- Feuchtigkeit des Materials

Wiederum ergeben sich Faktoren, die eine Vergleichbarkeit zweier Proben untereinander im Fahrzeug oder als Probe zu einem Zeitpunkt begrenzen:

- (Luft-)Feuchtigkeitsgehalt
- Verbau-/Befestigungsvariante
- Umgebungshelligkeit
- Beleuchtungsrichtung u. -variante

Kunstledervarianten oder Planwaren als klassische Imitate des Leders orientieren sich hauptsächlich an der natürlichen Gestalt des Leders und dessen Verhalten. Die Einflussfaktoren sind reduziert, wodurch eine Übertragbarkeit auf diese Varianten ermöglicht wird. Zunächst soll auf die Vermessung der Oberflächenkontur eingegangen werden.

### 3.3.1 Datengenerierung

Die Fläche soll möglichst detailliert gemessen und klassifiziert werden. Da die verwendeten Materialien im Interieur meist eine weiche, haptische Eigenschaft aufweisen und eine Fläche und keine Kennlinie ermittelt werden soll, eignet sich ein taktiler Messverfahren nicht optimal.

Als Optimale Variante hat sich hierfür ein konfokales Laserscanning-Mikroskop ergeben. Aufgrund der hohen lokalen Auflösung, der Tiefenschärfe sowie der flächenhaften Betrachtung ermöglicht es das Messmittel in der 3D Ebene, präzisiert die Topologie zu scannen.

Folgende Abbildung zeigt die gescannte Aufnahme einer genarbten Struktur. Die Oberflächengeometrie setzt sich in diesem Zusammenhang aus einer Punktwolke zusammen. Die einzelnen Punkte sind das Resultat der detektierten Laserintensität.



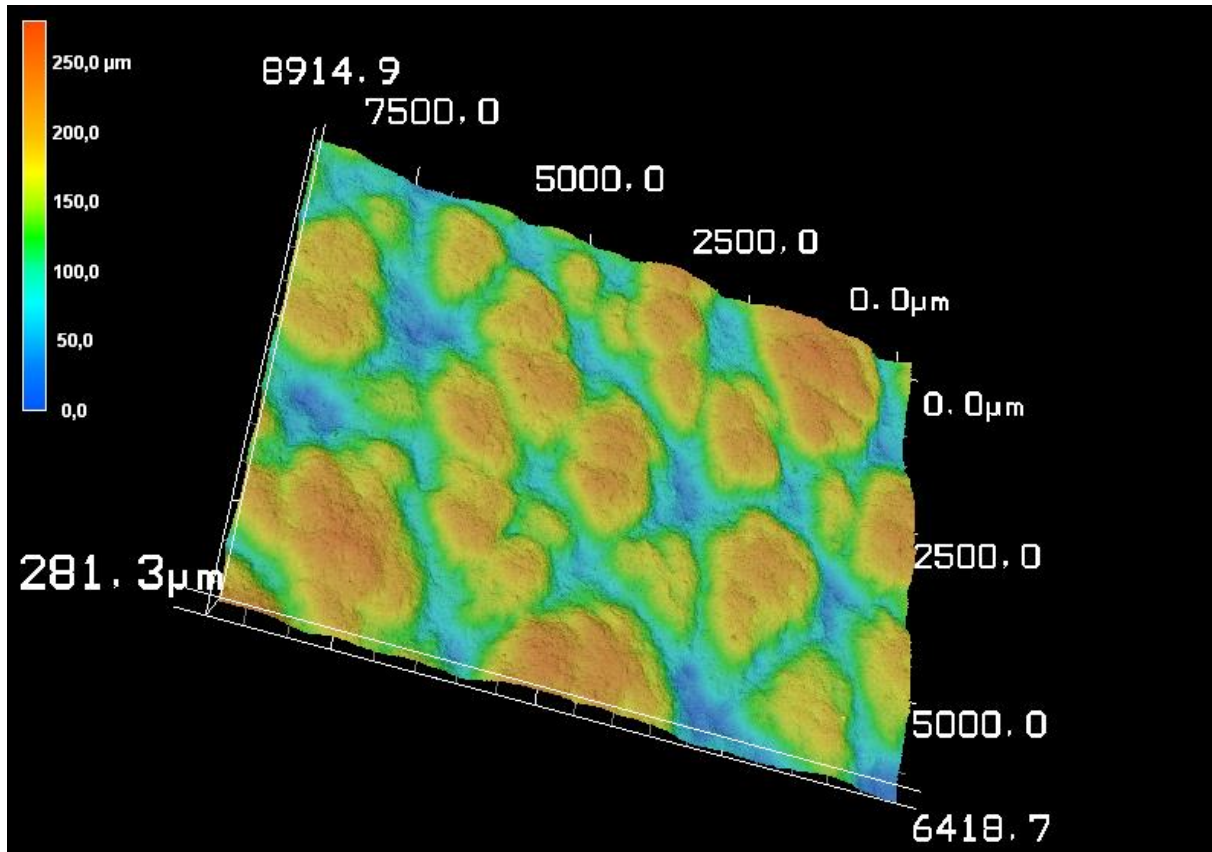


Abbildung 4: 3D Darstellung der Messdaten eines konfokalen Laserscanning-Mikroskopes

Die gemessenen Daten liegen somit als Rohdaten vor. Unter anderem bedingt durch die Einflussgrößen des Messinstrumentes und des Messprozesses ist eine Datenverarbeitung sowohl notwendig, um eine hohe Wiederholgenauigkeit der Messung zu erzielen, als auch um vergleichbare absolute Messdaten zu erhalten.

### 3.3.2 Datenverarbeitung

Trotz gleichem Messequipment entstehen große Varianzen, wenn die Messung wiederholt werden würde. So ist beispielsweise die zu untersuchende Probe möglichst planparallel gegenüber dem Messkopf auszurichten. Da sich die Messgrößen im Mikrometerbereich befinden, äußern sich auch bereits geringe Verunreinigungen in den Scanndaten. Außerdem zeigt sich bei dem natürlichen Material auch bereits der Effekt der Schichtdickenschwankungen. Das bedeutet, die Probe entspricht – übertrieben angenommen – einer Keilform, was es schwierig macht, diese parallel auszurichten.

Ein weiterer Effekt ist eine Wölbung oder Welligkeit der Probe. Diese Ausprägung kann bereits durch geringste Oberflächenspannungen entstehen, die u.a. durch einen Beschnitt der Probe oder durch Variation des Feuchtigkeitsgehaltes der Kollagenfasern ausgelöst werden kann.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um diese Effekte softwaretechnisch auszugleichen. Mittels einer Ebenenneigungs- oder Welligkeitskorrektur wird die Hauptnormalfläche angepasst.

Die Anpassung der Fläche ist notwendig, da sich viele Flächencharakteristika auf die Grundflächenebene beziehen. Wurde die Grundebene vorab nicht richtig korrigiert oder liegt diese schief, kann kein reproduzierbares Kriterium ermittelt werden. Auch die absoluten Messwerte sind von der Grundebene abhängig.

Folgende Abbildung zeigt beispielhaft als Falschfarbenbild einer verkippten Oberfläche. Die in den dunkel hinterlegten Schnittdarstellungen abgebildete orangene Linie zeigt die Ebenenneigungskorrektur, auf die die gesamte Fläche adaptiert wird.

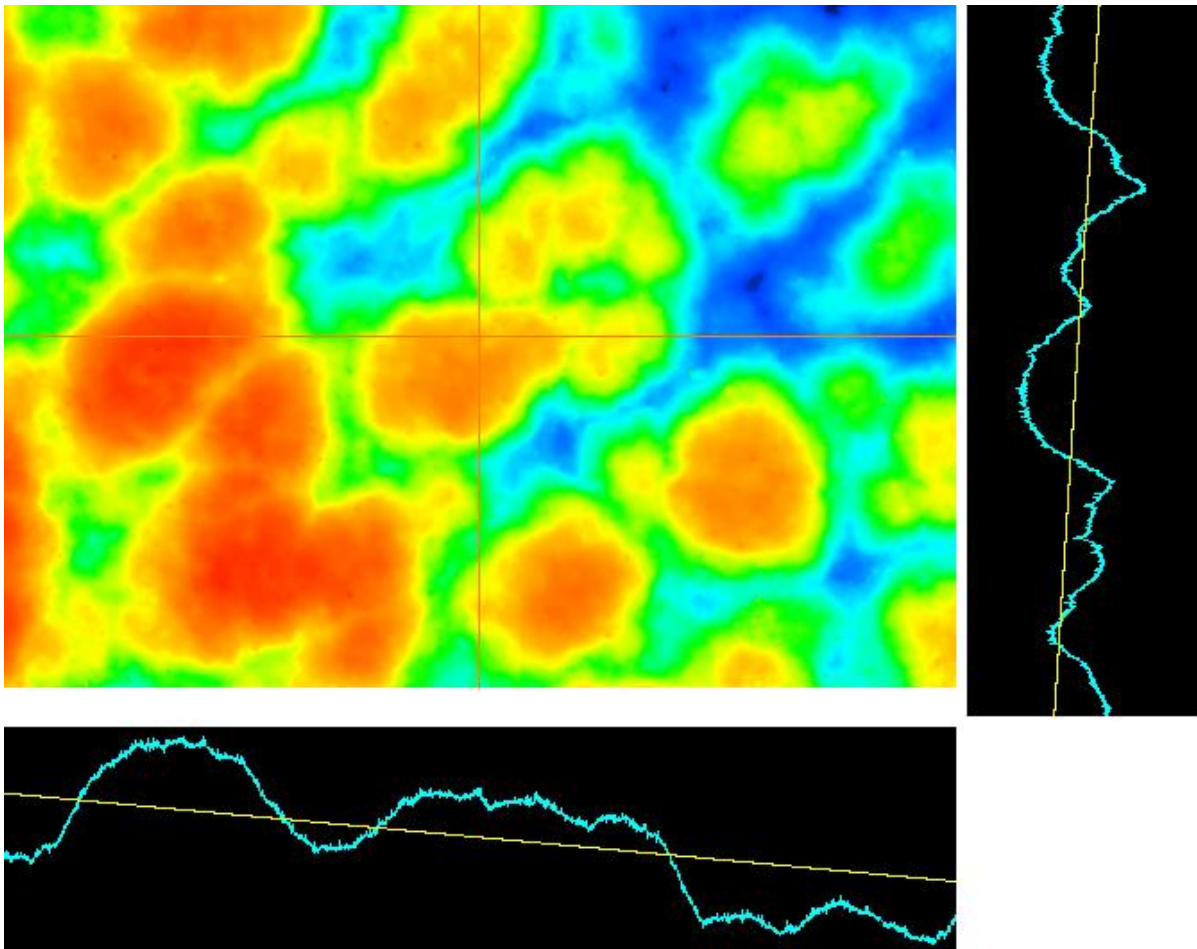


Abbildung 5: Ebenenneigungskorrektur über zwei Referenzlinien

Die Folge ist eine ausgerichtete Fläche. Für die analysierte Fläche kann nun eine Querprüfung durchgeführt werden. Prozessbedingt unterliegt die Narbung des Materials einem Walzprozess, der sich in einer Vorzugsrichtung der Flanken in eine Richtung äußert. Ist diese Vorzugsrichtung nicht mehr erkennbar, so kann durchaus die Korrektur nicht verbessernd ausgeführt worden sein.

Die Welligkeitskorrektur funktioniert nach dem ähnlichen Prinzip. Auf diese soll aber im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht weiter eingegangen werden.

### 3.3.3 Datenauswertung

Nachdem die Daten nun in einer vergleichbaren Ausgangsbasis vorliegen, kann mit der Auswertung begonnen werden.

Ziel ist es, gewöhnliche, bereits in der Norm definierte und beschriebene Messgrößen zu verwenden, um eine Übertragbarkeit auf andere Messsysteme zu ermöglichen. Einer der bekanntesten Kennwerte ist der sogenannte arithmetische Mittenrauwert  $R_a$ , der die Rauigkeit einer technischen Oberfläche beschreibt. Allerdings sind diese (Linien-)Werte, die beispielsweise aus der Abtastung einer Linie ermittelt werden, mit hoher Varianz behaftet. Mit steigender Analyse-Linienlänge kann über eine Mittelung der Kennwerte ein reproduzierbarer Wert ermittelt werden. Jedoch steigt mit der Länge wiederum die Varianz, die durch die Welligkeit bzw. Ebenenneigung nicht korrigiert werden konnte. Die Voraussetzungen hierzu sind – im Ideal – unendlich lange Analyselinien.

In der Praxis ist diese Anforderung aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nicht umzusetzen. Erfahrungstechnisch hat sich gezeigt, dass die Flächenkenngrößen in diesem Zusammenhang die validere Messgröße darstellen. Der Vorteil liegt darin, dass nahezu beliebig viele Kennlinien diese Fläche beschreiben werden und hierdurch die Varianz im Vergleich deutlich geringer ist.

Die Oberflächenkontur kann durch verschiedene Charakteristika beschrieben werden. Um die optimalen Kriterien zu identifizieren, wurden speziell erstellte Proben genutzt. Diese Proben sind aus einer eng benachbarten, zusammenhängenden Fläche geschnitten worden, die gemeinsam allen Prozessschritten und sonstigen intrinsischen und extrinsischen Einflüssen ausgesetzt waren. Lediglich im letzten Prozessschritt wurden sie mit unterschiedlichen Narbungen versehen. Anhand der Proben ist es gelungen, den Freiheitsgrad der Narbung zu separieren. Die untersuchten drei Proben bestehen aus drei deutlich wahrnehmbar unterschiedlichen Narbungen.

Im ersten Schritt wurden die Kriterien ausgeschlossen, die aufgrund der Ebenenneigungsvarianz zu ähnliche Kennzahlen liefern. Im zweiten Schritt wurden die Einflüsse der Wellenkorrektur nach dem ähnlichen Verfahren analysiert und diese Kriterien ebenfalls ausgeschlossen. Anschließend wurden die Kriterien ausgewählt, die eine periodische Struktur am besten beschreiben. Dabei wurde berücksichtigt, dass zur Simulation CAD-Modelle mit periodischen Strukturen am einfachsten und somit am schnellsten darzustellen sind und am wenigsten Rechenkapazität benötigen. Folgende Abbildung zeigt das daraus resultierende Modell aus Darstellungsgründen im 2D Schnitt.

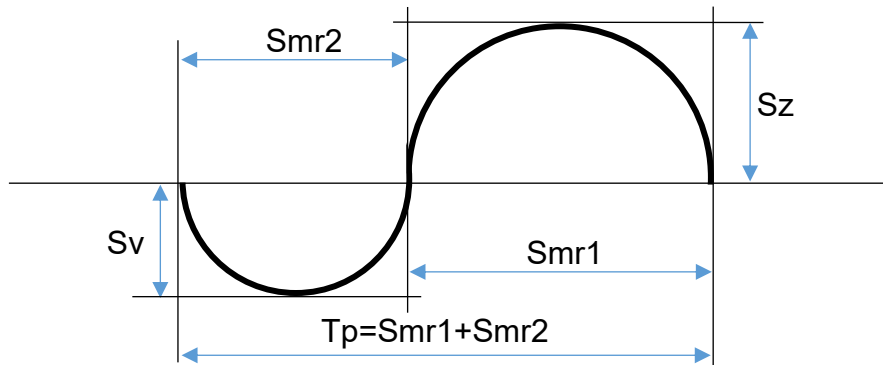


Abbildung 6: periodisches Modell der Topologie einer (Leder-) Narbung

Das Modell ermöglicht es, eine materialseitige Eigenabschattung auch unter flachen Einfallswinkeln zu berücksichtigen. Des Weiteren werden durch die Sinus- oder Cosinus-ähnliche, periodische Formgebung lokale, planare Plateaus vermieden, die bei der Narbung der Materialien nicht vorkommen. „Tp“ beschreibt die ermittelte Periodenlänge und definiert die absolute Länge aus Smr1 und Smr2.

### 3.4 Messung der Streueigenschaften

Im letzten Abschnitt werden nun die Streueigenschaften einer Oberfläche bzw. Grenzfläche zwischen zwei Medien ohne den Einfluss der soeben ermittelten genarbten Ausprägung ermittelt. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Als erste Option kann beispielsweise die BRDF des Grundmaterials (falls verfügbar) ohne der Narbung gemessen werden. Das heißt, das Grundmaterial wird vor dem Prozessieren der Narbung analysiert bzw. gemessen. Die Vermessung ist stark von der Auflösung bzw. Rasterung abhängig. Je höher die Auflösung, desto mehr Messpunkte definieren das BRDF-Modell. Zwischenwinkel werden anschließend interpoliert.

Eine weitere Option ist es, den BRDF Einfallspottdurchmesser so gering zu wählen, dass nur eine Fläche, die möglichst senkrecht zur Messanordnung steht, Bestandteil der BRDF-Messung ist. Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, ist diese Möglichkeit nur subjektiv möglich und mit einer hohen Varianz verbunden. Die weitere technische Herausforderung besteht darin, dass der BRDF Spot nicht beliebig klein gewählt werden kann.

Es wird sich an dieser Stelle für die erste Option entschieden, die bezüglich Wiederholgenauigkeit und absoluter Vergleichbarkeit die beste Möglichkeit darstellt.

Nachdem nun die drei Eingangsparameter ermittelt wurden, kann das modulartige Modell erstellt werden.

### 3.5 Modellierung der Oberfläche

Die Oberflächen können nun bezüglich ihrer Körperfarbe mit dem Remissionsspektrum unabhängig vom einfallenden Lichtspektrum definiert werden. In der Simulation kann hierfür das Volumen mit diesem Kurvenverlauf belegt werden. Auf der anderen Seite muss die Narbung durch die aufgezeigte Oberflächenkontur in den Geometriedaten berücksichtigt werden. Mittlerweile gibt es vorgegebene, Standard Texturen/Narbungen in den verschiedenen Simulations- oder CAD-Tools die ebenfalls eine Darstellung ermöglichen. Allerdings ähneln diese Varianten oftmals nicht den gewünschten Designmustern und sind daher für den Entwicklungsprozess nicht optimal. Im letzten Schritt wird die Oberflächenkontur bezüglich des variierenden Normals mit den ermittelten Streueigenschaften der BRDF belegt.

## 4 Zusammenfassung

Das modulartige Modell ermöglicht auf Basis von bisherigen Kenngrößen die genarbte Oberfläche abzubilden, insofern die Farbe der Oberfläche als gleichmäßig anzunehmen ist und die Narbung einer gewissen Systematik/Gleichmäßigkeit folgt. Somit können genarbte und gegerbte Lederarten genauso wie Planwaren oder Ledernachbildungen modelliert werden. Die Nachstellung von beispielsweise Holzzeichnungen mit lokalen Farbunterschieden aufgrund einer Maserung ist mit dem vorhandenen Modell somit nicht möglich.

Ein großer Vorteil ist die Reduzierung der Varianten bei der simulativen Bewertung vor allem im Entwicklungsprozess oder der frühzeitigen Interpretationsmöglichkeit von Messdaten im frühen Entwicklungsstadium ungenarbter Oberflächen (siehe auch die Veröffentlichung [5]). Hierbei werden oftmals nur einzelne Charakteristika einer Interieurausstattung geändert. So wird beispielsweise die Art der Narbung in nur einer Variante angeboten, währenddessen die Farbauswahl über mehrere Töne variieren kann. Die Modellierung ermöglicht damit eine Trennung von Körperfarbe und Textur und reduziert die Anzahl der Varianten zur Simulation. Des Weiteren wird durch die Minimierung der subjektiven Einflüsse und Parametrisierung der Eingangsgrößen ein übertragbares, stabiles Modell aufgestellt. Mit diesem Verfahren wird eine Simulation von natürlichen Texturen mit geringeren Abweichungen zur Realität als der gewöhnliche BRDF und der VDI-Ansatz ermöglicht.

## 5 References

- [1] Detlef Decker: „Innovationspotenzial in der automobilen Lichttechnik“; Beitrag zur Tagung - Optische Technologien in der Automobilindustrie; Karlsruhe; 2018
- [2] Jürgen Beyerer et al.: „Automatische Sichtprüfung“; Kapitel 4; ISBN 978-3-642-23965-6
- [3] VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren; Band 2: Elektroerosive Bearbeitung; Begriffe, Verfahren, Anwendung (VDI 3400: 1975-06)
- [4] CAD Forum; <https://ww3.cad.de/foren/ubb/Forum2/HTML/019829.shtml>; 03.04.2019
- [5] Markus Schöneich; „Auswirkungen von Mesostrukturen im Fahrzeuginnenraum auf die Reflexionseigenschaften“; Tagung Optische Technologien in der Automobilindustrie; Karlsruhe; 2018