

Analyse der Ursachen des Stick-Slip-Effekts an Bahnenerzeugnissen für die Anwendung im Fahrzeuginnenraum am Beispiel von PVC

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor - Ingenieur
Dr.-Ing.

vorgelegt

von MEng. Dipl.-Ing. José Mácio Cavalcante de Sousa

geboren am 14.03.1975

in Pombal-PB / Brasilien

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Eberhard Müller, Freiberg
Prof. Dr. rer. nat. Michael Stoll, Freiberg
Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Hans-Jürgen Daams, Mönchengladbach

Tag der Verleihung: 26.07.2007

*Life may grant me the serenity
to accept the things I cannot change,
the courage to change the things I can,
and wisdom to know the difference.*

*Living one day at a time
Enjoying one moment at a time
Accepting hardships as the pathway to peace
Taking this sinful world
as it is, not as I would have it*

*Adapted from "The Serenity Prayer"
Reinhold Niebuhr (1892 – 1971)*

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2007 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am FILK – Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen gGmbH in Verbindung mit dem Institut für Keramische Werkstoffe der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Hiermit möchte ich mich bei meinen Betreuer, Herrn Dr. rer. nat. habil. Eberhard Müller und Herrn Dr. rer. nat. Michael Stoll für die vielen wertvollen Hinweise, Anregungen und Diskussionen recht herzlich bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des FILK für ihre Hilfsbereitschaft, technische Unterstützung, Ideen und Vorschlägen und vor allem für ihr freundliches Entgegenkommen in jeglicher Art. Ganz besonders möchte ich mich bei der Frau Dr. Mädler und bei meinen Arbeitskollegen, Carina Petzold, Gabrielle Bieneck, Martin Strangfeld, Christiane Waldmann, Sarah Porsche, Anja Weiße, Romy Berndt, Jörg Hunger und Felix Rüdiger für ihre Engagement zur Vervollständigung dieser Arbeit bedanken.

Danke an die Frau Dr. Corina Dunger und Frau Dipl.-Kff. Edda Paul, die Koordinatorinnen des PHD-Programms, sowohl für die fachliche als auch für die persönliche Unterstützung und für die Hilfsbereitschaft.

Mein besonderer Dank gilt meinem Partner Alexandre Tadeu da Silva Alves für seine liebevolle Unterstützung.

Danke an meiner Familie, die trotz der Zeit und des Abstandes immer an meiner Seite steht.

Danke an meinem Freund Silvio Valeriano de Mesquita für die Kraft und Motivation.

Danke an alle Freunden und Bekannten, die auf einer oder anderer Art für die Verwirklichung dieser Arbeit beigetragen haben.

Herzlichen Dank!

José Mácio Cavalcante de Sousa

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	8
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	13
SYMBOLVERZEICHNIS	13
1 KAPITEL	17
1.1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	17
2 KAPITEL	19
2.1 GRUNDLAGE DER TRIBOLOGIE	19
2.2 REIBUNG UND DIE KLASSISCHEN REIBUNGSGESETZEN.....	20
2.3 ENTWICKLUNG DER REIBUNGSMODELLE	23
2.4 REIBUNGSMECHANISMEN	27
2.4.1 ADHÄSION	27
2.4.2 KONTAKTGEOMETRIE UND KONTAKTMECHANIK.....	30
2.4.2.1 TECHNISCHE OBERFLÄCHEN.....	30
2.4.2.2 ELASTISCHER KONTAKT	33
2.4.2.3 VISKOELASTISCHER KONTAKT	33
2.4.2.4 PLASTISCHER KONTAKT	35
2.5 ADHÄSIVE UND DEFORMATIVE KONTAKTVORGÄNGE.....	35
2.6 DER STICK-SLIP-EFFEKT	38
2.6.1 DIE BEWEGUNGSGLEICHUNGEN.....	40
2.7 DURCH DAS STICK-SLIP-PHÄNOMEN ERZEUGTE STÖRGERÄUSCHE.....	47
3 KAPITEL	51
3.1 BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN MESSMETHODEN UND -GERÄTEN	51
3.1.1 STICK-SLIP-PRÜFSTAND	51
3.1.2 FRICTION TESTER.....	54
3.1.3 RHEOMETER.....	54
3.1.4 UNIVERSAL SURFACE TESTER (UST®).....	56
3.1.4.1 RAUHEIT	57

3.1.4.2	KOMPRESSIBILITÄT UND DYNAMISCHES DEFORMATIONSVERHALTEN AM UST®	58
3.1.5	OBERFLÄCHENSPANNUNG	60
3.1.6	BREITENBEZOGENE BIEGESTEIFIGKEIT.....	63
3.1.7	IR-SPEKTROSKOPIE.....	65
3.1.8	RASTERELEKTRONENMIKROSKOP	66
4	KAPITEL	68
4.1	PHASE I: UNTERSUCHUNG AN AUTOMOBILLEDERN	68
4.1.1	BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN MATERIALIEN, VERARBEITUNGS- METHODEN UND ERHALTENEN ERGEBNISSE	68
4.1.2	STICK-SLIP-NEIGUNG.....	68
4.1.3	ERGEBNISSE DER SCHERDEFORMATION AM RHEOMETER.....	70
4.1.4	BEURTEILUNG DER OBERFLÄCHENSPANNUNG UND DER RAUHEIT	71
4.1.5	ZUSÄTZLICHE METHODE ZUR WEITEREN CHARAKTERISIERUNG DES DEFORMATIONSVERHALTENS	74
4.1.6	KOMPRESSIBILITÄT (STATISCHES) UND DYNAMISCHES DEFORMATIONSVERHALTEN AM UST®	75
4.1.7	BREITENBEZOGEN BIEGESTEIFIGKEIT	76
4.1.8	REM-AUFNAHME.....	77
4.2	PHASE II: UNTERSUCHUNGEN AN DEN HERGESTELLTEN PVC-FOLIEN ..	81
4.2.1	WAHL EINES GEEIGNETEN MATERIALS ZUR SYSTEMATISCHEN UNTERSUCHUNG DES STICK-SLIP-EFFEKTES.....	81
4.2.2	BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN MATERIALIEN, VERARBEITUNGS- METHODEN UND ERHALTENEN ERGEBNISSE	85
4.2.3	MATERIALIEN VERWENDET AN DER ZWEITEN ETAPPE	85
4.2.4	BESCHREIBUNG DER EINZELNEN VARIANTEN DER PVC-FOLIEN	87
4.2.5	BESCHREIBUNG DES LACKIERUNGSPROZESSES UND DER LACKIERTEN PVC-FOLIEN.....	91
4.2.6	BESCHREIBUNG DES PRÄGEPROZESSES UND DER GEPRÄGTEN PVC- FOLIEN	94
4.2.7	KONTROLLE DER ÜBERTRAGUNG DER NARBUNGEN: RAUHEIT UND 3D- TOPOGRAPHIE.....	95
4.2.8	ÜBERBLICK ÜBER DAS GESAMTE SPEKTRUM AN VARIANTEN DER PVC- FOLIE.....	96

4.2.9	PROBENPRÄPARATION	99
5	KAPITEL	100
5.1	ALLGEMEINE BEURTEILUNG DER EIGENSCHAFTEN DER HERGESTELLTEN PVC-FOLIEN.....	100
5.1.1	STICK-SLIP-NEIGUNG (RISIKOPRIORITÄTSZAHL)	100
5.1.2	REIBUNGSKOEFFIZIENT	105
5.1.3	SCHERDEFORMATION	109
5.1.4	KOMPRESSIBILITÄT UND DYNAMISCHE DEFORMATION	113
5.1.5	BREITENBEZOGENE BIEGESTEIFIGKEIT.....	117
5.1.6	RAUHEIT	121
5.1.7	OBERFLÄCHENSPANNUNG.....	123
5.1.8	ERSTELLUNG MATHEMATISCH FORMULIERBARER KORRELATIONEN .	124
5.2	EIGENSCHAFTSBEZOGENE ANALYSE DES STICK-SLIP-EFFEKTES DER PVC-FOLIEN.....	129
5.2.1	BETRACHTUNG DES EINFLUSSES DES DEFORMATIONSVERHALTENS BEI GLEICHEN OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN	130
5.2.1.1	STANDARDFOLIE (STD 0,5 UND STD 1,0).....	130
5.2.1.2	STANDARDFOLIE UND FASERVERSTÄRKTE FOLIE I (STD 0,5 + 05CF UND STD 0,5 + 10CF)	133
5.2.1.3	STANDARDFOLIE UND FASERVERSTÄRKTE FOLIE II (STD 1,0 + 05CF UND STD 1,0 + 10CF)	135
5.2.1.4	STANDARDFOLIE UND KASCHIERTE FOLIE (STD 0,5 + TL UND STD 1,0 + TL).....	137
5.2.2	BETRACHTUNG DER OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN.....	139
5.2.2.1	STANDARDFOLIE UND GEPRÄGTE FOLIE (STD 1,0 + OP1 UND STD 1,0 + OP2).....	140
5.2.2.2	STANDARDFOLIE UND LACKIERTE FOLIE (STD 1,0 + OL1 UND STD 1,0 + OL2)	143
5.2.3	ÄNDERUNG DER STRUKTUR UND DER OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN	147
5.2.3.1	STANDARDFOLIE UND GESCHÄUMTE FOLIE I (SCH 1,0).....	147
5.2.3.2	STANDARDFOLIE UND GESCHÄUMTE FOLIEN II (SCH 4,0 UND SCH 6,0)	150

5.2.3.3	STANDARDFOLIE UND HINTERSCHÄUMTE FOLIEN (STD 0,1 + SCH 4,0 UND STD 0,1 + SCH 6,0)	151
6	KAPITEL	154
6.1	ZUSAMMENFASSUNG	154
7	KAPITEL	158
7.1	AUSSICHTEN UND VORSCHLÄGE FÜR WEITERFÜHRENDE ARBEITEN..	158
8	LITERATURVERZEICHNIS	159
9	GLOSSAR	164

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1: Grundlegende Elemente tribotechnischer Systeme	19
Abb. 2.2: Evolution des Konzepts der Reibung [Rab 1956].....	22
Abb. 2.3: Adhäsive und deformative Anteile der Gleitreibungszahl in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit: a) Werkstoffen mit hoher und b) mit niedriger Streckgrenze [Erh 1980].....	23
Abb. 2.4: Chronologische Entwicklung der Reibungsmodelle [Ols 1997] [Ser 2004]	24
Abb. 2.5: Reibkennlinie [Klo 2002].....	26
Abb. 2.6: Reibungsmodelle für die oben gezeigte Gleichung (Formel 2.6) mit unterschiedlichen Werten von η [Ser 2004] [Klo 2002]	27
Abb. 2.7: Berührung zweier mit Adsorptionsfilmen behafteten Festkörperphasengrenzen a) bei statischer Berührung, b) nach gegenseitigem Gleiten. An den Kontaktstellen sind die Adsorptionsschichten aufgerissen [Wei 1989]	32
Abb. 2.8: Viskoelastische (volumenbezogene) Deformation, gekennzeichnet durch das rheologische Burger-Model [Czi 1992]	34
Abb. 2.9: Modellierung der Deformationskomponente [Ode 1985].....	38
Abb. 2.10: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Stick-Slip-Bewegung [Rab 1956]	39
Abb. 2.11: Illustration der Reibungsverhalten: a) konstantes Gleiten, b) regelmäßiges und c) unregelmäßiges Stick-Slip-Verhalten	40
Abb. 2.12: Verlauf von $x(t)$ mit den Haft- und Gleitphasen [Lib 2005]	43
Abb. 2.13: Prinzip des abstandsabhängigen Stick-Slip-Modell [Ber 1996].....	44
Abb. 2.14: Prinzip geschwindigkeitsabhängiges Modell [Per 1998]	45
Abb. 3.1: Aufbau und Messprinzip des Stick-Slip-Prüfstandes mit Bewegungs- und Kraftereinheit (F_N = Normalkraft, F_R = Reibkraft und v = Schlittengeschwindigkeit)	52
Abb. 3.2: Idealisierter Kraft- $y(t)$, Weg- $x(t)$ und Beschleunigungsverlauf $a(t)$ beim Auftreten des Stick-Slip-Effektes am Stick-Slip-Prüfstand in Anlehnung an [Har 1983].....	52
Abb. 3.3: Das Platte-Platte-Modell für Scherversuche und die Verformung der Messprobe im Scherspalt [Sch 2000]	54

Abb. 3.4: Schematische Darstellung des Platte-Platte-Messsystems am Rheometer	55
Abb. 3.5: Illustration zur allgemeinen Definition des a) arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) b) und der mittleren Rautiefe (R_z).	57
Abb. 3.6: Messung der Kompressibilität (statische Deformation) und der dynamischen Deformation am UST®	58
Abb. 3.7: Auswertung der a) Kompressibilität (statische Deformation) und der b) dynamischen Deformation am UST®	59
Abb. 3.8: Abhängigkeit der Eindringtiefe mit der Normalkraft ermittelt am UST® für zwei Kunststofffolien	59
Abb. 3.9: Entstehung der Oberflächenspannung eines Flüssigkeitstropfen [Erh 1980]	60
Abb. 3.10: Kräfteverteilung am Dreiphasenkontakt eines Flüssigkeitstropfens	60
Abb. 3.11: Illustration des Funktionsprinzips eines Rasterelektronenmikroskops	67
Abb. 4.1: Reibungskoeffizienten der Lederproben der Gruppen A und B	69
Abb. 4.2: Scherdeformation der Lederproben der Gruppen A und B	71
Abb. 4.3: FTIR-Spektren der Automobilleder der Gruppe A	73
Abb. 4.4: FTIR-Spektren der Automobilleder der Gruppe B	73
Abb. 4.5: Statische Deformation (Kompressibilität) der Ledergruppen A und B am UST® ...	75
Abb. 4.6: Dynamische Deformation der Ledergruppen A und B am UST®	76
Abb. 4.7: Breitenbezogene Biegesteifigkeit und Rauheit der Automobilleder	77
Abb. 4.8: Aufnahmen der Lederproben aus der a) Gruppe A und b) Gruppe B: Unterschiede an der Oberflächenbeschaffenheit	78
Abb. 4.9: Aufnahmen der Lederproben aus der a) Gruppe A und b) Gruppe B: Unterschiede an der inneren Gestaltung der Zurichtung	78
Abb. 4.10: Aufnahmen der Lederproben aus der a) Gruppe A und b) Gruppe B: Beobachtung des oberflächlichen Deformationsvermögens	79
Abb. 4.11: Aufnahmen der Lederproben der Gruppe A: Beobachtung der oberflächlichen Kontaktstelle	79
Abb. 4.12: Organigramm mit der geplanten Vorgehensweise zur Untersuchung des Stick- Slip-Verhaltens von PVC-Folien	83
Abb. 4.13: Skizze der Beschichtungsanlage angewendet zur Herstellung der PVC-Folie	86
Abb. 4.14: REM-Aufnahme der Standardfolie aus PVC	87

Abb. 4.15: Querschnitt der geschäumten PVC-Folie.....	88
Abb. 4.16: Querschnitt der Schaum-Folie-Verbunde aus PVC.....	88
Abb. 4.17: Häufigkeitsverteilung der Länge der angewendeten Kohlenstofffasern	89
Abb. 4.18: REM-Aufnahme der Faser-Folie-Verbunde aus PVC	90
Abb. 4.19: REM-Aufnahme der Textil-Folie-Verbunde aus	90
Abb. 4.20: a) Spiralrakel und b) schematische Darstellung [Eri 2007]	92
Abb. 4.21: Model zur Berechnung der resultierenden Schichtdicke des Lackes.....	92
Abb. 4.22: Model zur Berechnung der resultierenden Schichtdicke des Lackes.....	93
Abb. 4.23: Skizze der Presse mit der Anordnung zur Prägung der PVC-Folien.....	94
Abb. 4.24: Soll-, Ist-Temperatur und Druck angewendet zur Prägung der PVC-Folien	95
Abb. 4.25: Analyse der Übertragung beider Oberflächenprofile auf die PVC-Folien.....	95
Abb. 4.26: 3D Illustration des geprägten Oberflächenprofils 1	96
Abb. 4.27: 3D Illustration des geprägten Oberflächenprofils 2	96
Abb. 4.28: Schematische Darstellung sämtlicher hergestellten Varianten der PVC-Folie.....	98
Abb. 5.1: Einteilung der PVC-Folie nach dem Stick-Slip-Effekt (für die Erklärung der Abkürzungen siehe Abb. 4.28 Seite 90).....	101
Abb. 5.2: Darstellung des Aufbaus der Textil-Folie-Verbunde a) 0,5 mm und b) 1,0 mm Dicke	102
Abb. 5.3: Mechanische Eigenschaften der verstärkten PVC-Folie: a) Zugfestigkeit und b) Elastizitätsmodul.....	103
Abb. 5.4: REM-Aufnahmen der faserverstärkten PVC-Folie: a) Querschnitt und b) Draufsicht einer Bruchfläche.....	104
Abb. 5.5: REM-Aufnahmen der faserverstärkten PVC-Folie: Draufsicht einer Bruchfläche	104
Abb. 5.6: Reibungskoeffizient der PVC-Folien	106
Abb. 5.7: Reibungskoeffizient und Stick-Slip-Neigung der kaschierten PVC-Folien	107
Abb. 5.8: Reibungskoeffizient der faserverstärkten PVC-Folien.....	108
Abb. 5.9: Reibungskoeffizienten und Rauheit der geprägten Folien	109
Abb. 5.10: Scherdeformation der PVC-Folien	110
Abb. 5.11: REM-Aufnahmen der Schaumfolie.....	111
Abb. 5.12: Scherdeformation und Rauheit der geprägten Folie und der STD 1,0.....	113
Abb. 5.13: Kompressibilität und dynamische Deformation	113

Abb. 5.14: Statisches Verformungsverhalten der STD 0,5 und STD 1,0.....	114
Abb. 5.15: Verformungsverhalten der faserverstärkten STD 0,5 und STD 1,0.....	115
Abb. 5.16: Verformungsverhalten der geprägten STD 1,0	116
Abb. 5.17: Schematische Darstellung unterschiedlich rauher Oberflächen.....	117
Abb. 5.18: Biegesteifigkeit der PVC-Folien.....	118
Abb. 5.19: Biegesteifigkeit der faserverstärkten PVC-Folien.....	119
Abb. 5.20: Biegesteifigkeit der geprägten PVC-Folien	120
Abb. 5.21: Darstellung des Einflusses der Prägung auf die Biegesteifigkeit	120
Abb. 5.22: Rauheit der PVC-Folien	122
Abb. 5.23: Oberflächenspannung der PVC-Folien	123
Abb. 5.24: Berechneter SSE-Faktor der gesamten PVC-Folien	127
Abb. 5.25: Zusammenhang zwischen dem SSE-Faktor und der RPZ.....	128
Abb. 5.26: Varianten der PVC-Folien mit gleichen Oberflächenmerkmalen.....	130
Abb. 5.27: Eigenschaftsprofil von STD 0,5 und STD 1,0.....	131
Abb. 5.28: Verformungs-(a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5 und STD 1,0.....	131
Abb. 5.29: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF	133
Abb. 5.30: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5+ 05CF und STD 0,5 + 10CF.....	134
Abb. 5.31: Stick-Slip-Neigung und Scherdeformation der STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF	134
Abb. 5.32: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF	135
Abb. 5.33: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF.....	136
Abb. 5.34: Stick-Slip-Neigung und Scherdeformation der STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF	136
Abb. 5.35: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL.....	137
Abb. 5.36: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL.....	138
Abb. 5.37: Varianten der PVC-Folien mit gleichem Grundmaterial	139

Abb. 5.38: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2	141
Abb. 5.39: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2	142
Abb. 5.40: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2	143
Abb. 5.41: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2	144
Abb. 5.42: FTIR-Spektren der PVC-Folien	145
Abb. 5.43: Querschnitt der lackierten PVC-Folien: a) STD 1,0 + OL1 und b) STD 1,0 + OL2	146
Abb. 5.44: Varianten der PVC-Folien mit unterschiedlichen Oberfläche und Grundmaterial	147
Abb. 5.45: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0 und SCH 1,0	148
Abb. 5.46: Vergleich des Verformungsvorganges unter Normalbelastung zwischen a) der Standardfolie (STD 1,0) und einer b) und c) geschäumten Folie	148
Abb. 5.47: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 1,0 und SCH 1,0	149
Abb. 5.48: Illustration des möglichen Verformungsvorganges der geschäumten PVC-Varianten am Stick-Slip-Prüfstand (F_N = Normalkraft, F_R = Reibkraft)	150
Abb. 5.49: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, SCH 4,0 und SCH 6,0	150
Abb. 5.50: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, SCH 4,0 und SCH 6,0	151
Abb. 5.51: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0	152
Abb. 5.52: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 1,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0	152

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ATR	Abgeschwächte Totalreflexion
DMS	Dehnmessstreifen
FPP	Glasfaserverstärktes Polypropylen
PC	Polycarbonat
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
REM	Rasterelektronenmikroskop
RPZ	Risikoprioritätszahl
SMAC	Styrol-Maleinsäure-Copolymer
SSE	Stick-Slip-Effekt
TPO	Thermoplastische Polyolefine
UST [®]	Universal Surface Tester

SYMBOLVERZEICHNIS

$a(t)$	Beschleunigungsfunktion [mm/s ²]
$A(\tilde{\nu})$	Absorbanz
A_{Lack}	mit Lack ausfüllbare Fläche [mm ²]
A_{oi}	Fläche oberhalb der Bezugstrecke [mm ²]
A_{ui}	Fläche unterhalb der Bezugstrecke [mm ²]
A_{real}	reale Kontaktfläche [m ²]
b	Breite [mm]
c	Federkonstante [N/mm]
d	Durchmesser [mm]
D_c	kritischer Abstand [mm]
E^*	reduzierter Elastizitätsmodul [N/mm ²]
E_0	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
E_n	Elastizitätsmodul der Kontaktpartner n

E_r	Relaxationsmodul [N/mm ²]
F_A	Trenn- /Adhäsionskraft [N]
F_B	Biegekraft [N]
F_C	Coulomb'sche Reibkraft [N]
F_D	Deformationskraft [N]
F_E	externe Kraft [N]
F_F	Federkraft [N]
F_H	Haftreibungskraft [N]
F_N	Normalkraft/-belastung [N]
F_R	Reibkraft [N]
F_S	Scherkraft [N]
$F_{Stribeck}$	Stribeckfunktion für die Reibkraft [N]
F_V	viskose Reibkraft [N]
G	Schubmodul [N/mm ²]
h	Spalthöhe [mm]
Δh	Eindrucktiefe [μ m]
ΔH_{gesamt}	Gesamteindrucktiefe [μ m]
H	Härte [N/m ²]
i	Index
I	Flächenträgheitsmoment [mm ⁴]
$I(\tilde{\nu})$	Ausgangsintensität des Lichtstrahls im Detektor
$I_0(\tilde{\nu})$	Eingangsintensität des Lichtstrahls
K	Formkonstante [m]
Δl	Änderung der Länge [m]
l	Länge [mm]
l_m	Bezugstrecke [mm]
n	Index
r	Radius [mm]
R	Radius [mm]
R_a	arithmetische Mittenrauwert [μ m]

R_Z	gemittelte Rautiefe [μm]
s	Weg [mm]
S	breitenbezogene Biegesteifigkeit [N mm]
$\text{sgn}()$	Signum-Funktion
t	Zeit [s]
T	Periode [s]
$T(\tilde{\nu})$	Transmittanz
v	Geschwindigkeit [m/s]
v_r	Relativgeschwindigkeit [m/s]
v_{Stribeck}	Stribeckgeschwindigkeit [m/s]
W_a	Adhäsionsenergie / -arbeit pro Flächeneinheit [J]
x	Weg [mm]
$x(t)$	Wegfunktion [mm]
$y(t)$	Wegfunktion [mm]
$y(x)$	Wegfunktion [mm]
Z_i	Einzelrautiefen [μm]
a	Adhäsionskoeffizient
β	mittlerer Radius der Rauheitshügel [m]
γ	Schubspannung [1]
γ^d	dispersiver Anteil der Oberflächenspannung [mN/m]
γ_l^d	dispersiver Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] der Flüssigkeit
γ_s^d	dispersiver Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] des Festkörpers
γ_l	Oberflächenspannung der flüssigen Phase [mN/m]
γ_n	Oberflächenenergie / -spannung [mN/m] eines Elements n
γ^p	polarer Anteil der Oberflächenspannung [mN/m]
γ_l^p	polarer Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] der Flüssigkeit
γ_s^p	polarer Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] des Festkörpers
γ_s	Oberflächenspannung der festen Phase [mN/m]
γ_{sl}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoff [mN/m]

δ_S	geometrischer Faktor
ε	Deformation
ε_{el}	elastische Deformation
ε_r	viskoelastische Deformation
ε_{ges}	Gesamtdeformation
ε_v	viskoplastische Deformation
η	dynamische Viskosität [Pa·s]
η_0	(viskoplastische Komponente) Viskosität [Pa·s]
η_r	Viskosität [Pa·s]
θ	Winkel [°]
μ	Reibungskoeffizient/ -zahl
μ_{adh}	Adhäsionskomponente des Reibungskoeffizienten
μ_{def}	Deformationskomponente des Reibungskoeffizienten
μ_{ges}	gesamter Reibungskoeffizient
μ_D	dynamischer Reibungskoeffizient/ -zahl
μ_S	statischer Reibungskoeffizient/ -zahl
$\tilde{\nu}$	Wellenzahl [cm ⁻¹]
σ^*	mittlere Standardabweichung der Rauheitshügelverteilung [m]
σ_0	Normalspannung [N/mm ²]
σ_c	Druckspannung [N/mm ²]
τ	Schub-/Scherspannung [N/mm ²]
τ_{max}	Schubfestigkeit [N/mm ²]
τ_r	Relaxationszeit [s]
τ_s	mittlere Grenzflächen-Scherfestigkeit [N/mm ²]
ψ	Plastizitätsindex

1 KAPITEL

1.1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE MOTIVATION ZUR ERFORSCHUNG DES STICK-SLIP-EFFEKTES IM FAHRZEUGINNENRAUM

Die Erzeugung von Störgeräuschen im Fahrzeuginnenraum stellt eine sehr starke Beeinträchtigung für die Automobilindustrie dar. Das physikalische Phänomen Stick-Slip, zu Deutsch Ruckgleiten, wird als die Hauptursache dieser Problematik betrachtet. Im Laufe der Jahre traf die Automobilindustrie erfolgreiche Maßnahmen zur Geräuschreduzierung im Außenbereich der modernen Fahrzeuge. Infolgedessen wurden die von akustisch ungünstigen Verkleidungsteilen erzeugten Geräusche im Interieur nun deutlicher wahrnehmbar. Die Störgeräusch-Problematik sorgt für erheblich hohe Kosten seitens der Automobilhersteller, sowohl bei der Vorbeugung als auch bei der Nachbehandlung des Problems. Eine dauerhafte und effiziente Lösung besteht zurzeit noch nicht.

Die durch den Stick-Slip-Effekt hervorgerufenen Störgeräusche im Fahrzeuginnenraum treten hauptsächlich an den Stellen auf, an denen Kunststoff-, Leder-, Gummi- und Glasteile in Kontakt miteinander kommen. Nach [Güb 1989] und [Zsc 2004] kann die Ursache für ein akustisch ungünstiges Verhalten bei der Kombination von unterschiedlichen Kunststoffpaarungen in der Polymer-Charakteristik des jeweiligen Werkstoffes liegen. Diese wirken sich wiederum direkt auf den Stick-Slip-Effekt aus. Im Fahrzeuginnenraum besteht eine große Zahl möglicher Kontaktstellen zwischen weichen Materialien, welche durch die herrschenden Geschwindigkeiten und Kontaktkräfte als Entstehungsquellen von Störgeräuschen dienen können. Insbesondere ist die Anwendung von bahnenartigen Produkten wie Folien, Filmen und Beschichtungen betroffen [Mäd 2003].

Früher wurde das akustische Verhalten überwiegend bei Fahrzeugen der Oberklasse verbessert. Heute legen die Hersteller bei Fahrzeugen aller Kategorien Wert darauf, das Geräuschverhalten zu optimieren und die Geräusche im Innen- und Außenbereich möglichst zu reduzieren [Zsc 2004]. Die Fahrzeug-Akustiker stehen vor der Herausforderung, mit effektiven und dennoch kostengünstigen Maßnahmen einen möglichst geringen Schallpegel zu erreichen. Somit erreichte die Vermeidung des Stick-Slip-Effektes einen hohen

technischen und wirtschaftlichen Rang bei der Gewährleistung der Qualität eines Fahrzeuges.

Als eine Erscheinungsform der Reibmerkmale eines Materials steht der Stick-Slip-Effekt, wie für alle Materialien bekannt, in Zusammenhang mit Oberflächeneigenschaften, wie z. B. Rauheit und Adhäsionskräften [Erh 1980]. Die im Automobilinnenraum standardmäßig eingesetzten Leder und Kunststoffbahnen sind unter den kritischsten Elementen, die von stick-slip-bedingten Störgeräuschen betroffen werden. Trotz der damit verbundenen finanziellen Konsequenzen für die Automobilindustrie sind diese Materialien in der Innenausstattung eines Automobils unverzichtbar [Mäd 2003]. Der wichtigste Grund unter anderen, die die Untersuchung des Stick-Slip-Phänomens rechtfertigen.

Durch Untersuchungen an Automobilledern konnten einige Querverbindungen zwischen dem Stick-Slip-Effekt und dem Deformationsverhalten der Prüflinge erkannt werden. Die Erstellung weiterer schlüssiger Aussagen durch die Anwendung zusätzlicher Messmethoden war von der Systematik und Reproduzierbarkeit her nicht sinnvoll. Ursächlich dafür: einerseits der natürliche Charakter des Leders mit allen dessen zufälligen Einflüssen und andererseits die unzähligen Prozesse und Zusätze, die jede Ledersorte ein Material für sich macht. PVC wurde daher wegen der gleichen Anwendung und Problematik im Automobilinnenraum als ein mehr als geeignetes Ersatzmaterial angenommen. Eine systematische Untersuchung des Stick-Slip-Phänomens wurde im Vergleich zum Leder dadurch vereinfacht, dass die Vorgeschichte, d. h. die Zusammensetzung, die Verarbeitung, die Modifizierungen und Behandlungen der PVC-Bahnen, bekannt ist.

Das Vorhaben dieser Forschungsarbeit beruht darauf, das Deformationsverhalten von flexiblen PVC-Teilen (Folien), die im Fahrzeuginnenraum Anwendung finden, in Zusammenhang mit deren Stick-Slip-Neigung zu bringen. Dafür wurden die Auswirkung von unterschiedlichen Einflussgrößen und Messparametern erarbeitet, wie z. B. chemische Schäumung, Lackierung, Verstärkung und Prägung der PVC-Folie.

2 KAPITEL

2.1 GRUNDLAGE DER TRIBOLOGIE

Das Wort Tribologie kommt aus dem Griechischen „*tribo*“ und bedeutet reiben, einreiben, scheuern.

Tribotechnische Systeme sind Gebilde, deren Funktion definitionsgemäß mit tribologischen Prozessen verbunden und damit im Wesentlichen durch zwei Parametergruppen gekennzeichnet sind. Die *Funktion*, nämlich die Umsetzung von mechanischer Energie und Stoffen oder auch damit verbundener Signal- oder Informationsübertragung in energie-, stoff- oder informationsdeterminierte Systeme. Die *Struktur* wird durch die zur Funktionserfüllung erforderlichen und an den damit verbundenen tribologischen Prozessen direkt beteiligten Bauteilen und Stoffen gebildet [Czi 1992].

Die Grundstruktur aller tribotechnischen Systeme besteht aus den folgenden vier Systemelementen:

- Grundkörper
- Gegenkörper
- Zwischenstoff (z. B. Schmierstoff)
- Umgebungsmedium

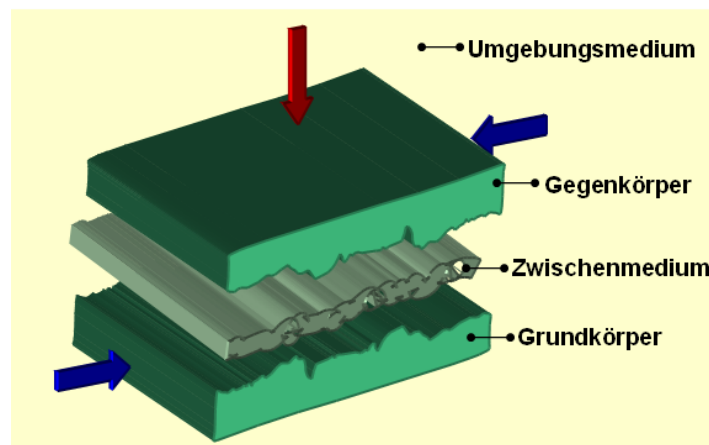


Abb. 2.1: Grundlegende Elemente tribotechnischer Systeme

Die Bestandteile tribotechnischer Systeme sind bei der Erfüllung ihrer funktionellen Aufgaben - nämlich Energie-, Stoff- oder Signalumsetzung über Kontakt- und Bewegungsgrößen -

durch das Einwirken des „Beanspruchungskollektivs“ auf die Systemkomponente verschiedenen tribologischen Beanspruchungen ausgesetzt. Deren Analyse ist eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis von Reibungs- und Verschleißmechanismen, weil die sich daraus ergebenden Folgerungen die Basis für eine mögliche Optimierung tribotechnischer Systeme bilden. Laut DIN 50 320 entspricht das Konzept einer tribologischen Beanspruchungen „der Beanspruchung der Oberfläche eines Körpers durch Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“.

2.2 REIBUNG UND DIE KLASSISCHEN REIBUNGSGESETZEN

Die frühesten Theorien der Reibung sind rein empirischer Natur und wurden anfänglich von Da Vinci, Guillaume Amontons und Charles Augustin Coulomb postuliert.

Von Leonardo da Vinci (1452-1519) stammt die Aussage, dass die spezifische Reibkraft zwischen zwei aneinander gleitenden Festkörpern (1) proportional zu der normalen Last oder Druck eines Körpers gegen den anderen ist und ebenfalls (2) von der Kontaktfläche unabhängig ist. Am Ende des 17. Jahrhundert postulierte Guillaume Amontons (1663-1705) die bereits gemachten Aussagen von Da Vinci. Später, 1785 drückte Charles Augustin Coulomb (1736-1806) zum ersten Mal aus, dass die Reibkraft (3) von der Gleitgeschwindigkeit unabhängig ist. 1835 schlug A. Morin vor, dass es zwei Reibungskoeffizienten geben sollte, einen Haft- und einen Gleitreibungskoeffizienten. Der Ausgangspunkt war, dass die Kraft während der Relativbewegung zweier ruhender kontaktierender Körper höher ist als die Kraft während der Bewegung [Rab 1956]. 1750 führte Euler (1707-1783) den griechischen Buchstabe μ als Symbol für den Reibungskoeffizienten ein [Rab 1956] [Yos 1993] [Fee 1998].

Heutzutage werden die sog. Amontons-Coulomb-Gesetze noch oft in tribologischen Applikationen angewendet und sind in jedem Werk bzw. wissenschaftlicher Arbeit in dem Feld der Tribologie zu finden. Schwerpunktmäßig lauten die drei Grundsätze der Reibung [Fee 1998] [Mey] [Rab 1956][Jaf 2001]:

- die spezifische Reibkraft F_R zwischen zwei aneinander gleitenden Festkörpern ist proportional zu der normalen Last oder Druck F_N eines Körpers gegen den anderen ($\mu = F_R / F_N$).

- die spezifische Reibung ist von der scheinbaren Kontaktfläche beider kontaktierenden Körper unabhängig. Dieses Gesetz gilt normalerweise für Metalle aber oft nicht für Polymere.
- für zwei kontaktierende Körper ist die Reibkraft von der Gleitgeschwindigkeit unabhängig und der Gleitrichtung entgegengesetzt. Die nötige Kraft um einen Körper in Bewegung zu halten ist kleiner als die Kraft die erforderlich ist, um ihn in Bewegung zu setzen.

Obwohl die klassischen Grundgesetze der Reibung nach Amontons und Coulomb allgemein akzeptiert werden, reichen sie wegen der Komplexität dieser exakten Beschreibung der Reibung nicht aus [Rab 1956]. Das Wort Reibung umschließt ein komplexes Zusammenspiel von Einflussfaktoren, die nicht einfach quantifizierbar sind. Der Wert des Reibungskoeffizienten wird von dem Grundmaterial an sich und von Schmierstoffen, Temperatur, Geschwindigkeit, Druck, Kontaktkraft, Oberflächenrauheit und eine Reihe anderer Variablen beeinflusst. Zu einer besseren Erklärung müssen weitere Mechanismen wie Adhäsion, Deformation, Schmierung etc. näher betrachtet werden [Hal 1988]. Diese Theorie mag für Metalle und andere elastisch harte Materialien gelten, diese Aussagen können allerdings für elastisch weiche Materialien, wie z. B. manche Kunststoffe, Gummi oder Textilien, nicht verallgemeinert werden [Cro 2005].

Der Reibungsvorgang ist mit einem irreversiblen Energieverbrauch verbunden, welcher einem Reibungssystem (tribologischen System) als mechanische Reibungsarbeit zugeführte Energie vollständig in andere Energieformen umgewandelt wird. Einige andere energiedissipierende Vorgänge sind Deformation, Erwärmung, Gefügeumwandlung, Schallemission, chemische Umsetzung und Bruchvorgänge [Erh 1980].

Rabinowicz [Rab 1956] fasste die Evolution des Konzepts der Reibung wie folgt zusammen. Im späten 18. Jahrhundert wurde angenommen, dass der Reibungskoeffizient eine konstante Funktion der Relativgeschwindigkeit darstellte (Abb. 2.2 a)). Im frühen 19. Jahrhundert wurde die Existenz zweier Reibungskoeffizienten postuliert. Nach dieser Definition erreichte der Reibungskoeffizient den höchsten Wert wenn zwei kontaktierende Körper aus der Ruhelage in Relativbewegung versetzt wurden - Haftreibungskoeffizient (μ_s) – und nahm sofort ab, als die Körper anfangen aneinander zu gleiten - Gleitreibungskoeffizient (μ_D) - (Abb. 2.2 b)). Gegen 1940 wurde gezeigt, dass mit der Erhöhung der Relativgeschwindigkeit die Reibung allmählich fiel (Abb. 2.2 c)). Heute ist es

bekannt, dass die Reibung ansteigt bei sehr geringen Gleitgeschwindigkeiten (Abb. 2.2 d)). Wenn das Verhältnis zwischen Reibungskoeffizient und Geschwindigkeit dem Verlauf auf der linken Seite des Peaks in der Abb. 2.2 d) entspricht, gleiten die Körper kontinuierlich aneinander. Befindet sich dieses Verhältnis in den steileren Bereich auf der rechten Seite der Peaks, findet die Stick-Slip-Bewegung statt.

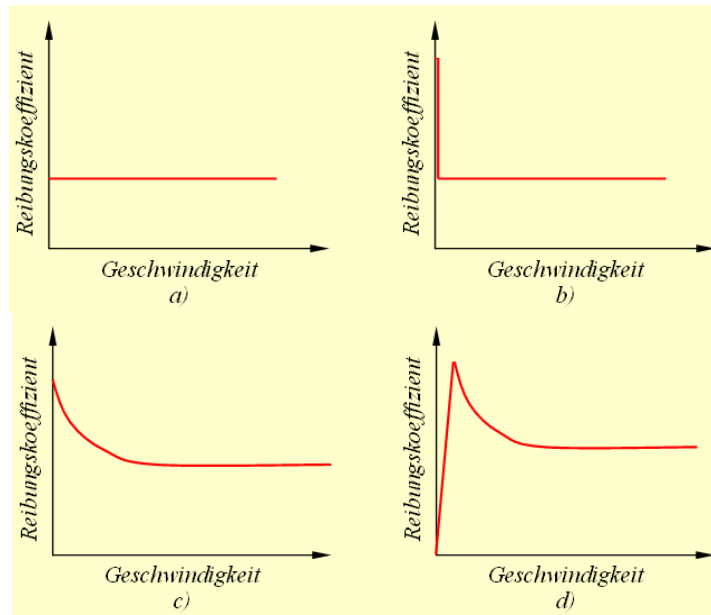


Abb. 2.2: Evolution des Konzepts der Reibung [Rab 1956]

Bowden und Tabor beschrieben die Oberflächen aller Materialien im Hinblick auf die Mikrorauigkeiten als bestehend aus „Hügel“ und „Tälern“. Nach *Bowden und Tabor* berühren sich die Oberflächen zuerst an den höchsten Rauheitsspitzen. Unter Normalbelastung würden sich diese deformieren, bis weitere Spitzen in Kontakt kommen. Dies würde weitergehen bis eine ausreichend Menge an Kontaktstellen die ausgeübte Last aushalten. Sie nahmen an, dass die wahre Kontaktfläche nur einen Bruchteil der gesamten Oberfläche betrage. *Bowden and Tabor* setzten voraus, dass die Reibungskoeffizienten aus zwei Komponenten bestehen, nämlich einer Adhäsions - (μ_{adh}) und einer Deformationskomponente (μ_{def}) [Erh 1980] [Jaf 2001]. Es gilt:

$$\mu_{ges} = \mu_{adh} + \mu_{def} \quad \text{Formel 2.1}$$

Beide Komponenten der Reibung werden in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit für unterschiedliche Werkstoffe angegeben. In *Erhard* [Erh 1980] wird dieser Zusammenhang für metallische Werkstoffe mit hohen und niedrigen Streckgrenzen gezeigt. Die Abb. 2.3 zeigt, dass in beiden Fällen die Adhäsionskomponente mit zunehmender Rauheit fällt. Die

Deformationskomponente nimmt jedoch mit zunehmender Rauheit zwar bei Werkstoffen mit hoher Streckgrenze weit weniger als bei Werkstoffen mit niedriger Streckgrenze zu. Diese Kurve μ_{ges} kann ein Minimum bilden.

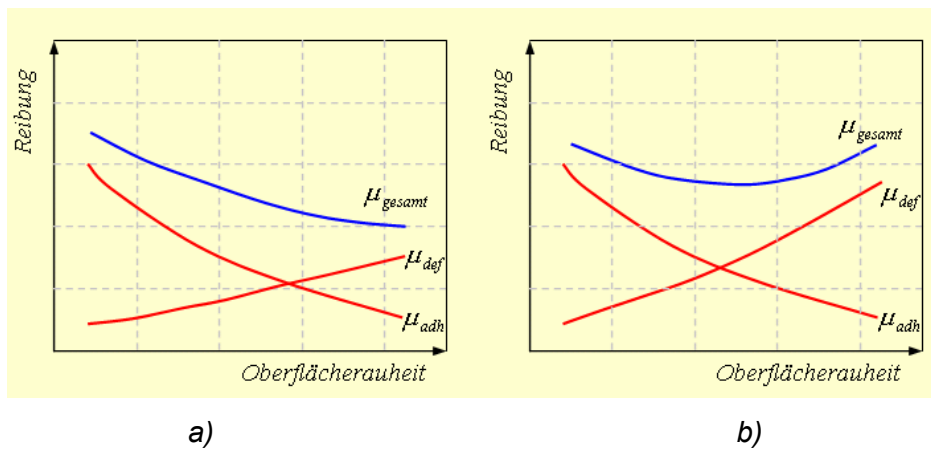


Abb. 2.3: Adhäsive und deformative Anteile der Gleitreibungszahl in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit: a) Werkstoffen mit hoher und b) mit niedriger Streckgrenze [Erh 1980]

Allgemein werden in allen Adhäsionsvorgängen die Bindungskräfte stärker je länger der Kontakt unberührt bleibt. Das ist der Grund, warum der Haftreibungskoeffizient mit der Kontaktdauer zunimmt. Beim Gleiten gilt, je geringer die Geschwindigkeit, desto länger ist der Kontakt zwischen beiden Oberflächen. Wenn die Geschwindigkeit während des Gleitens sinkt, nimmt die Reibung folglich zu. Diese Umstände stellen ideale Bedingungen zur Entstehung vom Stick-Slip-Effekt dar. Bei extrem geringen Geschwindigkeiten hingegen kehrt sich die Situation um, wenn die Gleitgeschwindigkeit zunimmt, nimmt auch der Gleitreibungskoeffizient zu. Laut *Rabinowicz* [Rab 1956] kann das Kriechen zweier oder einer der daran teilnehmenden Oberflächen diesen Effekt bei elastisch weichen Materialien erklären. Diese Mechanismen hängen stark von der Art des Reibungsvorgangs und den Bedingungen, unter denen sie gemessen werden, ab. Deshalb können die erhaltenen Resultate nicht auf zwei unterschiedliche Systeme oder Materialpaarungen ohne weiteres übertragen werden.

2.3 ENTWICKLUNG DER REIBUNGSMODELLE

Die Abb. 2.4 illustriert annähernd den Zusammenhang zwischen der Reibkraft und der Gleitgeschwindigkeit. Die Abb. 2.4. a) zeigt die Reibungsverhältnisse nach Coulomb, indem die Coulomb'sche Reibkraft F_C proportional zu der Normalbelastung

$$F_R = F_C = \mu \cdot F_N \cdot \text{sgn}(v) \quad \text{Formel 2.2}$$

und unabhängig von der Geschwindigkeit ist.

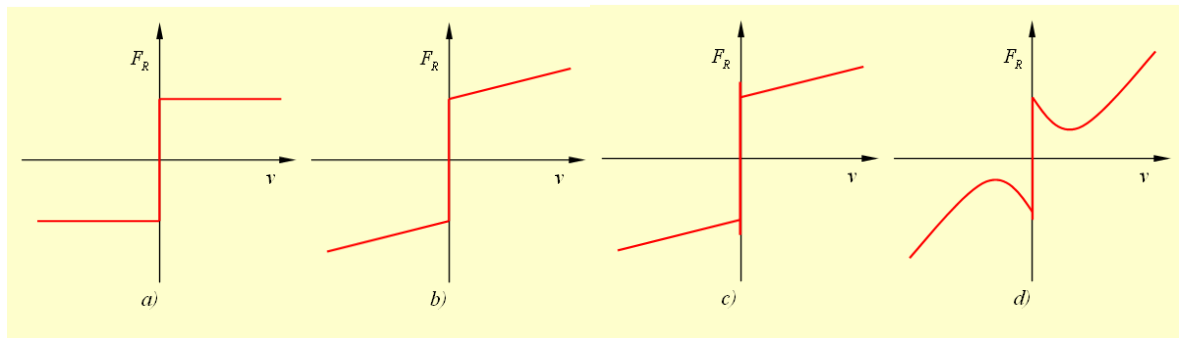


Abb. 2.4: Chronologische Entwicklung der Reibungsmodelle [Ols 1997] [Ser 2004]

Im 19. Jahrhundert entstand die Theorie der Hydrodynamik, was zur Einbeziehung der durch die Viskosität entstandenen Reibkräfte von Schmierschichten führte. Der Begriff „viskose Reibung“ wurde für diese Kraftkomponente angewendet und wird normalerweise als

$$F_V = K \cdot \eta \cdot v \quad \text{Formel 2.3}$$

beschrieben.

F_V : viskose Reibkraft [N]

K : Formkonstante [m]

η : dynamische Viskosität [Pa·s]

v : Geschwindigkeit [m/s]

Die viskosen Reibungskräfte sind ebenfalls wie die nicht-viskosen Reibungskräfte stark energiedissipierend. Die Energiedissipation bei den nicht-viskosen Reibungskräften impliziert, dass eine endliche Belastung (Streckspannung) appliziert werden muss, bevor die Bewegung starten kann. Bei der viskosen Energiedissipation hingegen, und abhängig davon, ob Newton'sch oder nicht-Newton'sch, findet eine Fließgrenze anstatt einer Streckgrenze statt und die Bewegung erfolgt, egal wie gering die Belastungen sein mögen [Yos 1993]. In der Abb. 2.4 b) ist die Reibung nach Coulomb in Kombination mit der viskosen Reibung zu sehen.

Die Abb. 2.4 c) führt dazu die Haftreibung ein. Sie wirkt gegen externe Kräfte F_E , die sich unter einer gewissen Grenze halten und die Fortbewegung des Körpers verhindert. Darauf basierend kann die Reibkraft wie folgt beschrieben werden:

$$F_R = \begin{cases} F_E & \text{wenn } v = 0 \text{ und } |F_E| < F_H \\ F_H \cdot \text{sgn}(F_E) & \text{wenn } v = 0 \text{ und } |F_E| \geq F_H \end{cases} \quad \text{Formel 2.4}$$

Damit ist die Reibkraft in der Ruhelage eine Funktion ausschließlich externer Kräfte.

Am Anfang des 20. Jahrhunderts führte Stribeck Untersuchungen an Gleitlagerelementen durch und zeigte die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Gleitgeschwindigkeit. Die Darstellung der Reibkraft als eine Funktion der Relativgeschwindigkeit für $v = \text{konst.}$ beschreibt die Stribeck-Kurve nach der Arbeit von Stribeck [Ols 1997]. Die Abb. 2.4 d) zeigt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit kontinuierlich ist im Gegensatz zur Kurve in Abb. 2.4 c). Allgemein kann die Reibung wie folgt beschrieben werden [Klo 2002]:

$$F_R = \begin{cases} F_E & v = 0 \text{ und } |F_E| < F_H \\ F_H \cdot \text{sgn}(F_E) & v = 0 \text{ und } |F_E| \geq F_H \\ F_{\text{Stribeck}} & \text{wenn } v_r \neq 0 \end{cases} \quad \text{Formel 2.5}$$

wobei F_{Stribeck} eine beliebige Funktion ist, die den Verlauf der Abb. 2.4 d) beschreibt.

Die erste Zeile der oberen Gleichung (Formel 2.5) beschreibt die Reibkraft für den Zustand des Haftens. Die Reibkraft befindet sich im statischen Gleichgewicht mit der Summe der äußeren antreibenden und verzögernden Kräfte F_E . Dieser Zustand besteht für $v = 0$ solange der Betrag F_E die Losbrechkraft (statische Reibkraft) F_H nicht übersteigt. Übersteigt F_E die statische Reibkraft, geht die Masse vom Haften in das Gleiten über. In diesem Zustand des Losbrechens ist die Reibkraft gemäß der zweiten Zeile der Fallunterscheidung vom Betrag gleich der statischen Reibkraft, und ihr Vorzeichen ist durch das Vorzeichen von F_E gegeben. Schließlich beschreibt die dritte Zeile der Formel 2.5 die Reibkraft für den Zustand des Gleitens. In diesem Zustand ist die Reibkraft eine Funktion der Geschwindigkeit und ist der Bewegung der Masse entgegengerichtet. Sie setzt sich aus den Anteilen trockener Reibung und bei Vorliegen eines Schmierfilms geschwindigkeitsproportionaler viskoser Reibung mit dem Proportionalitätsfaktor η (siehe

Formel 2.3) zusammen. Die Reibkraft kann in Anlehnung an *Olsson et al.* [Ols 1997] und *Klotzbach et al.* [Klo 2002] für $v > 0$ durch die Gleichung

$$F_{Stribeck}(v) = F_C + (F_H - F_C) e^{-|v/v_{Stribeck}|^{\delta_S}} + F_V \quad \text{Formel 2.6}$$

beschrieben werden. Dabei repräsentiert $v_{Stribeck}$ die Stribeckgeschwindigkeit.

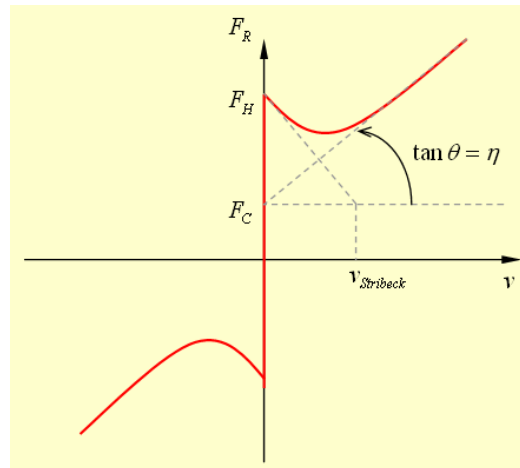


Abb. 2.5: Reibkennlinie [Klo 2002]

Der spezielle Fall der Abnahme der Reibkraft bei geringerer Geschwindigkeit ist bekannt als Stribeck-Effekt. Die Beziehung zwischen Reibung und Geschwindigkeit ist applikationsabhängig und variiert mit den Eigenschaften des Werkstoffes, der Temperatur, den Raumbedingungen etc.

Die Abb. 2.6 zeigt die Form von $F_{Stribeck}$ für $F_C = 0,3$, $F_S = 0,8$, $\delta_S = 2$ und $v_S = 0,5$ m/s für drei unterschiedliche Werte von η .

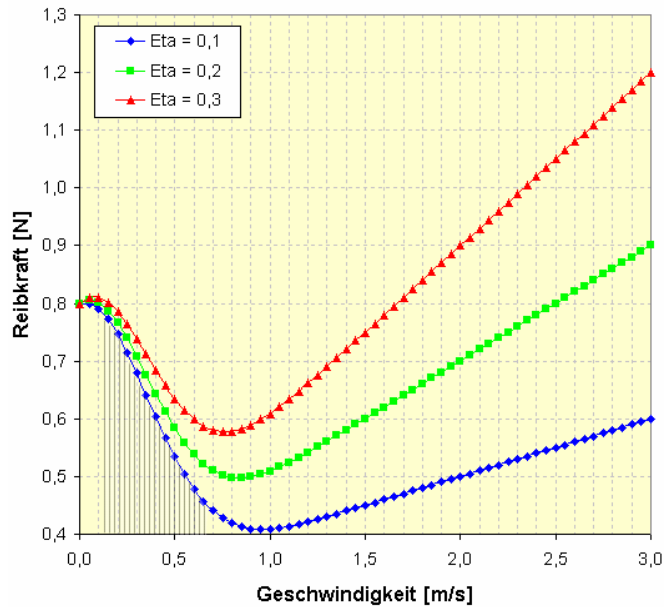


Abb. 2.6: Reibungsmodelle für die oben gezeigte Gleichung (Formel 2.6) mit unterschiedlichen Werten von η [Ser 2004] [Klo 2002]

Wenn das Verhältnis zwischen Reibung und Geschwindigkeit dem rasch steigenden Teil des Diagramms entspricht, ist das System stabil und eine Schwingungsanregung wird infolge der Zunahme des Reibungskoeffizienten mit der Gleitgeschwindigkeit automatisch gedämpft. Zwei Festkörper würden kontinuierlich aneinander gleiten. Andererseits, für die Arbeitsbedingungen im linken Teil der Stribeck-Kurve (schraffierter Bereich in der Abb. 2.6), d. h. bei einer Abnahme des Reibungskoeffizienten mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit, resultiert das typische Erscheinungsbild des Stick-Slip-Verhaltens. Dieses Verhältnis impliziert die Entstehung von stick-slip-charakteristischen Bewegungen [Rab 1956] [Czi 1992] [Cro 2005].

2.4 REIBUNGSMECHANISMEN

Als Reibungsmechanismen werden die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems auftretenden Elementarprozesse der Reibung bezeichnet.

2.4.1 ADHÄSION

Die Ursache einer Adhäsion kontaktierender Festkörper sind chemische Bindungen, die auch für die Kohäsion, d. h. den inneren Zusammenhalt fester Festkörper, verantwortlich sind. Die Grundformen der chemischen Bindungen werden eingeteilt in (starke) Hauptvalenzbindungen (Ionenbindung, Atombindung, metallische Bindung) mit einer

typischen Bindungsenergie von 2 eV/Atom bis 8 eV/Atom sowie (schwache) Nebenvalenzbindungen (van-der-Waals-Bindungen) mit etwa 0,1 eV/Atom. Sie können wie folgt charakterisiert werden [Czi 1992]:

- *Ionenbindung (heteropolare Bindungen)*: Bildung von Kationen und Anionen durch Aufnahme oder Abgabe von Valenzelektronen; Bindung durch ungerichtete elektrostatische (Coulomb-)Kräfte zwischen den Ionen. Für kontaktierende Festkörper ist die für die Adhäsion maßgebliche Größe des Ladungsaustausches abhängig von der Größe der wahren Kontaktfläche, den Unterschieden der Elektronen-Austrittsarbeiten und der Dichte elektronischer Oberflächenzustände.
- *Atombindung (homöopolare oder kovalente Bindungen)*: Gemeinsame Elektronenpaare zwischen nächsten Nachbarn; gerichtete Bindung mit räumlicher Vorzugsrichtung der bindenden Elektronenpaare. Kovalente Bindungskräfte haben nur eine sehr kurze Reichweite, die in der Größenordnung von interatomaren Abständen liegt (0,5 nm oder weniger).
- *Metallische Bindungen*: Gemeinsame Valenzelektronen aller beteiligten Atome („Elektronengas“); ungerichtete Bindung zwischen dem Elektronengas und dem positiv geladenen Atomkern. Die Stärke der Adhäsion hängt von der Dichte freier Elektronen im Kontaktgrenzflächenbereich ab. Darüber hinaus ist die Elektronenstruktur der Metalle und der Charakter (s,p,d,f) der an einer Adhäsion teilnehmenden Elektronen zu berücksichtigen.
- *Van-der-Waals-Bindung*: Interne Ladungspolarisation (Dipolbindung) benachbarter Atome der Moleküle; schwache elektrostatische Dipoladsorptionsbindung. Eine van-der-Waals-Adhäsion kann zwischen Werkstoffen aller Art auftreten. Ihre Stärke nimmt für Kontaktabstände ideal glatter Oberflächen > 30 nm reziprok mit der vierten Potenz des Abstandes und für Kontaktabstände < 30 nm reziprok mit der dritten Potenz des Kontakts ab.

In energetischer Hinsicht ergibt sich bei einem Festkörper/Festkörper-Kontakt eine Änderung der Oberflächenenergie $\Delta\gamma$ dadurch, dass zwei Oberflächen mit entsprechenden Oberflächenenergien durch eine Grenzfläche niedrigerer Grenzflächenenergie ersetzt werden. Für die Änderung der Oberflächenenergie je Flächeneinheit gilt der folgende Ausdruck:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad \text{Formel 2.7}$$

Wobei γ_1 und γ_2 die Oberflächenenergien der kontaktierenden Festkörper und γ_{12} die Grenzflächenenergie darstellt. Diese Gleichung (Formel 2.7) wird im Abschnitt 3.1.5 näher betrachtet.

Beim Kontakt realer technischer Bauteile wird eine Adhäsion entscheidend durch den Aufbau technischer Oberflächen und ihrer Mikrostruktur beeinflusst, so dass eine Berechnung oder Abschätzung der Wirkung von Adhäsionskräften kaum möglich ist. Zusätzlich stellt das Formänderungsvermögen der Kontaktpartner einen erheblichen Einflussfaktor auf die Adhäsion dar, da es die Größe der wahren Kontaktfläche beeinflusst. Die einzige experimentelle Möglichkeit zur Bestimmung von Adhäsionskräften zwischen zwei unter einer Normalkraft F_N kontaktierenden Festkörpern besteht in der Messung der zu ihrer Trennung erforderlichen Trenn- oder Adhäsionskraft F_A . Der Quotient

$$a = \frac{F_A}{F_N} \quad \text{Formel 2.8}$$

wird als Adhäsionskoeffizient bezeichnet [Czi 1992].

Eine allgemein gültige Quantifizierung der Zusammenhänge aller Prozesse, die in die Adhäsionsvorgänge involviert sind, erscheint jedoch wegen deren Komplexität kaum möglich. Es geht aus der folgenden Bilanzierung der Einzelprozesse hervor [Czi 1992]:

Bildung eines Adhäsionskontaktes:

- Berührung der Rauheitsspitzen von den Oberflächen
- Zerstörung von Verunreinigungen und Kontaminationsschichten
- elastisch-plastische Deformation zur Ausbildung der realen Kontaktfläche

Aufbau molekularer Bindungen

- Elektronenreaktion im Kontaktbereich
- Ladungsumlagerung
- Diffusionsprozesse
- Ausbildung von chemischen Bindungen je nach stofflicher Natur und Elektronenstruktur

Trennung des Adhäsionskontaktes

- Entstehung von Einschnürungen und Rissen im Kontaktbereich
- Abscherung im Bereich geringster Trennfestigkeit
- wechselseitige Materialübertragung

2.4.2 KONTAKTGEOMETRIE UND KONTAKTMECHANIK

Oberflächen können entweder glatt oder rau, hart oder weich, elastisch, viskoelastisch oder plastisch, spröde oder duktil, trocken (nicht geschmiert) oder geschmiert sein und aus unterschiedlichen Stoffen bestehen. Beim Kontakt zweier Bauteile tritt infolge der Mikrogeometrie technischer Oberflächen eine Berührung nur in diskreten Mikrokontakten auf, die sich unter der Wirkung der Normalkraft F_N deformieren. Die wahre Kontaktfläche ist für alle tribomechanischen Systeme von zentraler Bedeutung, da in ihr primär die Reibungs- und Verschleißprozesse ablaufen. Bei zwei unter der Wirkung einer Normalkraft F_N kontaktierenden Festkörpern ergeben sich unterschiedliche Kontaktgeometrien und -mechaniken [Czi 1992].

2.4.2.1 TECHNISCHE OBERFLÄCHEN

Technische Oberflächen stellen die geometrischen Begrenzungen technischer Bauteile dar. Durch Wechselwirkungen des Werkstoffes mit den Umgebungsmedien können Veränderungen der Oberflächenzusammensetzung und ein Einbau von Bestandteilen des Umgebungsmediums stattfinden. Je nach Reaktivität des Grundwerkstoffes kann eine Physisorption (Adsorptionsenthalpie $< 0,4 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$) über van-der-Waals-Bindungen oder festere Chemisorption (Adsorptionsenthalpie $> 0,4 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$) mit kovalenten oder ionischen Bindungsanteilen erfolgen. Bei metallischen Werkstoffen werden mit Hilfe des Luftsauerstoffs Oxidschichten aufgebaut und darauf andere gasförmige oder flüssige Verunreinigungen physis- oder chemisorbiert [Czi 1992]. Außerdem ist der Einfluss der Fertigung der Oberflächen zu beachten. Je nach dem Verfahren können beispielsweise

- unterschiedliche Verfestigungen,
- Aufbau von Eigenspannungen,
- und Ausbildung von Texturinhomogenitäten zwischen Randzone und Werkstoffinnerem

beispielsweise auftreten. Die chemische Zusammensetzung von Oberflächen kann zusätzlich durch den Einbau von Bestandteilen des Umgebungsmediums von der des Grundwerkstoffes sich erheblich unterscheiden [Czi 1992].

Aus den Materialwissenschaften weiß man, dass der Reibungskoeffizient sehr stark auf Veränderungen von Größen wie Temperatur, Atmosphäre und Druck reagiert. Zudem spielt die Präparation der zu untersuchenden Materialien eine außerordentlich wichtige Rolle. Diese Abhängigkeiten machen es nahezu unmöglich, Reibungskoeffizienten mit vernünftiger Genauigkeit zu tabellieren. Es existieren einige wenige Ausnahmen, bei welchen reproduzierbare Messungen angestellt werden konnten. Allgemein bekannt sind Glas auf Glas und Teflon auf Teflon. Die schlechte Reproduzierbarkeit der Daten wird meist auf die Unkenntnis der mikroskopischen Oberflächenstruktur zurückgeführt. Betrachtet man eine vermeintlich glatte Oberfläche unter dem Mikroskop, so erkennt man Oberflächenrauigkeiten in Form von kleinen Rauigkeitsspitzen. Reibung entsteht als Folge von Verzahnungen dieser Spitzen und deren Deformation. Die Basisprozesse der Reibung laufen folglich auf einer sehr viel kleineren Oberfläche, der realen Kontaktfläche A_{real} , ab. Einzig für den Fall zweier atomar ebenen Oberflächen bzw. zwischen zwei Rauigkeitsspitzen ist die wahre Kontaktfläche gleich der scheinbaren. Die spezifische Reibkraft pro Flächeneinheit, die Scherspannung, ist durch

$$\tau = \frac{F_R}{A_{real}} \quad \text{Formel 2.9}$$

gekennzeichnet.

Bowden und Tabor konstruierten aufgrund dieser Überlegungen ihr Adhäsionsmodell, in dem sie die Scherspannung als unabhängig von der Normalkraft annahmen. Die Reibkraft war dann gegeben durch Formel 2.9. Sie reduzierten damit das Reibungsproblem auf die Bestimmung der realen Kontaktfläche. Erst viel später fand man mit Hilfe eines Oberflächen-Kraft-Apparates und Raster-Kraft-Mikroskopes Evidenzen dafür, dass die Scherspannung τ tatsächlich nahezu unabhängig von der Normalkraft ist [Mey].

Um die reale Kontaktfläche zu bestimmen, muss man die elasto-plastischen Eigenschaften des Materials kennen. Bei der theoretischen Behandlung der Deformation der Spitzen fanden zwei prinzipiell gegensätzliche Annäherungen ihren Platz. Auf der einen Seite steht die vollkommen plastische Verformung, auf der anderen Seite die vollkommen elastische Theorie nach Hertz [Czi 1992]. Da innerhalb der Hertz-Theorie keine lineare Abhängigkeit

zwischen Reibung und Normalkraft vorausgesagt wird, dies hingegen für die plastische Deformation der Fall ist, herrschte bis Mitte der fünfziger Jahre die Meinung vor, Reibung sei eine Folge der plastischen Deformation der Oberflächen [Mey].

Neben der physikalisch-chemischen Natur ist die Rauheit, d. h. die mikrogeometrische Gestaltabweichung von der idealen makroskopischen Geometrie von Bauteilen eine wichtige Charakteristik. Die Rauheit wird durch das Fertigungsverfahren geprägt und stellt eine dreidimensionale stochastische Verteilung von „Rauheits-Hügeln“ und Rauheits-Tälern“ dar. Die Beschreibung der Oberflächenrauheit technischer Oberflächen erfolgt in konventionell vereinfachter Form durch „Senkrecht-“ und „Waagrecht Kenngrößen“, die sich auf einen Profilschnitt der betrachteten Oberflächen beziehen. Die genormten Vorzugs-Messgrößen zur Kennzeichnung der Oberflächenrauheit sind nach DIN 4768 festgelegt [Czi 1992].

Aufgrund der im Mikrobereich vorhandenen oberflächlichen Unebenheiten berühren sich zwei aufeinander liegende Festkörper anfänglich nur an wenigen (mindestens drei) Stellen. Je größer aber die Normalkraft ist, mit der die beiden Oberflächen gegeneinander gedrückt werden, desto mehr kommt es zu einer Verformung der einzelnen Kontaktstellen und zu einer Vergrößerung der wahren Berührungsfläche. Dabei bewirkt die Deformation der herausragenden Spitzen ein Aufreißen der an der Phasengrenze stets vorhandenen adsorbierten Schichten. Es findet ein Freiwerden von Molekularkräften dadurch statt, dass die zwei kontaktierenden Körper in winzigen Bereichen zu festen Verbindungsbrücken zu verschweißen tendieren. Dieser adhäsive Vorgang ist als eine der Hauptursachen der Haftreibung anzusehen [Wei 1989].

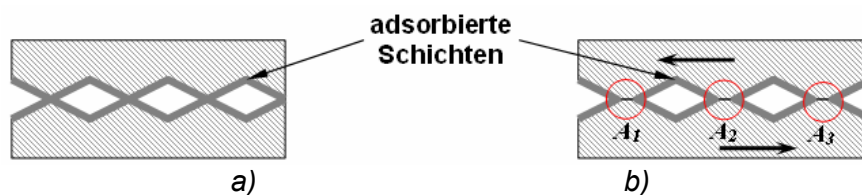


Abb. 2.7: Berührung zweier mit Adsorptionsfilmen behafteten Festkörperphasengrenzen a) bei statischer Berührung, b) nach gegenseitigem Gleiten. An den Kontaktstellen sind die Adsorptionsschichten aufgerissen [Wei 1989]

Anhand der Abb. 2.7 wird erläutert, dass die Rauheit im molekularen Bereich einen großen Einfluss auf die Größe der adhäsiven Bindungskräfte ausübt. Die Vertiefungen, Poren etc. von submikroskopischer Größe verursachen wesentlich höhere Adsorptionspotentiale als flache Stellen oder gar herausragende Spitzen. Es wurde gezeigt, dass die entstandenen

Molekularkräfte nicht von der geometrischen Oberfläche abhängen, sondern von der realen (effektiven) Oberfläche [Wei 1989].

2.4.2.2 ELASTISCHER KONTAKT

Die elastische Kontaktdeformation gekrümmter Körper wird durch die Hertzsche Theorie unter der Voraussetzung rein elastischer Materialien mit ideal glatten Oberflächen unter der ausschließlichen Wirkung von Normalkräften behandelt. *Archard* dehnt die Hertzsche Theorie auf die elastische Kontaktdeformation makroskopisch gekrümmter Körper mit Oberflächenrauheit aus. Die Rauheit wurde durch kugelförmige „Rauheitshügel“ unterschiedlicher Radien approximiert. Obwohl diese Modelle sehr starke Vereinfachungen realer technischer Oberflächen darstellen, zeigen sie, dass die reale Kontaktfläche bei der elastischen Kontaktdeformation näherungsweise der Normalkraft F_N proportional ist. Eine andere Erweiterung der Hertzschen Theorie für den Fall elastisch gekrümmter rauer Körper mit einer Gauß-Verteilung der Oberflächenrauheitshügel wurde von Greenwood und Tripp vorgenommen. Ihr Modell wird bezüglich der Oberflächenrauheit der Kontaktpartner durch drei Parameter definiert: die mittlere Standardabweichung der Gauß-Verteilung der Rauheitshügel, der mittlere Radius der Oberflächenrauheitshügel und die Flächendichte der Rauheitshügel [Czi 1992]. Die Analyse von Greenwood und Tripp zeigte in mathematischer Form, dass

- die Gesamtzahl der Mikrokontakte näherungsweise der Normalkraft F_N proportional ist,
- die wahre Kontaktfläche proportional der Anzahl der Mikrokontakte ist, d. h. dass die wahre Kontaktfläche näherungsweise der Normalkraft F_N proportional ist
($A_{real} = konst. \cdot F_N$)
- und die mittlere Größe eines Mikrokontaktes nahezu normalkraftunabhängig ist.

2.4.2.3 VISKOELASTISCHER KONTAKT

Für den Kontakt viskoelastischer Materialien, wie z. B. Polymerwerkstoffe, ist die Hertzsche Theorie der elastischen Kontaktdeformation unter Einbeziehung rheologischer Modelle zu erweitern. Eine volumenbezogene Deformation viskoelastischer Materialien kann durch das sog. Burger-Modell (4-Parameter-Modell) beschrieben werden, das aus einer Kombination von Federn und Dämpfungselementen besteht [Czi 1992]. Die Feder mit dem

Elastizitätsmodul E_0 kennzeichnet den rein elastischen Zustand, während die zeitabhängige viskoelastische Komponente durch die Kombination zwischen einer Feder mit Relaxationsmodul E_r und einem Dämpfungsglied mit der Viskosität η_r modelliert wird (sog. *Voigt-Kelvin-Kombination*). Die Relaxationszeit τ_r definiert diejenige Zeit, nach der eine Anfangsspannung auf den *e-ten* Teil abgeklungen ist. Vereinfacht, die zeitabhängige Abnahme der Spannung. Darüber hinaus kann noch eine viskoplastische Komponente mit der Viskosität η_0 wirksam werden. Für dieses Modell resultiert beim spontanen Wirken einer

einaxialen Spannung σ_0 eine Gesamtdeformation $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ mit folgenden Komponenten:

- elastische Deformation

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma_0}{E_0} \quad \text{Formel 2.10}$$

- viskoelastische Deformation

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_0}{E_r} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad \text{Formel 2.11}$$

- viskoplastische Deformation

$$\varepsilon_v = \sigma_0 \cdot \frac{t}{\eta_0} \quad \text{Formel 2.12}$$

Die Summe dieser Deformationskomponenten ist in der Abb. 2.8 dargestellt. Durch das Anlegen einer Asymptote an die resultierende ε_{ges} -Kurve kann der Relaxationsmodul E_r aus dem Schnittpunkt dieser Asymptote mit der ε -Achse bestimmt werden.

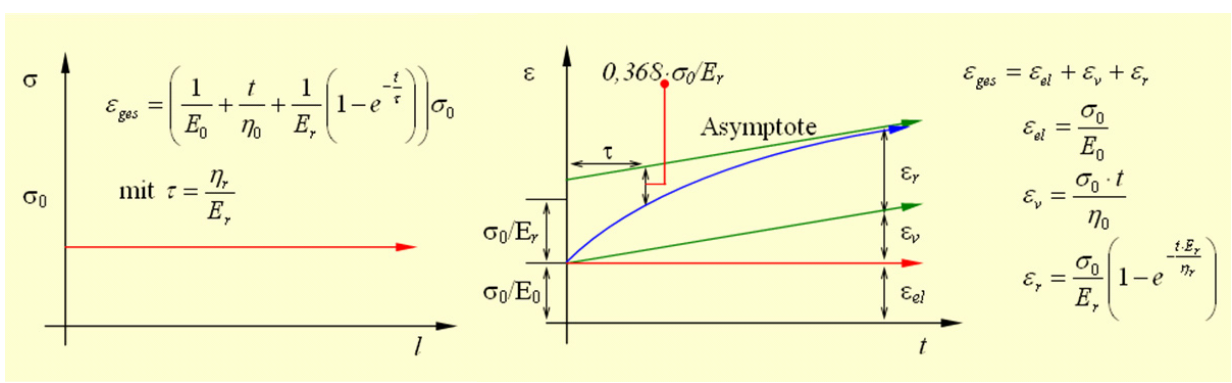


Abb. 2.8: Viskoelastische (volumenbezogene) Deformation, gekennzeichnet durch das rheologische Burger-Modell [Czi 1992]

2.4.2.4 PLASTISCHER KONTAKT

Für den Übergang von einer elastischen zu einer plastischen Kontaktdeformation gilt unter anderen der sog. Plastizitätsindex nach Greenwood und Williamson, der folgendermaßen definiert ist [Czi 1992]:

$$\psi = \left(\frac{E^*}{H} \right) \cdot \left(\frac{\sigma^*}{\beta} \right)^{1/2} \quad \text{Formel 2.13}$$

Der reduzierte Elastizitätsmodul ergibt sich aus den Elastizitätsmoduln beider teilnehmenden Materialien.

$$E^* = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad \text{Formel 2.14}$$

Hierbei sind

E^* : reduzierter Elastizitätsmodul der Kontaktpartner

E_1 : Elastizitätsmodul des Kontaktpartners 1

E_2 : Elastizitätsmodul des Kontaktpartners 2

H : Härte

σ^* : mittlere Standardabweichung der Verteilung der Rauheitshügel

β : mittlerer Radius der Rauheitshügel

Nach diesem Kriterium soll für $\psi < 0,6$ eine elastische und für $\psi > 1$ eine plastische Kontaktdeformation resultieren.

2.5 ADHÄSIVE UND DEFORMATIVE KONTAKTVORGÄNGE

Kontaktvorgänge sind das zentrale Kennzeichen tribologischer Beanspruchungen und umfassen

- *atomare und molekulare Wechselwirkungen*, die in Form einer Adhäsion oder einer Physi- bzw. Chemisorption technisch von besonderer Bedeutung sind,
- *mechanische Wechselwirkungen*, verbunden mit *Kontaktdeformation*, die die Ausbildung der realen Kontaktflächen, -geometrien und der Übertragung von Kräften, Drehmoment und Energie bestimmen/definieren.

Physikalische Ursachen der Adhäsionskomponente der Reibung ist die Bildung und das Zerstören von Adhäsionsbindungen in der wahren Kontaktfläche A_{real} . Modellmäßig kann die Adhäsionskomponente der Reibung als ein Stufenprozess mit zwei hauptsächlich Schritten betrachtet werden, nämlich die Bildung von Mikro-Kontaktflächen und von Adhäsionsbindungen. Der Einfluss des Formänderungsvermögen der Kontaktpartner, die Zusammensetzung und Topographie der Oberflächenschichten und ebenfalls Zwischenstoffe von Umgebungsmedien stellen wichtige zusammenhängende Einflussfaktoren dar [Czi 1992].

Die Adhäsionskomponente ergab sich aus möglichen „Schweißstellen“, da die Oberflächen relativ sauber waren. Bowden and Tabor nahmen an, dass die reale Kontaktfläche proportional zu der Normalbelastung war.

$$A_{real} = \frac{F_N}{H} \quad \text{Formel 2.15}$$

Dabei drückt H die Härte des weicheren Werkstoffes oder die höchste Druckspannung σ_c aufgenommen im Kontaktbereich aus. Bowden und Tabor nahmen an, dass die Oberflächenspitzen eine Scherdeformation erleiden müssten um die Gleitbewegung zu initiieren und aufrechtzuerhalten. Die mathematische Beziehung dafür lautet:

$$F_R = A_{real} \cdot \tau \quad \text{Formel 2.16}$$

Wobei τ die Schubspannung an dem weicheren Werkstoff ausdrückt. Aus beiden Gleichungen (Formel 2.15 und Formel 2.16) resultiert:

$$F_R = \left(\frac{F_N}{H} \right) \tau \quad \text{Formel 2.17}$$

Die Teilung der Gleichung (Formel 2.16) durch die Normalkraft ergibt eine zweite Beziehung zu Adhäsionskomponenten des Reibungskoeffizienten:

$$\mu_{adh} = \frac{\tau}{H} \quad \text{Formel 2.18}$$

Die Gleichung für die Adhäsionskomponente wird auch in Form einer Druckspannung ausgedrückt.

Das Zustandekommen von chemischen Bindungen wird für möglich gehalten. Plausibler ist jedoch die Ausbildung physikalischer Adhäsionskräfte zwischen kontaktierenden Polymerwerkstoffoberflächen als Folge elektrostatischer Kräfte, wie sie als zwischenmolekulare Bindungskräfte in den Polymeren selbst wirksam sind. Sie beruhen bekanntlich auf [Erh 1980]

- Dispersionskräften,
- Dipolwechselwirkungen (permanente und induzierte),
- Wasserstoffbrückenbindungen und
- Ionenkräften.

Die durch Festkörperkontakt gebildeten Adhäsivkontakte werden bei Relativbewegung wieder getrennt und an anderen Stellen neu gebildet. Damit ist ein Energieverlust verbunden, der sich durch die Oberflächenenergien der beteiligten Werkstoffe beschreiben lässt. Dabei fällt die Reibungszahl einer Paarung stets ab, wenn die Oberflächenenergie erniedrigt wird.

Der Gleitvorgang wird als eine schnelle Folge von adhäsivem Haften, Verspannen, Trennen und Relaxieren von untereinander gekoppelten Molekülbereichen verstanden. Das makroskopische Geschehen wird dabei als eine Folge atomarer bzw. molekularer Platzwechsel aufgefasst, wobei thermisch aktiviert einzelne Teilchen von einer Lage in eine andere übergeführt werden. Eine Reihe von Phänomenen, inklusive das Ruckgleiten (Stick-Slip-Effekt) lassen sich mit einem derartigen Gleitmechanismus erklären.

Die Deformationskomponente spielt nur in besonderen Fällen eine wichtige Rolle, meistens ist deren Teilnahme an Gleitvorgängen vernachlässigbar. Diese Betrachtung kommt beispielsweise in Frage, wenn eine sehr harte und eine sehr weiche Materialpaarung in Kontakt kommen oder die angewendete Normalspannung das Eindringen oder das plastische Fließen eines der teilnehmenden Werkstoffes verursacht. Die Deformationskomponente ist in diesem Fall modelliert als eine einzige Oberflächenspitze, die in die Oberfläche eines weichen Materials eindringt und wie folgt definiert wird:

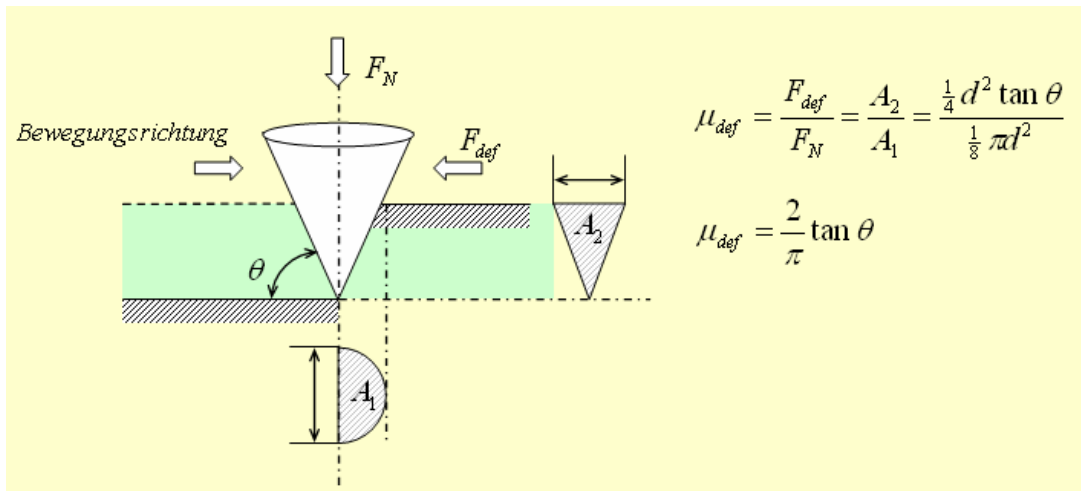


Abb. 2.9: Modellierung der Deformationskomponente [Ode 1985]

Meistens ist der Winkel θ in der Größenordnung von maximal 10 Grad, woraus eine geringen Adhäsionskomponente resultiert.

Ein weitverbreitetes Modell der Deformationskomponente der Reibung, bei der die Reibungsverluste im Wesentlichen auf eine plastische Deformation zurückgeführt werden, wurde von *Heilman und Rigney* [Hei 1981] vorgeschlagen. Dessen grundlegende Annahme geht davon aus, dass die Reibungsenergie als Arbeit zur plastischen Deformation beim Gleichgewicht während des Gleitens betrachtet werden kann. Dieses Modell wird durch die wahre Kontaktfläche A_{real} , die resultierende Schubfestigkeit τ_{max} des Werkstoffes und die mittlere Grenzflächen-Scherfestigkeit τ_s charakterisiert. Diese Parameter hängen wiederum von zahlreichen experimentellen Größen ab, wie z. B. den Beanspruchungsbedingungen (Belastung, Geschwindigkeit, Temperatur, etc.) und Werkstoffkenngrößen (Kristallstruktur, Härte etc.).

2.6 DER STICK-SLIP-EFFEKT

Stick-Slip ist ein physikalisches Phänomen, das direkt im Bezug zu den Begriffen Grenzschicht-Schmierung steht. Es ist genau das Versagen des dritten „Gesetzes“ - Variation der Reibkraft mit der Gleitgeschwindigkeit, der für den Stick-Slip-Effekt verantwortlich ist. *Bowden und Leben* stießen zufälligerweise 1939 auf das Stick-Slip-Phänomen an der University of Cambridge. Damals bauten sie einen Prüfstand zur Untersuchung des Phänomens und legten die Bezeichnung „Stick-Slip“ fest [Rab 1956] [Fee 1998]. Die Abb. 2.10 illustriert den klassischen Aufbau eines zur Untersuchung des Stick-Slip-Phänomens angewendeten Experiments.

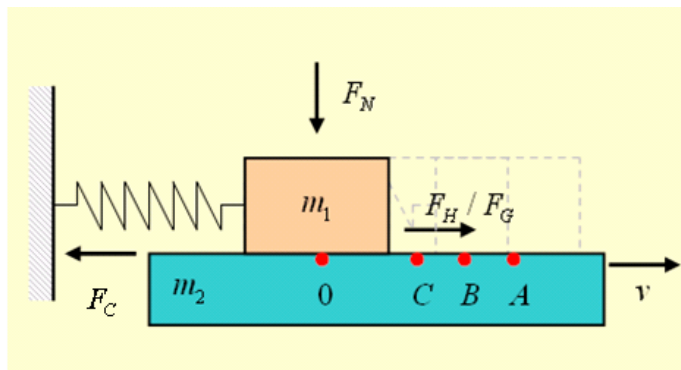


Abb. 2.10: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Stick-Slip-Bewegung [Rab 1956]

Ein Körper m_1 sei mittels einer elastischen Feder verankert und mit einer Normalkraft F_N auf einen Gegenkörper m_2 gedrückt. Dieser beginnt anschließend sich mit geringer und konstanter Geschwindigkeit v zu bewegen (die Beschleunigung sei vernachlässigt). Solange die durch Deformation, Adhäsion und Verzahnungen auftretende Haftreibungskraft F_H größer als die Federkraft F_F ist, behält m_1 seine Lage relativ zu m_2 am Punkt 0. Wird F_H von F_F am Punkt A überschritten, so gleitet der Körper m_1 aus der durch die Feder verspannten Lage beschleunigt heraus. Mit der Entspannung der Feder nehmen Federkraft F_F und Beschleunigung $a(t)$ ab. Ist die Federkraft F_F geringer als die Gleitreibungskraft F_G und erhält der Körper m_1 die relative Gleitbewegung aufrecht, findet keine Stick-Slip-Bewegung statt. Kommt hingegen der Körper m_1 wieder in die Ruhelage am Punkt C, werden die Bewegungszustände von den (Haft-)Kontaktkräften F_H bestimmt. Der Vorgang beginnt von neuem. Am Punkt B, der Hälfte des Weges zwischen A und C, ist die Federkraft gleich F_G . Wären μ_S und μ_D gleich, würde der Körper m_1 allmählich in die Gleitphase eintreten und an diesem Punkt kontinuierlich gleiten [Rab 1956]. Da die Haftreibungskraft von der Dauer des unbewegten Kontaktes abhängig ist, werden die Haftpeaks der nachfolgenden Haftphasen niedriger sein als die der ersten Haftphase [Hal 1988]. Stick-Slip-Bewegung kann regelmäßig (wiederholend oder periodisch) oder unregelmäßig (sprunghaft oder diskontinuierlich) sein, siehe Abb. 2.11.

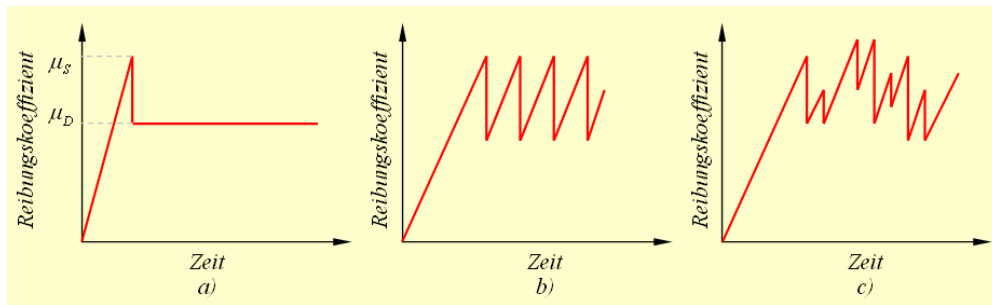


Abb. 2.11: Illustration der Reibungsverhalten: a) konstantes Gleiten, b) regelmäßiges und c) unregelmäßiges Stick-Slip-Verhalten

2.6.1 DIE BEWEGUNGSGLEICHUNGEN

Es sei $x(t)$ die Position des Körpers m_1 im System und $x(t) = 0$ für $t = 0$ und der Ursprung des Koordinatensystems stimmt damit überein. Der Körper m_2 wird in Bewegung mit der Geschwindigkeit v gesetzt. Anfänglich hält der Körper m_1 die Position aufgrund der Haftreibung aufrecht. Die Bewegung beider Körper wird durch

$$x(t) = v \cdot t \quad \text{Formel 2.19}$$

beschrieben [Rab 1956] [Lib 2005]. Ab der Zeit t_1 gleicht sich die elastische Kraft der Feder

$$F_C = k \cdot x(t) = k \cdot v \cdot t \quad \text{Formel 2.20}$$

dem kritischen Wert der Haftreibungskraft

$$F_H = \mu_S \cdot F_N = \mu_S \cdot m_1 \cdot g \quad \text{Formel 2.21}$$

an. Beim Überwinden von F_H beginnt der Körper m_1 eine Relativbewegung zum Körper m_2 unter der Wirkung der Gleitreibungskraft

$$F_G = \mu_D \cdot F_N = \mu_D \cdot m_1 \cdot g \quad \text{Formel 2.22}$$

Dabei wird angenommen, dass der Gleitreibungskoeffizient unabhängig von der Geschwindigkeit v , der Masse m_1 und Kontaktfläche ist. Die Bewegungsgleichung der Gleitphase lässt sich durch

$$m_1 \ddot{x} = F_G - kx(t) \quad \text{Formel 2.23}$$

mit folgenden Startbedingungen beschreiben:

$$\begin{cases} x(t_1) = \frac{\mu_S F_F}{k} \\ \dot{x}(t_1) = v \end{cases} \quad \text{Formel 2.24}$$

$y = y(t)$ sei die neue Koordinate der Position des Körpers

$$y(t) = x(t) - \frac{F_D}{k} \quad \text{Formel 2.25}$$

Dadurch wird die Bewegungsgleichung

$$m_1 \ddot{y} = -ky(t) \quad \text{Formel 2.26}$$

mit Startbedingungen

$$\begin{cases} y(t_1) = \frac{(\mu_S - \mu_D) F_N}{k} \\ \dot{y}(t_1) = v \end{cases} \quad \text{Formel 2.27}$$

Diese Gleichung besitzt eine Lösung in der folgenden Form:

$$y(t) = A \cos(\omega t + \varphi) = A \cos \omega t \cos \varphi - A \sin \omega t \sin \varphi \quad \text{Formel 2.28,}$$

wobei A und φ von der Startbedingung $\omega^2 = k/m_1$ abhängig sind. Mit $t_1 = 0$ als Startbedingung ergibt sich

$$y(t) = \frac{(\mu_S - \mu_D) F_N}{k} \cos \omega t + \frac{v}{\omega} \sin \omega t \quad \text{Formel 2.29}$$

Die Zeitgleichung $x = x(t)$ während der Gleitphase ist definiert durch

$$x(t) = \frac{\mu_D F_N}{k} + \frac{(\mu_S - \mu_D) F_N}{k} \cos \omega t + \frac{v}{\omega} \sin \omega t \quad \text{Formel 2.30}$$

Für ein durch geringe Geschwindigkeit charakterisiertes Regime, in welchem die Ungleichheit

$$\frac{v}{\omega} = v \sqrt{\frac{m_1}{k}} \ll \frac{(\mu_S - \mu_D)F_N}{k} \quad \text{Formel 2.31}$$

gilt, kann der Term $\sin \omega t$ in der Gleichung (Formel 2.7) vernachlässigt werden. Dadurch beschreibt die Bewegung des Körpers m_1 während der Gleitphase eine harmonische Oszillation mit Amplitude

$$\frac{(\mu_S - \mu_D)F_N}{k}. \quad \text{Formel 2.32}$$

Da m_1 und k konstant sind, ist die Gleichung *ausschließlich von der Differenz zwischen Haft- und Gleitreibungskoeffizienten bestimmt.*

Die Gleitphase endet nach einer halben Oszillation, wenn der Körper m_1 die Geschwindigkeit v wieder aufnimmt bzw. wenn er wieder an den Körper m_2 anhaftet. Von da an tritt der Körper m_1 in eine neue Haftphase ein, welche vom Haftreibungskoeffizienten beherrscht wird. Die Bewegung setzt sich mit periodisch alternierenden Haft- und Gleitphase fort.

Durch die gemeinsame Darstellung der Zeitgleichung für die Haftphase gemäß Formel 2.19

$$x(t) = v \cdot t$$

und der Zeitgleichung der Gleitphase

$$x(t) = \frac{\mu_D F_N}{k} + \frac{(\mu_S - \mu_D) F_N}{k} \cos \omega t \quad \text{Formel 2.33}$$

kann die gesamte Bewegung des Körpers m_1 nach Formel 2.33 beschrieben werden, siehe Abb. 2.12.

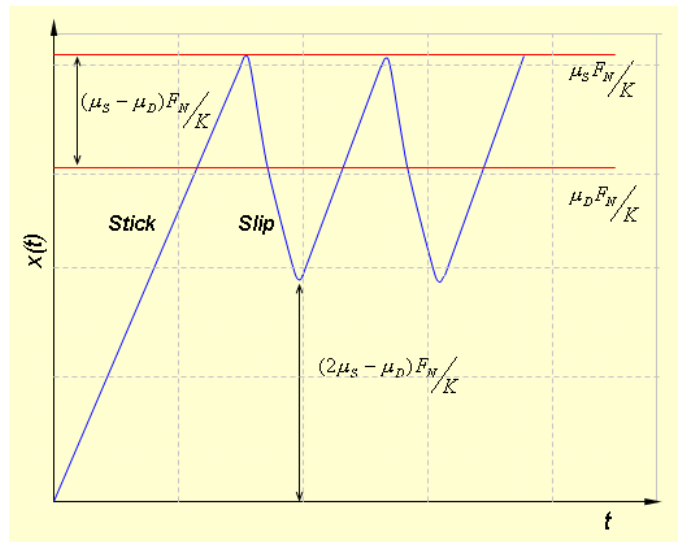


Abb. 2.12: Verlauf von $x(t)$ mit den Haft- und Gleitphasen [Lib 2005]

Das Schwanken der Reibungszahl zwischen verschiedenen Werten induziert dadurch je nach Kontakt-, Umgebungsbedingungen und Materialmerkmale, Bauteilschwingungen, die ernste und unerwünschte Konsequenzen haben, wie z. B. Erzeugung von Störgeräuschen, hohen Energieverlust, Oberflächenbeschädigung und Bauteilversagen. Es ist für das Quietschen einer Tür und das Klingeln einer Geigensaite ebenso verantwortlich wie für die Dynamik von Erdbeben [Mey] [Gao 1993] [Czi 1992], d. h. wenn gilt $\mu_s > \mu_D$.

Berman et al [Ber 1996] erstellte eine ausführliche Beschreibung der wichtigsten vorhandenen Theorien bzw. Modelle der Stick-Slip-Bewegung mehrerer Autoren. Dieser Modelle werden in den folgenden Schwerpunkten zusammengefasst:

i) auf die Oberflächentopographie (Rauheit) bezogenes Stick-Slip-Modell

In dieser Betrachtungsweise resultiert der Stick-Slip-Effekt aus dem Zusammenwirken der Oberflächenrauigkeiten. Verhaken und Aufeinanderstapeln der Rauheitsspitzen erzeugen Widerstandskräfte, die das Haften charakterisieren. Werden diese Hindernisse überwunden, entwickeln die Rauheitsspitzen eine beschleunigte Gleitbewegung, bis weitere Rauheitsspitzen aufeinandertreffen. Die Kontrollvariablen dieser Art Stick-Slip-Bewegung sind die Rauheit, die elastischen Eigenschaften und der Widerstand der Oberflächen gegenüber äußeren Einflüssen. Beispielsweise zeigt ein spröder Werkstoff kürzere Gleitphasen aufgrund der geringeren elastischen Rückstellung. Bei Reibpartnern mit höherer Härte werden ebenfalls die elastischen Rückstellungen während des Gleitens reduziert.

ii) *abstandsabhängiges Stick-Slip-Modell*

In diesem Modell wird vorausgesetzt, dass alle Festkörper-Festkörper-Kontakte einen charakteristischen Weg durchlaufen müssen, bevor das „Makro-Gleiten“ stattfindet. Dieses Modell rechnet mit einer charakteristischen Zeit, in der die Adhäsion in den Kontaktregionen ansteigt (Abb. 2.13). Je länger die Kontaktzeit, desto höher die benötigte Scherkraft. Die Kontaktstellen „kriechen“ über einen Abstand D_c bevor das Aneinandergleiten beider Oberflächen beginnt. Dieser Typ von Stick-Slip-Bewegung lässt sich hauptsächlich an nicht-geschmierten Systemen wie z. B. Papier-Papier und Stahl-Stahl beobachten.

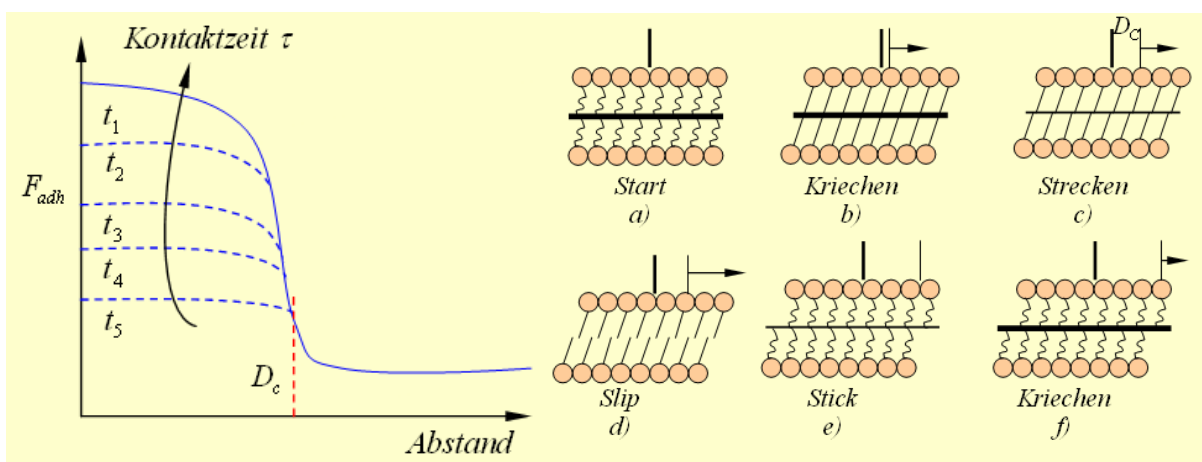


Abb. 2.13: Prinzip des abstandsabhängigen Stick-Slip-Modell [Ber 1996]

Dieses Modell wurde von *Rabinowicz* [Rab 1957] ursprünglich vorgeschlagen. Er untersuchte die Beziehung zwischen Haftreibungskoeffizient und der Kontaktdauer (μ_D, t) sowie Gleitreibungskoeffizient und der Gleitgeschwindigkeit (μ_S, v) und die Rolle dieser Beziehung beim Auftreten einer Stick-Slip-Bewegung. Dabei stellte er fest, dass erst nach einem kritischen Verfahrweg von 10^{-2} mm der Gleitvorgang einen konstanten Gleitzustand erreichte und der Haftreibungskoeffizient eine Abhängigkeit von der Kontaktdauer zwischen beiden Festkörpern zeigte. Für sehr geringe Kontaktzeiten sind daher der Haft- und der Gleitreibungskoeffizient praktisch gleich. Der Verlauf des Haftreibungskoeffizienten als Funktion der Kontaktdauer und des Gleitreibungskoeffizienten als Funktion der Gleitgeschwindigkeit stellen wesentliche Aspekte in der Analyse der Stick-Slip-Bewegung dar.

iii) *geschwindigkeitsabhängiges Modell*

Im Gegensatz zu den oben erwähnten Modellen beschäftigt sich das geschwindigkeitsabhängige Modell mit geschmierten kontaktierenden Oberflächen. Der einfachste Fall ist das rein geschwindigkeitsabhängige Reibungsgesetz. In der Ruhelage verfestigt sich der Schmierfilm zwischen beiden Oberflächen und verursacht dadurch den Anstieg der Haftkraft F_H . Wenn die Scherkraft diese überschreitet, gleiten die Oberflächen mit einer geringeren Reibkraft F_R , weil der Schmierfilm sich in einem geschmolzenen Zustand befindet. Der Prozess besteht aus hintereinander stattfindenden Verfestigungs- und Schmelzphasen des Schmierfilmes [Ber 1996] [Per 1998].

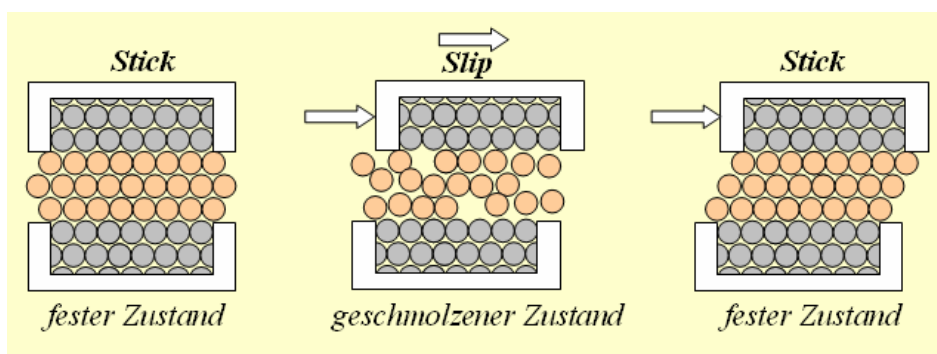


Abb. 2.14: Prinzip geschwindigkeitsabhängiges Modell [Per 1998]

C. Gao *et al.* [Gao 1993] untersuchten den Einfluss von Gleitgeschwindigkeit, Normalbelastung und Feuchtigkeit auf das Stick-Slip-Verhalten eines aus vergoldeten leitenden Fasern bestehenden Schlittens. Durch die gleichzeitige Messung des elektrischen Widerstandes und des Reibungskoeffizienten stellten sie fest, dass die Amplitude der Stick-Slip-Bewegung mit der Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit abnimmt. Durch die höhere Geschwindigkeit wird die Haftphase verkürzt. Für alle angewendeten Normalbelastungen, welche im Bereich von 0,5 N bis 8,0 N sich befinden, steigt die Stick-Slip-Amplitude mit der Erhöhung der Feuchtigkeit. Außerdem ist der Stick-Slip-Effekt durch die Zunahme der Kontaktflächen bei höheren Belastungen stärker.

C. Gao *et al.* [Gao 1993] betätigten noch, dass $\mu_s > \mu_D$ eine erforderliche Bedingung für das Stattfinden einer Stick-Slip-Bewegung ist. Das Verhältnis $\left(\frac{d\mu_s}{dt}\right)_{t \rightarrow 0}$ drückt die Rate aus, mit der μ_s in sehr geringer Zeit zunimmt und stellt einen ebenso kritischen Parameter dar.

Das Stick-Slip-Verhalten einiger Kunststoffe, die im Automobilinnenraum zum Einsatz kommen, wurde von *Eiss et al.* [Eis 1998] intensiv studiert. Sie zeigten, dass bei Polyolefinen, wie z. B. Polypropylen (PP), mit geringem Potential zur Entwicklung von Störgeräuschen im Automobilinnenraum ein stufenloser Übergang zwischen Haft- und Gleitphase stattfindet. Der Zusatz von Glasfasern im Polypropylen (FPP) verursacht allerdings den Abfall des Reibungskoeffizienten beim Starten der Gleitphase. Weitere Untersuchungen führte Eiss et al. an Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polycarbonate (PC), ABS/PC-Blend und mit Glasfaser verstärktem Styrol-Maleinsäure-Copolymer (SMAC) durch. Mittels eines Stift-Schlitten-Prüfstandes ermittelten sie das Stick-Slip-Verhalten von Materialpaarungen aus der gleichen Polymersorte (Gleiches gegen Gleiches). Dabei wurden die Reibkraft und die Relativgeschwindigkeit als Funktion der Normalbelastung und der Steifigkeit des Systems gemessen. Sie stellten dadurch fest, dass die Kombination von geringer Systemsteifigkeit und hoher Normalbelastung zu einem hohen Stick-Slip-Risiko führen. Der geringste Stick-Slip-Effekt wurde ermittelt bei

- geringerem Haftreibungskoeffizienten,
- geringerem Abfall des Gleitreibungskoeffizienten
- und geringerer maximaler Geschwindigkeit.

Durch die Verstärkung von ABS/PC-Blend mit Glasfasern nahm außerdem das Stick-Slip-Verhalten laut ihrer Ergebnisse ab. *Eiss et al.* ordnen die Reduzierung des Haftreibungskoeffizienten bei den mit Glasfasern verstärkten Kunststoffen der Abnahme der Kontaktflächen zu. Die Verstärkung implizierte den Anstieg des Biegemoduls und der Härte, wodurch die Kontaktfläche geringer wird.

Im letzten Teil ihrer Untersuchungsreihe beschäftigten sich *Eiss et al.* [Eis 1998] mit dem Vergleich des Stick-Slip-Verhaltens zwischen FPP/PC- und FPP/SMAC-Paarungen, und PC/PC- und SMAC/SMAC-Paarungen. Die gleichen Ziele wie bei den vorherigen Untersuchungen wurden verfolgt. Dazu ermittelten sie den Effekt der Rauheit und der Oberflächenbeschaffenheit. Daraus resultierte, dass die verstärkten Kunststoffe (FPP/PC und FPP/SMAC) ein schwächeres Stick-Slip-Verhalten als die gleichen Probenpaarungen gegen sich selbst (PC/PC und SMAC/SMAC) zeigten. Bei der Oberflächenbeschaffenheit mit geringsten mittleren Radien der Rauigkeiten wurden die geringsten Werte des Haftreibungskoeffizienten nachgewiesen. Ebenso wurde an diesen Varianten die Reduzierung des Haftreibungskoeffizienten durch die Verdoppelung der Normalbelastung am stärksten festgestellt.

Die von *Erhard* [Erh 1980] erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass sich die Reibungs- und Verschleißphänomene bei Gleitpaarungen mit Polymerwerkstoffen auch unter technischen Gleitbedingungen auf Adhäsions- und Deformationsmechanismen zurückführen lassen.

Zur Beurteilung des adhäsivbedingten Gleitens können die zwischenmolekularen Bindungsenergien des Polymerwerkstoffs herangezogen werden. Ihre Wirkung an der Grenzfläche kann über die Oberflächenenergie und deren polare und dispersive Anteile bewertet werden.

2.7 DURCH DAS STICK-SLIP-PHÄNOMEN ERZEUGTE STÖRGERÄUSCHE

Schon *Galileo Galilei* (1564 – 1642) erwähnte, dass ein Wasserglas zur Schallemission gebracht werden kann, beim einfachen Reiben eines menschlichen Fingers auf der Kante des Glases [Fee 1998].

Die Entstehung von Transportmitteln auf Rädern führte zu Geräuschproblemen schon in der Antike und wurde wahrscheinlich dann zum ersten Mal dokumentiert. In einer Beschreibung beschwerten sich römische Sklaven über das schreckliche Geräusch von vorbeifahrenden Wagen [Fee 1998].

Heutzutage fallen einem Autobesitzer die stick-slip-bedingten Störgeräusche im Fahrzeuginnenraum als ein negativer Hauptindikator von Konstruktionsqualität und Dauerhaltbarkeit auf. Auf der anderen Seite strengen sich die Automobilhersteller an, um die hohen Kosten des Stick-Slip-Effektes zu vermeiden [Kav 2001] [Zsc 2004]. Da die Geräuschquellen sich im nahen Umfeld des Benutzers befinden, werden sie z. T. auch stärker als Belästigung empfunden. Die Ursache für ein akustisch ungünstiges Verhalten kann bei Kunststoffen in der Polymer-Charakteristik des jeweiligen Werkstoffs liegen und diese sich wiederum auf die akustischen Eigenschaften und das Stick-Slip auswirken [Güb 1989].

Die Automobilindustrie hat in der Vergangenheit bis zur aktuellen Gegenwart immer eine Führungsrolle im technologischen Fortschritt eingenommen. Und gerade dabei geht es um die Bedeutung von neuen Werkstoffen und Bauweisen für zukünftige Fahrzeuge. Von den unterschiedlichsten Branchen der Automobilindustrie bis hin zum Zulieferer, Maschinenproduzenten und Hersteller, beschäftigten sich mit dem Werkstoff Kunststoff und seinem Veränderungs- und Anpassungspotential, neuartigen Konstruktionskonzepten (Bauweisen) und optimierten Verarbeitungsverfahren.

Der Einsatz von Kunststoffen in der Automobilproduktion ist immens und wächst kontinuierlich mit den zunehmenden Komfort-, Sicherheits- und Qualitätsanforderungen. Kunststoffe finden überall im Auto Anwendung, sei es im Außen- oder Innenbereich als Kabelummantelung oder Türverkleidung, verstärkt oder als Kunstleder. Günstige Preise, Energieeinsparung und Formgebungsvielfältigkeit zählen zu den Hauptvorteilen, die die Kunststoffe zum Erfolgsmaterial in der Automobilherstellung machen.

Infolge von Fahrbewegung und Fahrbahnanregung können an Stellen, wo flächige Kontakte von Bauteilen in Kfz-Innenraum stattfinden, Bauteilschwingungen auftreten, die zu Sekundärgeräuschen wie Klapper-, Knack-, Knarr-, Knarz- und Quietschgeräuschen führen und von Benutzern als Belästigung empfunden werden. Aufgrund der geringeren Geräuschwirkung von Automobilexterieur werden die von akustisch ungünstigen Verkleidungsteilen erzeugten Klapper-, Knarr- und Quietschgeräusche bei modernen Fahrzeugen nun deutlicher wahrnehmbar.

Schon im Jahr 1983 demonstrierte eine Marktbefragung, dass Knarzen und Knarren das drittgrößte Problem nach 3-monatigem Autobesitz war. Nach aktuellen Aussagen der Automobilindustrie liegen Garantieleistungen bezüglich der Störgeräusche im Fahrzeuginnenraum ungefähr bei 10 % der Reklamationsgründe. Instrumententafel, Sitze und Türen sind für 50 % der Störgeräuschproblematik durch Knarzen, Knarren und Klappern verantwortlich. Die gewöhnliche Methode des „Finden-und-Fixierens“ um die Qualität zu verbessern, führt zu einer erheblichen Zunahme der Produktkosten mit nachgewiesener geringer Lebensdauer [Kav 2001].

Ein Stick-Slip-Zyklus findet normalerweise bei geringen Frequenzen statt. Die Abgabe der während der Haftphase gespeicherten Energie erzeugt Schwingungen der Oberflächen, die hörbare Knarzgeräusche im Bereich von 200 Hz bis 10000 Hz hervorrufen. Die Ursache dafür sind inkompatible Kombinationen von Materialien oder ungenügende Kontrolle der Geometrie. Relative Bewegungen aufgrund struktureller Mängel resultieren meistens aus ungenügender Steifigkeit, übertriebenem Kräfteinsatz oder schlechter modaler Anpassung der Bauteile [Kav 2001].

Der Stick-Slip-Effekt kann bei allen Materialien auftreten. Bei harten Materialien wie bei Metallen, kann die Reduzierung des Stick-Slip-Effektes meist erreicht werden, indem eine Behandlung oder Modifizierung der Oberfläche vorgenommen wird, z. B. durch Lackieren oder Applikation von Antiknarzmitteln. Hingegen bei flexiblen Materialien lässt sich die

Problematik nicht so einfach lösen. Bei Kunststoffen z. B. spielt die Deformierbarkeit eine ausschlaggebende Rolle. Das Deformationsverhalten trägt in bedeutenden Ausmaßen zur Entwicklung von Knarzgeräuschen, bei, d.h. bei diesen Materialien kann der Stick-Slip-Effekt nicht nur anhand reiner Oberflächenbehandlungen oder –modifizierung beeinflusst werden. Änderungen der inneren Eigenschaften und Struktur sind notwendig um eine effektive Reduzierung des Stick-Slip-Effekts zu ermöglichen [Loh 2004] [Oha 1978].

Eine Methode, das Auftreten der stick-slip-bedingten Störgeräusche zu minimieren, ist die bedachte Wahl passender Materialpaarungen. Bei den ersten Versuchen Störgeräusche und Reibungseigenschaften zu korrelieren untersuchten *Hunt et al.* [Hun 2001] die Kompatibilität von 17 kritischen und nicht-kritischen Materialpaarungen, wie z. B. PVC, ABS, TPO, PP, von lackierten Metallteilen aus der Instrumententafel und der zentralen Konsole, etc.. Ein neues Konzept eines Prüfstandes für die Untersuchung von aneinander reibenden Materialpaarungen wurde bei realistischen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen eingesetzt. Dabei wurden die Reibungseigenschaften (μ) der Materialien und der Schalldruck beim Stick-Slip ermittelt. *Hunt et al.* ordneten die Materialpaarungen bezüglich der Tendenz Störgeräusche zu verursachen nach Farbe: „grün“ (gut bzw. leise), gelb (mittelmäßig) und rot (schlecht bzw. laut).

Die wichtigsten Vorbeugungsmaßnahmen gegen die Entstehung von stick-slip-bedingten Störgeräuschen können laut *Kavarana et al.* [Kav 2001] in vier Punkten zusammengefasst werden, nämlich:

- *Strukturelle Integrität.* Verbesserte strukturelle Integrität impliziert passende statische und dynamische Steifigkeit sowohl lokal als auch global. Höhere Steifigkeit ist allgemein besser aber zu hohe Steifigkeit ist teuer und schwer.
- *Kombination der Materialpaarungen.* Da die Bedingungen, die zu stick-slip-bedingten Störgeräuschen führen, meistens zu simulieren sind, ist eine Prophylaxe durch die sinnvolle Wahl der Materialkombinationen möglich. Beispielsweise werden Störgeräusche sehr oft an Kontaktstellen verursacht, an denen Elastomere beteiligt sind. Eine ganz neue Tendenz ist die Applikation von stick-slip-reduzierenden bzw. knarzreduzierenden Beschichtungen und Oberflächenprofilen.
- *Kontrolle des Herstellungsprozesses.* Sehr oft resultieren akustische Probleme aus der ungenügenden Kontrolle des Herstellungsprozesses oder stärkeren Prozessschwankungen. Die Abweichungen in der Qualität in Fahrzeugen der preisgünstigen Klassen sind höher.

- „*Smartes*“ *Design*. Ein gut überlegtes Design besteht aus mehreren zu verbessernden Faktoren, welche effektive Lösungen hinsichtlich einer bestimmten Problematik liefern können. Eine erhebliche Zahl von Design-Verbesserungen in der Automobilindustrie wird heutzutage als Resultat von schlechten Erfahrungen mit alten Fahrzeugmodellen unternommen.

Nicht nur die Kombination idealer Materialien sondern auch die Änderung deren Eigenschaften bietet eine Möglichkeit Störgeräusche zu minimieren, wie z. B. die Dämpfungseigenschaften. Eine größere innere Dämpfung des Materials ergibt eine Reduzierung des Körperschalls. Die innere Dämpfung der in das Bauteil eingeleiteten Schwingungen basiert auf der inneren Reibung bzw. auf dem Schwingungsverhalten der elastischen Anteile im Material. Eine möglichst hohe Absorption lässt sich durch geeignete absorbierende Materialien, beispielsweise offenzellige Schäume, erzielen. Die Dämpfungseigenschaften von Kunststoffen werden zusätzlich durch Art und Anteile verschiedener Füllstoffe beeinflusst [Zsc 2004].

Die Minimierung der stick-slip-bedingten Störgeräusche wird auch durch die direkte akustische Abschirmung der Schallquellen behandelt. Abdeckungen und Hauben, die gleichzeitig andere Aufgaben haben und z. B. Abdichtungen zum Schutz vor Verschmutzungen oder Sicherheits- bzw. Designelemente übernehmen oft diese Rolle. Für solche Bauteile sind Kunststoffe bevorzugt, da sie eine große Gestaltungsfreiheit mit hoher Funktionsintegration und niedrigen Herstellungskosten verbinden [Zsc 2004].

Neben der Wahl einer geeigneten Materialpaarung können gezielte konstruktive Maßnahmen das Stick-Slip-Verhalten im Fahrzeuginnenraum beeinflussen. Das Schwingungsverhalten eines Bauteils und die Schallabstrahlung bzw. –absorption hängt von der Bauteilgeometrie ab.

3 KAPITEL

3.1 BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN MESSMETHODEN UND -GERÄTEN

Die ausgesuchten Messmethoden zur Erarbeitung des oben genannten Forschungsvorhabens werden in diesem Abschnitt beschrieben. Sie schließen die modernsten zur Verfügung stehenden Technologien im Bereich der Charakterisierung von bahnenartigen Erzeugnissen ein. Neben der Analyse des Reibungs- und Deformationsverhaltens wurden andere zusammenhängende Parameter wie z. B. Oberflächenbeschaffenheit und mögliche Adhäsionsvorgänge studiert. Weitere Messverfahren kamen zur Ergänzung im Laufe der Arbeiten zum Einsatz, welche die allgemeine Charakterisierung der PVC-Erzeugnisse ermöglichten.

3.1.1 STICK-SLIP-PRÜFSTAND

Der Stick-Slip-Prüfstand der Firma ZINS Ziegler-Instruments erlaubt die Ermittlung der Stick-Slip-Tendenz, hauptsächlich von bahnenartigen Probenpaarungen gleicher oder unterschiedlicher Materialgruppe. Das Prinzip der Stick-Slip-Messung beruht grundsätzlich darauf, dass zwei Proben unter Einwirkung einer Normalkraft und mit vordefinierter Geschwindigkeit in Relativbewegung zueinander versetzt werden. Die ausgewählten Materialoberflächen werden dadurch aneinander „scherend“ gerieben.

Der Prüfstand setzt sich grundsätzlich aus einer Bewegungseinheit, dem flachen Schlitten, und einer Krafteinheit, einer mit einem runden Probenträger ausgerüsteten Blattfeder, zusammen. Die Schlittenprobe (60 mm x 70 mm) und Federprobe (30 mm x 50 mm) werden mittels doppelseitigen Klebebandes aufgeklebt. Durch pneumatischen Antrieb wird die Federprobe gegen die Schlittenprobe mit vordefinierter Normalkraft (F_N) vorgefahren und anschließend der Schlitten durch einen elektrischen Motor in eine lineare Oszillationsbewegung versetzt. Während einer vollständigen Messung werden standardmäßig zwei Normalkräfte, 10 N und 40 N, und zwei Schlittengeschwindigkeiten, 1,0 mm/s und 4,0 mm/s, angewendet. Die Messung an den PVC-Folien wurde jedoch mit 30 N anstatt 40 N durchgeführt, da die entstandenen Reibkräfte bei 40 N eine Überbelastung des Prüfstandes verursachten. Die oszillierende Bewegung des Schlittens besteht aus drei

Perioden mit einem gesamten Verfahrweg von 30 mm. Die Abb. 3.1 illustriert den Aufbau des Stick-Slip-Prüfstandes.

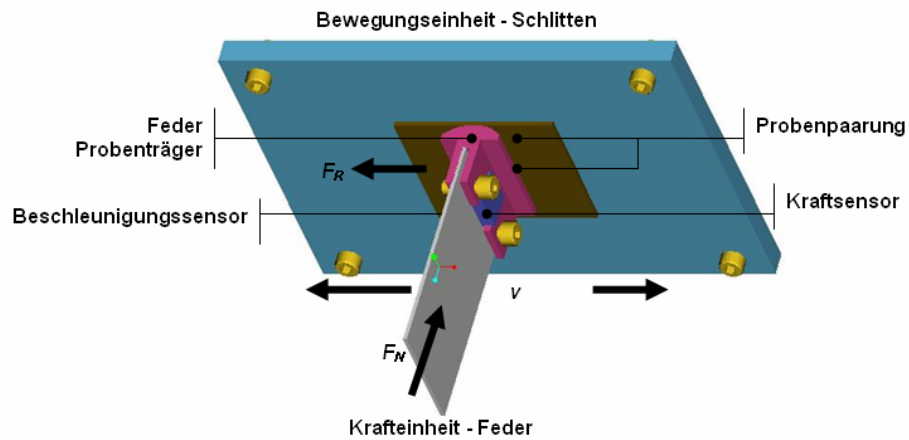


Abb. 3.1: Aufbau und Messprinzip des Stick-Slip-Prüfstandes mit Bewegungs- und Krafteinheit (F_N = Normalkraft, F_R = Reibkraft und v = Schlittengeschwindigkeit)

Der Wechsel zwischen Anhaften und Gleiten ist für die Entstehung von stick-slip-bedingten Störgeräuschen verantwortlich. Das Bewegungsverhalten der Feder charakterisiert ein Maß für den Stick-Slip-Effekt.

Das Diagramm in der Abb. 3.2 zeigt den Verlauf der wichtigsten Eingangsparameter zur Beurteilung der Stick-Slip-Neigung eines Materials nach dem in der Abb. 3.1 dargestellten Messprinzip. Eine gesamte Periode T , umfasst die Zeit von $t_1 < t < t_5$ und teilt sich in zwei Stick-Slip-Phasen. Während der ersten Phase, im Zeitintervall $t_1 < t < t_3$, fährt der Schlitten mit einer negativen Relativgeschwindigkeit, $v < 0$, und überstreicht den Weg $x(t)$.

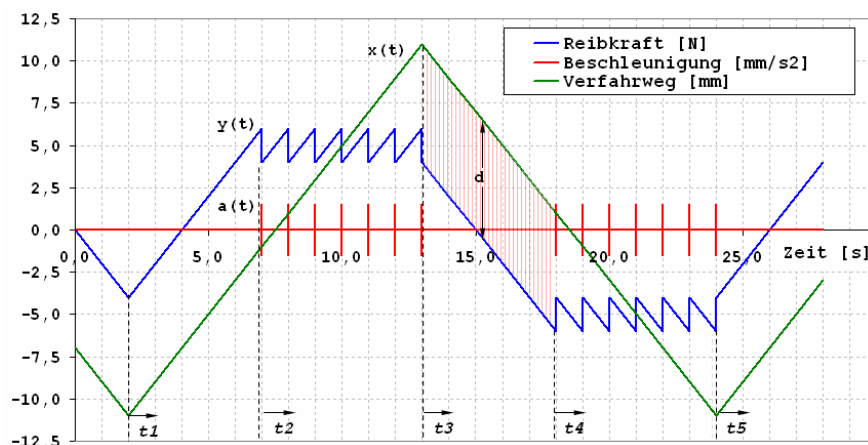


Abb. 3.2: Idealisierter Kraft- $y(t)$, Weg- $x(t)$ und Beschleunigungsverlauf $a(t)$ beim Auftreten des Stick-Slip-Effektes am Stick-Slip-Prüfstand in Anlehnung an [Har 1983]

Je nach Kraftverhältnissen zwischen der Haftreibungskraft $F_R = F_N \cdot \mu_S$ und der Biegekraft der Blattfeder $F_F = c \cdot x$ an den Übergangsstellen $t = t_U$, mit $v_r(t_U) = 0$, kann nach einer Gleitphase eine Haftphase für

$$F_R \leq F_N \cdot \mu_S \quad \text{Formel 3.1}$$

bzw. eine Gleitphase für

$$F_R > F_N \cdot \mu_S \quad \text{Formel 3.2}$$

eintreten.

Zum Zeitpunkt $t = t_1$ ist die Gleichung (Formel 3.1) erfüllt, sodass die Blattfeder am Schlitten für eine gewisse Zeit haftet, bis die Biegekraft der Feder die Haftreibungskraft überwindet ($t = t_2$), es gilt die Gleichung (Formel 3.2), und ein beschleunigter Gleitvorgang beginnt. Die Feder rutscht mit einer gewissen Beschleunigung $a(t)$ zurück, die Haftreibungskraft überwindet die Biegekraft noch mal und eine neue Haftphase fängt an.

Im Zeitintervall $t_2 < t < t_3$ findet der Wechsel zwischen Haft- und rascher Gleitreibung mehrmals statt, welcher das Phänomen als Stick-Slip (Haft-Gleit-Bewegung) charakterisiert. Während des Haftens ist die Differenz d zwischen der Schlittenbewegung $x(t)$ und dem Kraftverlauf der Feder $y(t)$ konstant, da die Relativgeschwindigkeit zwischen der Blattfeder und dem Schlitten $v_r = 0$ ist. Die Feder bewegt sich mit dem Schlitten zusammen.

Die Werte der Reibkräfte während der Haftphase (Stick) und der Beschleunigung während der Gleitphase (Slip) werden von Bewegungs- und Kraftsensoren (DMS) abgelesen. Zusammen mit der Anzahl der Ausschläge der Federprobe gehen diese Werte in die Berechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ) ein, welche die Stick-Slip-Neigung der untersuchten Probenpaarung ausdrückt und sich aus einer ganzzahligen Skala von 1 bis 10 zusammensetzt. Mit RPZ von 1 bis 3 zeigt die Materialpaarung keine Stick-Slip-Neigung, zwischen 4 und 5 besteht eine bedingte Neigung und von 6 bis 10, ist das Stick-Slip-Risiko definitiv festzustellen [The 2003].

3.1.2 FRICTION TESTER

In Anlehnung an die Standardmethode DIN 53 375 wurden die bahnenartigen Proben am Friction Tester der Firma Thwing-Albert gemessen. Standardmäßig wird eine Probe (obere) mit einer 63 mm x 63 mm Fläche unter der Belastung eines 200 g schweren Schlittens gegen die zweite Probe (untere) gedrückt. Die obere Probe wird mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/min relativ zu der unteren Probe bewegt. Die aus den Wechselwirkungen zwischen beiden Materialien entstandenen Reibkräfte werden abgelesen und mit Anwendung der Software TALAS in den Reibungskoeffizienten umgerechnet.

Das Verhältnis zwischen der Reibkraft und der Normalkraft ergibt nach dem Coulomb'sche Gesetz die sogenannten Reibungskoeffizienten (siehe Abschnitt 2.3). Dadurch wurden die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten ermittelt und, basierend auf der Formel 2.32, die Differenz ($\mu_S - \mu_D$) berechnet und als ein Indikator zur Stick-Slip-Neigung angesetzt.

Die mechanischen Eigenschaften der gesamten Folienvarianten umfasst ein breites Spektrum, das mit der Normalbelastung von 1,96 N anscheinend nicht zu decken ist. Daher wurde anstatt bei den PVC-Bahnen in der Phase II der Untersuchungen einer Normalbelastung 10 N anstatt 1,96 N (laut DIN 53 375) angewendet.

3.1.3 RHEOMETER

Einige grundlegende rheologische Parameter werden mit Hilfe des Platten-Platten-Modells definiert. Die obere Platte mit der (Scherv-) Fläche A wird durch die Scherkraft F_S mit der Geschwindigkeit v um den Betrag s bewegt.

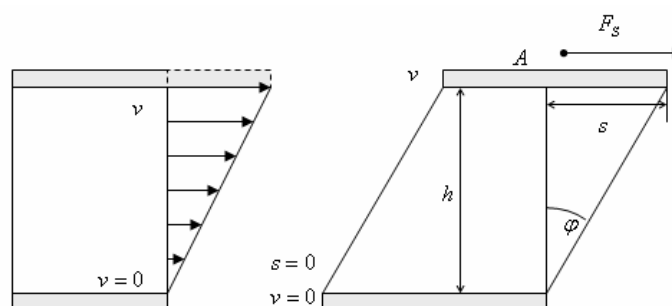


Abb. 3.3: Das Platte-Platte-Modell für Scherversuche und die Verformung der Messprobe im Scherspalt [Sch 2000]

Der Quotient

$$\tau = \frac{F_S}{A} \quad \text{Formel 3.3}$$

definiert die Scher- bzw. Schubspannung. Die Scherdeformation wird als γ durch das Verhältnis

$$\gamma = \frac{s}{h} \quad \text{Formel 3.4}$$

bestimmt, wobei h den Spalt zwischen beiden Platten darstellt.

Das idealelastische Deformationsverhalten wird formal durch das Hook'sche Gesetz beschrieben. Dabei wird der Schubmodul G definiert, welcher unabhängig von Höhe und Dauer der Scherbelastung ist.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad \text{Formel 3.5}$$

Die wirklichen geometrischen Verhältnisse in einem Rheometer-Messsystem sind nicht so einfach wie im Platte-Platte-Modell. Bei hinreichend engem Messspalt sind die Voraussetzungen jedoch erfüllt, sodass die Definitionen der rheologischen Parameter übernommen werden können [Mez 2000].

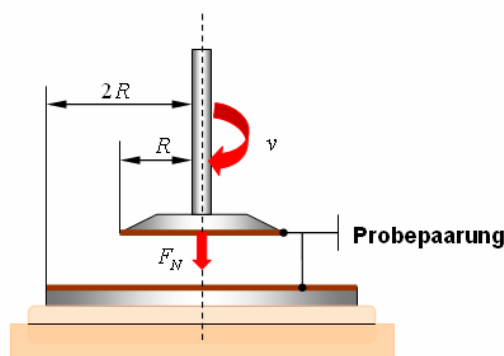


Abb. 3.4: Schematische Darstellung des Platte-Platte-Messsystems am Rheometer

Das in der Abb. 3.4 gezeigte Schema, illustriert die Konstruktion des Rheometers MCR 300 von Physica Messtechnik GmbH. Es arbeitet mit einer Luftlagerung und ermöglicht, abhängig von der verwendeten Messgeometrie, Messungen in einem Viskositätsbereich kleiner als Wasser bis hin zu Festkörpern mit einer Drehmomentauflösung von $<0,002 \mu\text{Nm}$. Die Option

zur Messung bzw. Regelung der Normalkraft bei der Spalteinstellung und während der Messung garantiert für die Ermittlung der Scherdeformation reproduzierbare Ergebnisse.

Die Platten des Messsystems haben Durchmesser von 25 mm (obere) und 50 mm (untere), worauf die mit der gleichen Größe zu untersuchende Probenpaarung geklebt wird. Während der Messung wird die Schubspannung zwischen der sich berührenden Probenpaarung über die Zeit kontinuierlich gesteigert. Wenn die Elastizität und die Deformation der Proben überwunden sind, kommt es zu einer Drehbewegung des Messsystems auf der unteren Platte. Unter einer Belastung von 10 N wurde die bei einer Schubspannung von 5 kPa entstandene Scherdeformation zur Charakterisierung der Lederproben und 7 kPa, 9 kPa und 15 kPa bei den PVC-Folien herangezogen.

Das Prinzip der Bestimmung der Scherdeformation am Rheometer beruht im Wesentlichen auf dem gleichen Prinzip wie am Stick-Slip-Prüfstand: unter der Wirkung einer vordefinierten Normalkraft und Geschwindigkeit werden die Reibpartner aneinander gerieben. Beide Methoden weichen allerdings in der Art der Bewegung voneinander ab, am Stick-Slip-Prüfstand, linear oszillierend, und am Rheometer rotierend. Ein Nachteil bei der Ermittlung der Scherdeformation liegt daran, dass die Unterscheidung zwischen elastischem und plastischem Verformungsanteil nicht möglich ist.

3.1.4 UNIVERSAL SURFACE TESTER (UST[®])

Mit dem UST[®] der Firma Innowep können verschiedenartige Messungen physikalisch-mechanischer Materialeigenschaften durchgeführt werden. Das Prinzip des Prüfstandes beruht auf dem eines Profilometers. Dabei wird die Oberfläche der Probe mit einem je nach zu messenden Eigenschaften auszuwählenden Taster abgetastet. Die Ausübung einer Normalkraft und Einstellung einer Verfahrensgeschwindigkeit sind genauso messmodulabhängig einzustellen. Messkräfte im Bereich von 90 mN bis 1000 mN, die unterschiedlichen Messmodule, Tasterprofile, und der in xy-Richtung steuerbare Messtisch machen den UST[®] zu einem universellen Werkzeug im Bereich der Materialcharakterisierung. Folgende Eigenschaften wurden am UST[®] ermittelt:

- Rauheit
- Kompressibilität
- Dynamische Deformation
- 3D-Oberflächenprofil

3.1.4.1 RAUHEIT

Die Erstellung des Rauheitsprofils und der entsprechenden Kennwerte der Lederprobe und PVC-Folie erfolgte am UST[®] nach DIN 4287. Hierfür wird die Oberfläche mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit und Last über eine vorgegebene Messstrecke abgetastet und das Rauheitsprofil gleichzeitig abgebildet.

Durch die Integration aller Abstände des Ist-Profiles oder des Rauheitsprofils von der jeweils maßgeblichen Bezugslinie können integrale Rauheitsmessgrößen definiert werden. An erster Stelle steht der arithmetische Mittenrauwert (R_a). Er ist definiert als das arithmetische Mittel der absoluten Werte der Abweichung des Profils $y(x)$ innerhalb der Bezugstrecke l_m . R_a entspricht daher der Höhe eines Rechtecks mit der Bezugstrecke l_m als Breite.

$$R_a = \frac{1}{l} \left[\sum_{i=1}^n A_{oi} + \sum_{i=1}^n A_{ui} \right] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} R_a = \frac{1}{l} \int |y(x)| dx \quad \text{Formel 3.6}$$

Die gemittelte Rautiefe (R_z) drückt das arithmetische Mittel aus den Einzelrautiefen (Z_i) fünf aneinandergrenzenden Einzelmessstrecken aus. Siehe Abb. 3.5 a) und b).

$$R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \quad \text{Formel 3.7}$$

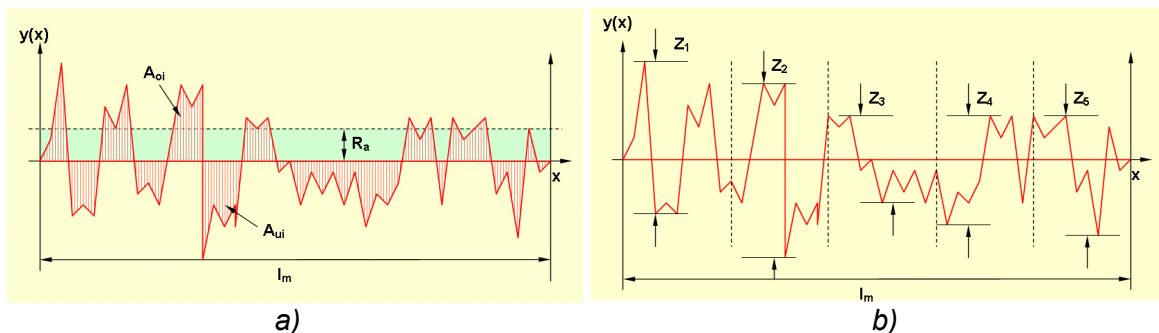


Abb. 3.5: Illustrationen zur allgemeinen Definition des a) arithmetischen Mittenrauwerkes (R_a) b) und der mittleren Rautiefe (R_z).

3.1.4.2 KOMPRESSIBILITÄT UND DYNAMISCHES DEFORMATIONSVERHALTEN AM UST®

Bei der Ermittlung der Kompressibilität an den Lederproben wurde das Material in der Ruhelage anhand eines kugelförmigen Stahlusters mit 1,8 mm Durchmesser mit 90 mN Normalkraft senkrecht belastet. Die dynamische Deformation erfolgte mit der Anwendung des 0,8 mm Durchmesser Stahlusters bei 0,5 mm/s und 1,0 mm/s über eine gesamte Messstrecke von 10 mm. Sowohl die Kompressibilität als auch die dynamische Deformationen der PVC-Bahnen wurden unter 700 mN bei Normalbelastung durchgeführt. Die gleichen Geschwindigkeiten wurden bei der dynamischen Deformation angewendet. Die Abb. 3.7 illustriert das Erfassungsprinzip in Anlehnung an DIN EN 433. Das Höhensignal des Tasters wird über eine Belastungs- und eine Entlastungsphase, die jeweils 500 s dauern, abgelesen. Da noch keine Standardisierung für diese Methode vorhanden ist, wurden die Messbedingungen in Bezug auf die Eigenschaften der jeweiligen Materialien und die erhaltene Genauigkeit der Ergebnisse durch Vorversuche bestimmt.

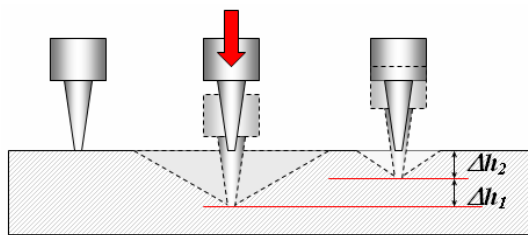


Abb. 3.6: Messung der Kompressibilität (statische Deformation) und der dynamischen Deformation am UST®

Die Auswertung der Deformationsanteile ist in der Abb. 3.7 zu sehen. Aus den abgelesenen Eindrücktiefen Δh_1 und Δh_2 am Ende beider Phasen werden die jeweiligen elastischen und plastischen Deformationsanteile errechnet. Bei einer vordefinierten Geschwindigkeit, welche die Messung der dynamischen Deformation charakterisiert, werden die gleichen Werte herangezogen und über die gesamte Messstrecke gemittelt.

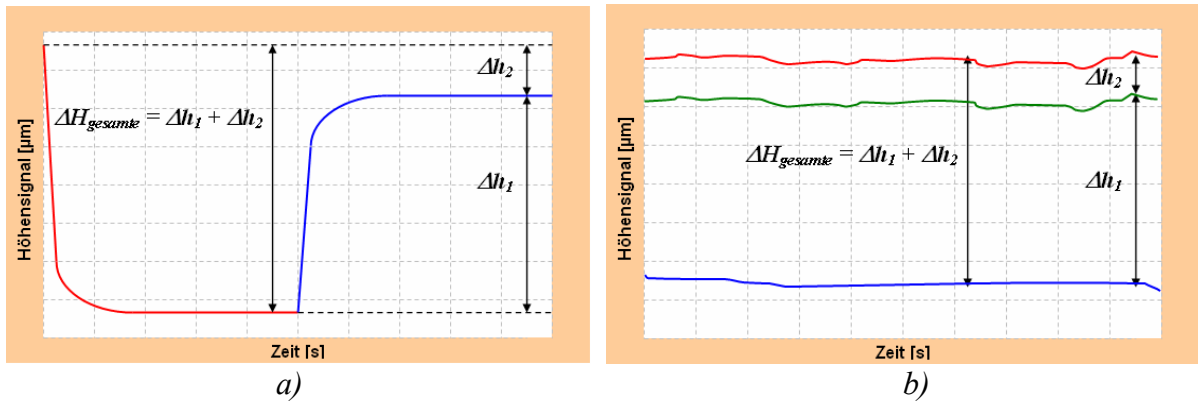


Abb. 3.7: Auswertung der a) Kompressibilität (statische Deformation) und der b) dynamischen Deformation am UST®

Messungen der Kompressibilität wurden an Kunststoffolie durchgeführt mit der Absicht, deren Deformationsgrenze zu ermitteln. Abb. 3.8 zeigt das Deformationsverhalten zweier Kunststofffolien mit jeweils 0,50 mm und 1,0 mm Dicke gemessen am UST®. Daran ist zu erkennen, dass die Eindringtiefe für Werte geringer als 200 mN von der Dicke der zu messenden Probe unabhängig ist. Zusätzlich fällt auf, dass die 0,50 mm Folie ein etwas höheres Verformungsvermögen als die 1,0 mm dicke Folie nachweist. Beide Phänomene sind mit dem Überschreiten der Deformationsgrenze und der Relaxationsverschiebungen beim Zurückverformen verbunden. Erst ab 200 mN und stärker machen sich bei der dickeren Folie diese Effekte bemerkbar.

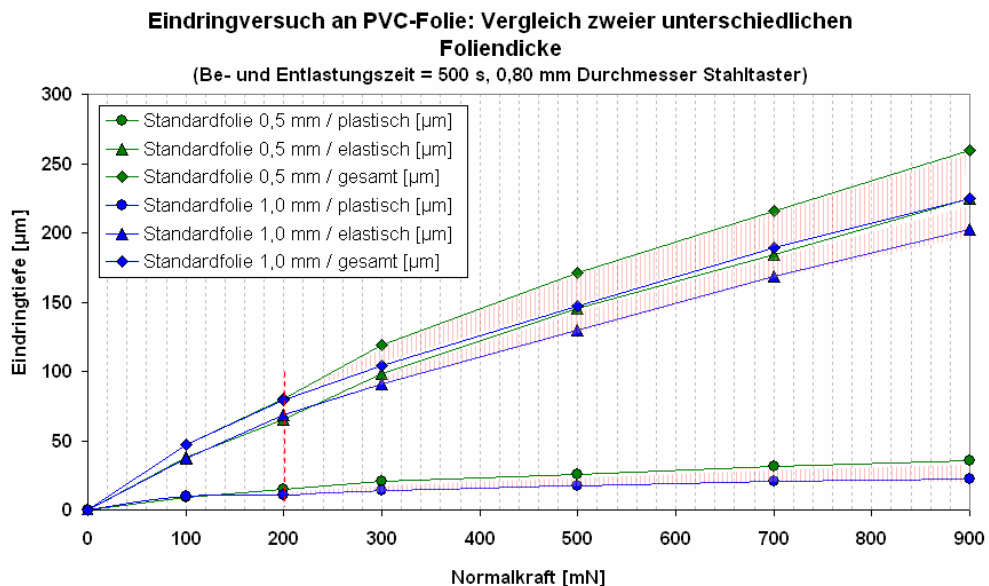


Abb. 3.8: Abhängigkeit der Eindringtiefe mit der Normalkraft ermittelt am UST® für zwei Kunststofffolien

3.1.5 OBERFLÄCHENSPIANNUNG

Ober- und Grenzflächenphänomene spielen bei vielen technischen Prozessen eine bedeutende Rolle, z.B. beim Verkleben, Bedrucken, Reibung- und Verschleißverhalten. Oberflächenspannungen bestimmen die adhäsive Haftung, die Benetzung und den Ausbreitungsdruck (Spreitungsdruck) zwischen zwei Grenzschichten [Ehr 2003].

Die Ursachen der Phänomene an der Phasengrenze sind in den energetischen Zuständen zu finden, die aus der plötzlichen Strukturänderung an der Phasengrenze zwischen zwei Medien resultieren. Diese energetischen Wechselwirkungen und die Struktur der Phasengrenzschichten bedingen sich gegenseitig. Die Ursachen für die Oberflächenspannung sind auf Wechselwirkungen zwischen benachbarten Molekülen zurückzuführen. Im Inneren einer Flüssigkeit ist die resultierende Kraft eines Moleküls Null und dieses befindet sich im Gleichgewicht. Befände sich dies Molekül an der Flüssigkeitsoberfläche, würde ein Teil der Wechselwirkungen die benachbarten Moleküle betreffen. Es findet eine Wechselwirkung mit den Molekülen des darüberliegenden Gases bzw. Dampfes statt. Als resultierende Kraft wirkt auf das Molekül an der Oberfläche eine nach Innen, senkrecht zur Oberfläche gerichtete Kraft [Ehr 2003] [Skr 2005].

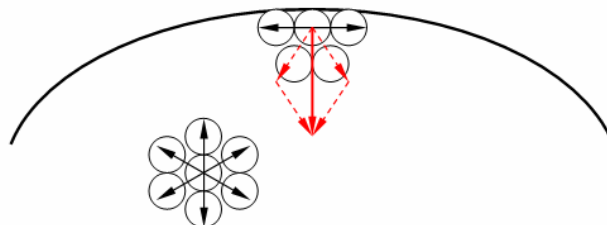


Abb. 3.9: Entstehung der Oberflächenspannung eines Flüssigkeitstropfens [Erh 1980]

Die Benetzbarkeit fester Körper durch Flüssigkeiten wird durch die Grenzflächenspannungen der beteiligten Komponenten gegeneinander gesteuert. Die Young-Gleichung definiert diese Beziehung anhand der Dreiphasenkontaktklinie eines Tropfens auf einem Festkörper [Ehr 2003] [Skr 2005] [Pri 2005].

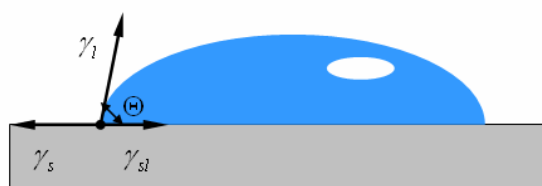


Abb. 3.10: Kräfteverteilung am Dreiphasenkontakt eines Flüssigkeitstropfens

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cdot \cos \Theta \quad \text{Formel 3.8}$$

In dieser Gleichung stellt γ_s die Oberflächenspannung der festen und γ_l der flüssigen Phase sowie γ_{sl} die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoff dar. Nach der Methode von Owens und Wendt wird die Oberflächenspannung in polare und dispersive Anteile aufgespalten:

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad \text{Formel 3.9}$$

mit

γ^d : dispersiver Anteil der Oberflächenspannung [mN/m]

γ^p : polarer Anteil der Oberflächenspannung [mN/m]

Owens und Wendt stellten für die Adhäsionsenergie pro Flächeneinheit (W_a) [Gle 2004]

$$W_a = \gamma_l + \gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_l(1 + \cos \Theta) \quad \text{Formel 3.10}$$

die Gleichung des geometrischen Mittels auf:

$$\gamma_l(1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_l^d \gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_l^p \gamma_s^p} \right) \quad \text{Formel 3.11}$$

mit

γ_l^d : dispersiver Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] der Flüssigkeit

γ_s^d : dispersiver Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] des Festkörpers

γ_l^p : polarer Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] der Flüssigkeit

γ_s^p : polarer Anteil der Oberflächenspannung [mN/m] des Festkörpers

Dabei sind sowohl die gesamte Oberflächenspannung des Festkörpers als auch der polaren und dispersiven Anteile zu bestimmen.

Die Oberflächenspannung von Festkörpern kann nicht direkt bestimmt werden. Dies geschieht indirekt über eine Randwinkelmessung mit einer Flüssigkeit, deren Oberflächenspannung bekannt ist und die höher als die Oberflächenspannung des Substrats

sein muss. Ist die Oberflächenspannung der Messflüssigkeit gleich oder kleiner als die Oberflächenspannung des Substrats, findet eine vollständige Spreitung (Randwinkel = 0°) statt. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass sich ein klar erkennbarer Randwinkel bildet. Grundsätzlich gilt, dass Oberflächenspannungen von Festkörpern bei Ausgabe in mN/m höchstens auf die Stelle vor dem Komma einigermaßen sicher gemessen werden können [Ehr 2003].

Die Oberflächenspannungen geläufiger Messflüssigkeiten sind in der Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Flüssigkeit	γ_i^d [mN/m]	γ_i^p [mN/m]	γ_i [mN/m]
Wasser	19,9	52,2	72,1
Glycerin	21,2	41,5	62,7
Ethylenglykol	29,0	19,0	48,0
Ethanol	17,5	4,6	22,1
Diiodmethan	47,4	2,6	50,0

Tabelle 3.1: dispersive (γ_i^d), polare (γ_i^p) und gesamte (γ_i) Oberflächenspannungen von Messflüssigkeiten nach Wu

Anhand der Methode des liegenden Tropfens (Sessile Drop Method), ein statisches Verfahren, wird ein Tropfen Flüssigkeit mit bekannter Oberflächenspannung auf einen zu charakterisierenden Festkörper mit Hilfe einer Kanüle aufgebracht. Die Randwinkel werden dann gemessen.

Sind für die angewendeten Flüssigkeiten die Werte γ_i^d , γ_i^p und γ_i bekannt und sind die Kontaktwinkel zur Festkörperoberfläche gemessen worden, so kann die Oberflächenspannung des Festkörpers mit Hilfe der Young'schen Gleichung (Formel 3.8) nach dem Verfahren von Owens-Wendt berechnet werden [Skr 2005].

Diese theoretische Betrachtungsweise ist nur begrenzt anwendbar. Zu den Kräften, die zur Adhäsion beitragen, gehören die Nebervalenzbindungen wie z. B. van-der-Waals-Kräfte, Dipolkräfte und Wasserstoffbrücken. Anders als bei Kohäsionskräften, wobei die Anziehungskräfte zwischen gleichartigen Atomen bzw. Molekülen wirken, werden die Adhäsionskräfte zwischen verschiedenen Stoffen wirksam. Ionische, kovalente und metallische Bindungen sind für das Adhäsionsverhalten organischer Polymere ohne Bedeutung [Pri 2005].

Offensichtlich nehmen

- die Rauigkeit von Oberflächen,
- die energetische Heterogenität,
- die Zusammensetzung der Dampfphase,
- Adsorption in der Grenzschicht,
- Oberflächenladungen sowie
- das Eindringen der Flüssigkeit und
- die Verunreinigungen auf der Festkörperoberfläche

Einfluss auf die Messung der Oberflächenspannung eines Festkörpers. Bei der Messung des Randwinkels ist weiterhin darauf zu achten, dass sich die Kanüle immer in der Mitte des Tropfens befindet, da bei ungleichmäßiger Ausbreitung die Messung nicht repräsentativ ist. Beim Auftritt vom Stick-Slip-Effekt, wenn der Tropfen sich nicht kontinuierlich ausbreitet, ist die Flüssigkeit für diesen Werkstoff ungeeignet.

Unter diesen Voraussetzungen wurde das Randwinkelmessgerät der Firma ©Krüss GmbH angewendet, um die oberflächlichen Wechselwirkungen der Automobilleder zu untersuchen. Wasser und Diiodmethan kamen als Messflüssigkeiten zum Einsatz. Die Auswertung der polaren und dispersiven Energieanteile wurde nach der Methode von Owens-Wendt vorgenommen.

3.1.6 BREITENBEZOGENE BIEGESTEIFIGKEIT

Die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe resultieren allgemein aus der Summe von Deformations-, Festigkeits- und Reibungseigenschaften. Dabei ist die Stoffeigenschaft Biegesteifigkeit im Wesentlichen an die Deformationseigenschaften gebunden. Das liegt daran, dass die zur Biegung relevanten Vorgänge sich auf der formverändernden Wirkung einer ausgeübten Kraft auf den zu prüfenden Körper bezieht. Die Biegesteifigkeit wird daher als Maß für die Flexibilität bzw. Weichheit eines bahnenartigen Erzeugnisses betrachtet [Kel 1984].

Die Prüfung der Biegesteifigkeit wurde im Laufe der praktischen Arbeiten an zwei unterschiedlichen Prüfständen durchgeführt. Die Messungen der Automobilleder während der ersten Etappe der Untersuchungen fanden am Softometer KWS Basic der Firma Wolf-

Messtechnik GmbH statt. Während der zweiten Etappe wurden die PVC-Erzeugnisse mit dem Biegesteifigkeitsprüfer der Firma Frank Prüfgeräte GmbH gemessen.

Die so genannte breitenbezogene (S) Biegesteifigkeit drückt den Widerstand, den eine Probe einer Biegekraft entgensetzt, aus. Sie ist im elastischen Verformungsbereich das Produkt aus dem für die Biegung gültigen Elastizitätsmodul E_0 und dem Flächenträgheitsmoment I der Probe.

$$S = \frac{E_0 \cdot I}{b} \quad \text{Formel 3.12}$$

mit

S : breitenbezogene Biegesteifigkeit [N mm]

E_0 : Elastizitätsmodul [MPa]

I : Flächenträgheitsmoment [mm⁴]

b : Probenbreite [mm]

Da die breitenbezogene Biegesteifigkeit von der Breite der Probe abhängt, wird sie in Anlehnung an DIN 53121 als Kennwert auf die Probekbreite b bezogen. Die Proben werden folgendermaßen gemessen. In der Längsrichtung einer 60 mm x 70 mm (Automobilleder) bzw. 30 mm x 70 mm (PVC-Varianten) ausgestanzten Probe wird eine Biegelänge von 15 mm eingestellt. Die Probe wird eingespannt und von der Vorder- auf die Rückseite um 35° in Bezug auf die waagerechte Lage hingebogen. Das Prinzip entspricht dem eines freien Balkens. Die Proben werden jeweils in Längs- und Querrichtung gemessen und die ermittelten Widerstands- bzw. Biegekräfte F_B mit Hilfe der Formel 3.13 in die breitenbezogene Biegesteifigkeit umgerechnet.

$$S = \frac{60 \cdot F_B \cdot l^2}{\pi \cdot \theta \cdot b} \quad \text{Formel 3.13}$$

mit

S : breitenbezogene Biegesteifigkeit [N mm]

F_B : Biegekraft [N]

l : Biegelänge [mm]

θ : Biegewinkel [°]

Der dabei ermittelte Widerstand zur Biegung ist offensichtlich eine effektive Methode, um die Wirksamkeit der Struktur und des inneren Aufbaus der Prüflinge zu vergleichen. Die Beziehung der Flexibilität der Automobilleder und der PVC-Folien zum Stick-Slip-Verhalten ist dabei von besonderem Interesse.

3.1.7 IR-SPEKTROSKOPIE

Wirken elektromagnetische Wellen im Infrarot-Bereich mit der Materie zusammen, können diese absorbiert werden und dabei, aufgrund der Energieübertragung, Schwingungen der chemischen Bindungen verursachen. Die Bindungen können sich dabei dehnen und zusammenziehen oder biegen. Eine bestimmte funktionelle Gruppe neigt zur Aufnahme der Infrarotstrahlungen mit der gleichen Wellenzahl ($\tilde{\nu}$) ohne Bezug auf die Struktur des Restes des Moleküls. Beispielsweise, die Verbindung C=O einer Carbonylgruppe findet bei $\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ in vielen unterschiedlichen Molekültypen statt. Das bedeutet, es gibt eine Korrelation zwischen der Wellenzahl, bei der ein Molekül die Infrarotstrahlungen absorbiert, und dessen Struktur. Diese Korrelation erlaubt die Bestimmung der Struktur eines unbekanntes Moleküls bezogen auf dessen Infrarotspektrum, genauso wie den Vergleich mehrere Spektren, um festzustellen, ob es sich um die gleichen Substanzen handelt [Göp 1994] [Reh 2002] [Sch 2000]. Dieser Art Korrelationen machen aus der Infrarotspektroskopie ein hilfreiches Werkzeug bei der chemischen Analyse organischer Materialien.

Das sogenannte Infrarotspektrum stellt die Intensität der gemessenen Infrarotstrahlungen gegen die Wellenzahl dar. Aufgrund der Tatsache, dass die Mehrheit der Moleküle Infrarotbanden im Bereich zwischen 4000 cm^{-1} und 400 cm^{-1} haben, sind die Infrarotspektren am häufigsten mit dieser Eingrenzung der x-Achse zu finden. Die y-Achse kann sowohl als Transmittanz,

$$T(\tilde{\nu}) = \frac{I(\tilde{\nu})}{I_0(\tilde{\nu})} \quad \text{Formel 3.14}$$

mit Einheit in Prozent, als auch als Absorbanz,

$$A(\tilde{\nu}) = \log\left(\frac{I_0(\tilde{\nu})}{I(\tilde{\nu})}\right) = \log\left(\frac{1}{T(\tilde{\nu})}\right) \quad \text{Formel 3.15}$$

ohne Einheit, angegeben werden [Reh 2002] [Sch 2000] [Göp 1994]. Wobei die

$T(\tilde{\nu})$: Transmittanz []

$A(\tilde{\nu})$: Absorbanz []

$I_0(\tilde{\nu})$: Eingangsintensität des Lichtstrahls []

$I(\tilde{\nu})$: Ausgangsintensität des Lichtstrahls im Detektor []

$\tilde{\nu}$: Wellenzahl [cm^{-1}]

darstellen.

Die ATR-Spektroskopie (Abgeschwächte TotalReflexion) ist ein analytisches Verfahren aus den 60er Jahren. Kernstück dieser Methode ist ein Lichtwellenleiter, in dem Strahlung in Totalreflexion geführt wird. Dieser Lichtwellenleiter ist für gewöhnlich ein Prisma, eine Faser ohne Mantel oder ein spezieller ATR-Kristall, in dem Mehrfachreflexionen möglich sind. Bei Totalreflexion bilden sich hinter der reflektierenden Grenzfläche evaneszente Wellen aus. Diese haben etwa die Reichweite einer Wellenlänge. Wird nun eine Probe nahe an die Oberfläche des Lichtwellenleiters gebracht, kann diese mit der evaneszente Welle wechselwirken [Per 2005].

Das im FILK vorhandene System 2000 mit IR-Mikroskop des Herstellers Perkin Elmer Instruments GmbH arbeitet im Messbereich 7800 cm^{-1} bis 370 cm^{-1} nach der abgeschwächten Totalreflexion (ATR), mit horizontalen und vertikalen ATR-Einheiten. Die Methode wurde bei der Bestimmung der oberflächlichen chemischen Zusammensetzung der Automobilleder und der lackierten PVC-Folie angewendet.

3.1.8 RASTERELEKTRONENMIKROSKOP

Im Grunde genommen ähnelt sich das Funktionsprinzip der Elektronenmikroskopie dem der Lichtmikroskopie. Anstelle von Lichtwellen werden Elektronenwellen, anstelle von optischen werden allerdings magnetische Linsen zur Abbildung verwendet. Man kann die Elektronenmikroskopie sowohl in Reflexion als auch in Transmission durchführen. In Reflexion wird der Abbildungsstrahl normalerweise gerastert.

Im Rasterelektronenmikroskop (REM) wird ein feiner Elektronenstrahl, mit Durchmesser typischerweise um 10 nm, rasterförmig Zeile für Zeile über das zu untersuchende Objekt bewegt. Synchron dazu läuft der Schreibstrahl einer Bildröhre. Die einfallenden Elektronen,

Primärelektronen, regen das Objekt zur Abgabe von Sekundärelektronen an. Diese gelangen zusammen mit den zurück gestreuten Elektronen des Primärstrahls in den Detektor (siehe Abb. 3.11). Die Vergrößerung ist durch das Verhältnis von Rastergröße auf dem Objekt zu Bildschirmgröße gegeben und lässt sich in weiten Grenzen variieren (sinnvoll ist zwischen 10^1 und 10^5) [Göp 1994].

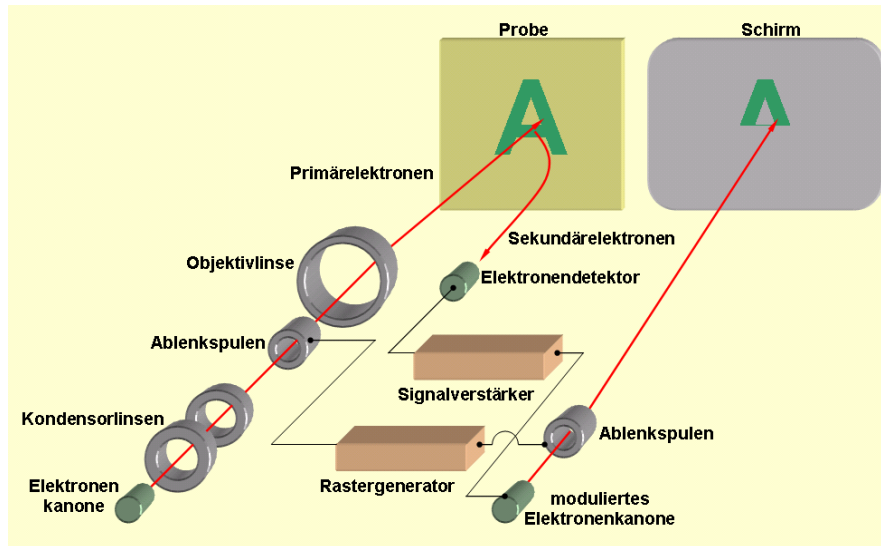


Abb. 3.11: Illustration des Funktionsprinzips eines Rasterelektronenmikroskops

Allgemeine Nachteile der Elektronenmikroskopie sind

- das benötigte Vakuum für die erforderliche große mittlere freie Weglänge der Elektronen, die nicht an den Luftmolekülen gestreut werden dürfen,
- sowie z. T. erforderlichen Leitfähigkeit von Proben, damit keine inhomogenen Aufladungsfelder beim Beschuss mit Elektronen entstehen, die den Elektronenstrahl unkontrolliert umlenken.

Das Rasterelektronenmikroskop XL 30 ESEM von Philips Elektron Optics wurde angewendet um die Struktur der zu untersuchenden Proben abzubilden. An den Automobilledern wurde hauptsächlich die Struktur und Kontaktstellen an der obersten Schicht, die sog. Zurichtung, von kontaktierenden Probenpaarungen beobachtet. An den PVC-Folien wurde mehr Wert auf die innere Struktur der einzelnen Varianten gelegt. Hauptsächlich die Struktur der geschäumten Varianten und die Haftung des PVC mit den Kohlenstofffasern und dem Textil wurden beobachtet.

4 KAPITEL

4.1 PHASE I: UNTERSUCHUNG AN AUTOMOBILLEDERN

In diesem Abschnitt werden die an Leder durchgeführten Untersuchungen beschrieben.

4.1.1 BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN MATERIALIEN, VERARBEITUNGS-METHODEN UND ERHALTENEN ERGEBNISSE

Die anfänglichen Untersuchungen des Stick-Slip-Verhaltens an Bezugsmaterialien angewendet im Fahrzeuginnenraum wurden an Naturleder durchgeführt. Zwei wichtige Zulieferer der Automobilindustrie stellten einige Lederproben zur Verfügung. Von jedem Hersteller wurden 5 Proben im Hinblick auf deren Stick-Slip-Neigung ausgewählt. An diesen Proben wurden die Reibeigenschaften und deren Zusammenhang mit dem Deformationsverhalten untersucht. In der Tabelle 4.1 sind die zur Verfügung gestellten Angaben über die wichtigsten bekannten Merkmale der Proben aufgelistet.

Proben- bezeichnung	Grundmaterial	Oberflächenprofil	Oberflächenbehandlung	Farbe
<i>Automobilleder des Zulieferers A: stick-slip-freies Leder</i>				
A1	Crust charge Nr. 2	Dakota (grobnarbig)		beige
A2		Dakota (grobnarbig)	3x Appretur (je 22 g/m ²)	beige
A3		Dakota (grobnarbig)	2x Appretur (je 22 g/m ²)	schwarz
A4	Crust charge Nr. 1	Walknappa (feinnarbig)		schwarz
A5		Nasca (grobnarbig)		beige
<i>Automobilleder des Zulieferers B: stick-slip-behaftetes Leder</i>				
B1			Lackvariante 1, 2x gespritzt	schwarz
B2			Lackvariante 1, 3x gespritzt	schwarz
B3			Lackvariante 3, 2x gespritzt	schwarz
B4			Lackvariante 3, 3x gespritzt	schwarz
B5	chromfreies Leder (Lenkradleder)	Glatt		schwarz

Tabelle 4.1: Beschreibung der untersuchten Automobilleder

4.1.2 STICK-SLIP-NEIGUNG

Basierend auf der Stick-Slip-Neigung wurden die Lederproben in zwei Gruppen eingeteilt: stick-slip-freies (Lederhersteller A) und stick-slip-behaftetes (Lederhersteller B) Leder. Aus der Tabelle 4.2 können die am Stick-Slip-Prüfstand ermittelten RPZ-Werte beider Ledergruppe entnommen werden. Bei den Lederproben der Gruppe A ist allgemein eine geringere Stick-Slip-Neigung zu verzeichnen, während bei den Proben der Gruppe B der

Stick-Slip-Effekt sich eindeutig bemerkbar machte. Durch die Charakterisierung weiterer strukturellen und oberflächlichen Eigenschaften dieser Proben wird erhofft, deren Stick-Slip-Neigung erklären zu können.

Geometrie des Probenträgers	Normalkraft [N]	Schlittengeschw. [mm/s]	Gruppe A (RPZ)					Gruppe B (RPZ)				
			A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
rund	10	1,0	2	2	3	3	3	8	8	8	8	8
		4,0	2	2	3	3	3	7	7	7	7	7
	40	1,0	3	3	3	3	4	8	8	8	8	8
		4,0	2	3	3	3	3	8	8	7	8	8
			3	3	3	3	3	8	8	7	8	8
			3	3	3	3	3	8	8	7	8	8

Tabelle 4.2: Stick-Slip-Verhalten von Lederproben der Gruppe A und B gemessen nach VDA 230-206 Teil 1

Die Haft- (μ_S) und Gleitreibungskoeffizienten (μ_D) der Lederproben und ebenso deren Differenzen ($\mu_S - \mu_D$) wurden ermittelt und sind in der Abb. 4.1 zu betrachten. Die Gleitreibungskoeffizienten beider Ledergruppen liegen in einem vergleichbaren Messbereich, zwischen 0,22 und 0,30. Die Lederproben der Gruppe B zeigen jedoch höhere Haftreibungskoeffizienten und daher eine höhere Differenz zwischen beiden Koeffizienten ($\mu_S - \mu_D$). Diese Differenz wird als ein Maß für die Beurteilung der Stick-Slip-Neigung einer Materialpaarung angenommen. Je höher sie ist, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass der Stick-Slip-Effekt auftritt [Gao 1993] [Czi 1992] [Lib 2005].

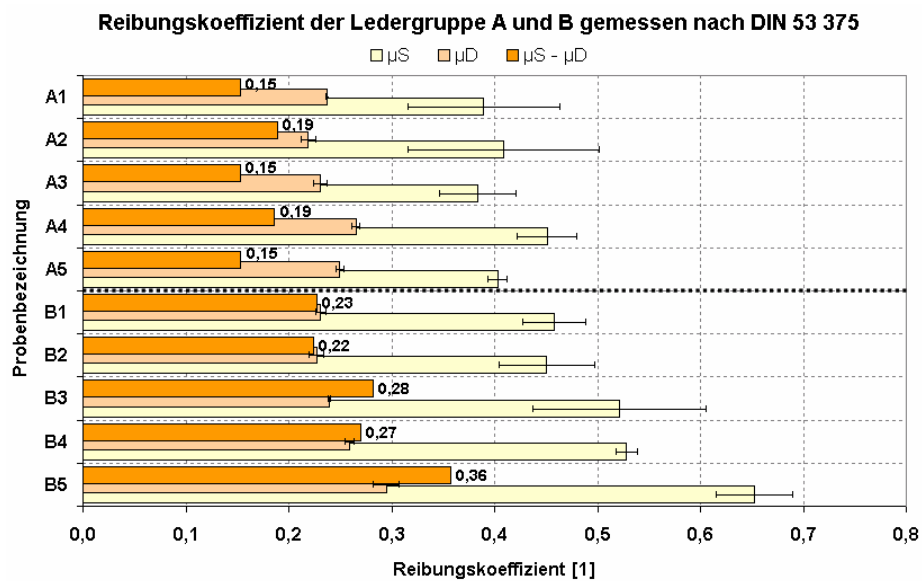


Abb. 4.1: Reibungskoeffizienten der Lederproben der Gruppen A und B

Strangfeld [Str 2006] zeigte, dass die am Stick-Slip-Prüfstand und am Friction Tester ermittelten Reibwerte der Stick-Slip-Neigung nicht vergleichbar sind. Die oben gezeigten Ergebnisse untermauern jedenfalls die Berteilung dieser Differenz als ein Maß für die Stick-Slip-Neigung. Die Tendenz der Messungen am Friction Tester bestätigen die bereits gemachte Klassifizierung der Lederproben in die Gruppe A und B anhand der RPZ.

Bei Festkörperkontakten treten die Kontaktkräfte hauptsächlich durch Deformation, Adhäsion und Verzahnungen auf. Die gebildeten Adhäsivkontakte werden bei Relativbewegung wieder getrennt und an anderen Stellen überlagert. Der Gleitvorgang kann daher als eine schnelle Folge von adhäsivem Haften, Verspannen, Trennen und Zurückstellen von untereinander gekoppelten Molekülbereichen verstanden werden. Der damit verbundenen Energieverlust, lässt sich durch die Oberflächenspannung der beteiligten Werkstoffe beschreiben [Erh 1980] [Güb 1989]. Das Reibungsverhalten zweier kontaktierenden Oberflächen wird hauptsächlich von diesen Einflussgrößen bestimmt. Daher konzentrierten sich sämtliche angewendeten Charakterisierungsmethoden auf dessen Beziehung zum Stick-Slip-Verhalten. Die Untersuchungen richteten sich darauf, inwieweit sich die Einteilung in die stick-slip-freie und die stick-slip-behaftete Ledergruppe auf die Eigenschaften der Automobilleder zurückführen ließe.

Die Automobilleder wurden weiterhin durch die folgenden Methoden charakterisiert:

- Scherdeformation (Rheometer anhand des Platte-Platte-Messsystems),
- Kompressibilität bzw. statische Deformation (UST[®]),
- dynamische Deformation (UST[®]),
- Biegesteifigkeit (am Softometer)
- Oberflächenspannung (nach Owens-Wendt) und
- Rauheit (arithmetischer Mittenrauwert)
- innere Struktur (REM)

4.1.3 ERGEBNISSE DER SCHERDEFORMATION AM RHEOMETER

Die am Rheometer ermittelten Scherdeformationen beider Ledergruppen werden in der Abb. 4.2 gezeigt. Daran ist zu erkennen, dass die Unterscheidung der Lederproben in die Gruppen A und B, bzw. stick-slip-frei und stick-slip-behaftet, sich in den Ergebnissen widerspiegelt. Das ist ein klarer Hinweis dafür, dass eine direkte Wechselwirkung zwischen

dem Reibungsverhalten, in dem Fall dem Stick-Slip-Effekt, und dem Deformationsvermögen der untersuchten Leder besteht.

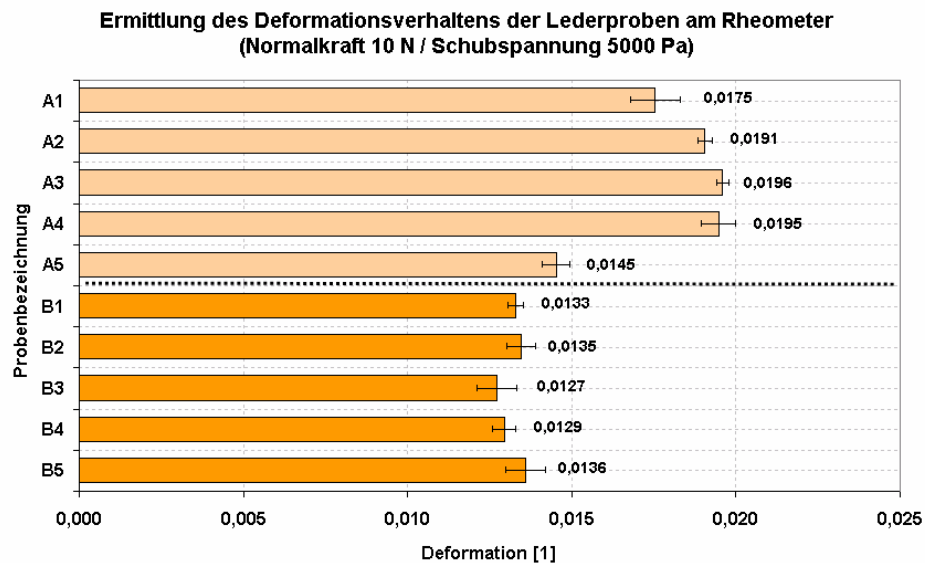


Abb. 4.2: Scherdeformation der Lederproben der Gruppen A und B

4.1.4 BEURTEILUNG DER OBERFLÄCHENSPIGUNG UND DER RAUHEIT

Die Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 und fassen die erhaltenen Ergebnisse, die das allgemeine oberflächliche Adhäsionsvermögen der Automobileder beschreiben, zusammen. Zusätzlich werden andere relevante herstellungsbedingte Angaben zur Oberflächenveredlung der Leder erwähnt, welche einen Einfluss auf die untersuchten Merkmale haben können.

Probenbezeichnung	Top coat	Oberflächenspannung		Rauheit (R _a) [µm]
		dispersiver Anteil [mN/m]	polarer Anteil [mN/m]	
A1	Crust charge Nr. 2	14,89	1,44	49,4
A2	3x Appretur (je 22 g/m ²)	10,71	2,46	47,5
A3	2x Appretur (je 22 g/m ²)	9,17	8,18	45,9
A4	Crust charge Nr. 1	11,57	1,30	8,8
A5		11,78	1,88	35,7

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Oberflächencharakterisierung der Ledergruppe A

Proben bezeichnung	Top coat	Oberflächenspannung		Rauheit (R_a) [μm]
		dispersiver Anteil [mN/m]	polarer Anteil [mN/m]	
B1	Lackhersteller 5, Variante 1, 2x gespritzt	10,41	0,85	6,8
B2	Lackhersteller 5, Variante 1, 3x gespritzt	13,06	2,01	9,8
B3	Lackhersteller 5, Variante 3, 2x gespritzt	11,39	1,04	6,9
B4	Lackhersteller 5, Variante 3, 3x gespritzt	10,30	5,02	7,3
B5	FOC Lenkradleder (chromfrei)	11,11	5,02	4,9

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Oberflächencharakterisierung der Ledergruppe B

Die ermittelten Messwerte zeigen allgemein geringe Oberflächenspannungen bei allen Proben mit geringer und stark schwankender Polarität. Diese Aspekte der Oberflächeneigenschaften von Naturleder werden normalerweise während der Veredelung des Produkts je nach beabsichtigter Applikation gezielt eingearbeitet. Unzählige Sorten von sogenannten Finishing-Produkten wie z.B. Lacke, Pigmente, Pflege- und Gleitmittel, Tenside etc. werden in der Lederindustrie angewendet. Neben der chemischen Behandlung findet normalerweise auch die mechanische Veredlung der Oberflächen statt. Die Werte für R_a zeigen zwei Größenordnungen der Rauheit der gesamten Proben: ein Teil der Ledergruppe A mit einem relativ rauen und die restlichen Proben mit einem feineren Oberflächenprofil. Eine Verbindung der Oberflächeneigenschaften mit dem Reibungsverhalten der Ledergruppen A und B ist durch die ermittelten Messwerte nicht möglich. Beide Gruppen können durch die Rauheitsmerkmale nicht unterschieden werden.

Zu einer vollständigeren Charakterisierung der Oberflächenmerkmale kam anschließend die FTIR-Spektroskopie mit abgeschwächter Totalreflexion in Frage. Die Abb. 4.3 und Abb. 4.4 zeigen die dadurch ermittelten Spektren sämtlicher Lederproben. Daran ist zu erkennen, dass die oberflächliche Zusammensetzung für alle untersuchten Proben weitgehend vergleichbar ist.

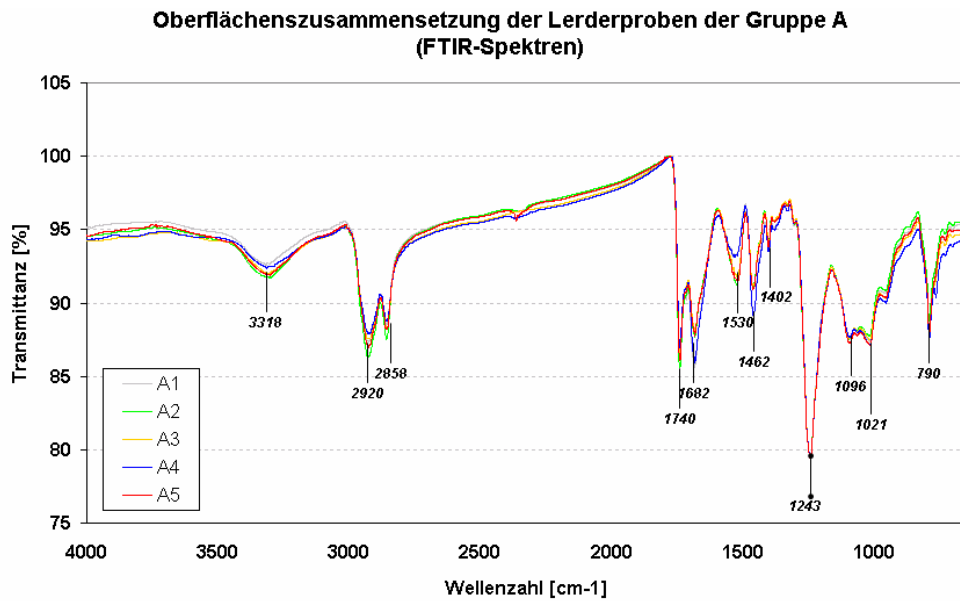


Abb. 4.3: FTIR-Spektren der Automobilleder der Gruppe A

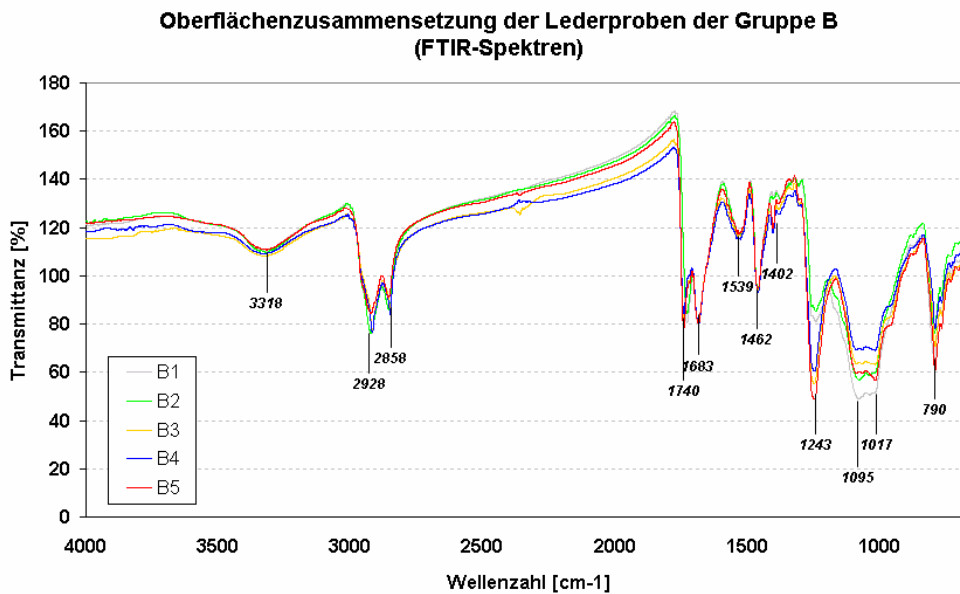


Abb. 4.4: FTIR-Spektren der Automobilleder der Gruppe B

Entsprechend den Werten der Tabelle 4.5, zeigen die FTIR-Spektren typische Banden, die die Anwesenheit silikonartiger Verbindungen nachweisen. Durch die Vergleichsanalyse der Rückstände der Leder auf dem ATR-Kristall wurde bewiesen, dass die Lederproben höchstwahrscheinlich mit einem sogenannten Gleitlack auf Silikonbasis vorbehandelt wurden. Diese Art Substanzen zeigen sich als Öle und daher wasserabweisend, was den geringen polaren Anteil der Oberflächenspannung in der Tabelle 4.2 und der Tabelle 4.3 erklärt.

Wellenzahl [cm ⁻¹]	funktionelle Gruppe
1261	Si-CH ₃
1096,1021	Si-O-Si
800	Si-CH ₃

Tabelle 4.5: Typische Infrarot-Banden von Polydimethylsiloxane [Smi 1999], nachgewiesen an alle Proben beider Gruppen

Im Hinblick auf die oben gezeigten Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass die hier erfassten Oberflächeneigenschaften nicht ausreichend sind, um den Stick-Slip-Effekt an den Automobilledern zu erklären. Weder die Oberflächenspannung noch die Rauheit der Automobilleder allein erlauben eine direkte Verbindung mit dessen Stick-Slip-Verhalten. Einerseits, weisen die chemische Zusammensetzung und die Oberflächenspannung auf das gleiche Adhäsionsvermögen aller Proben hin. Andererseits, beweist die Probe A4, dass zwar eine geringe Rauheit mit der Entwicklung des Stick-Slip-Effektes verbunden ist, diese kann aber nicht allein als die Ursache dafür betrachtet werden. Unter diesen Voraussetzungen ist eine sich ausschließlich auf die oberflächlichen Merkmalen basierende Korrelation zum Auftreten des Stick-Slip-Effektes wenig erfolgversprechend.

In der Literatur ist öfters die Rede von deformativen und adhäsiven Anteilen der Reibeigenschaften, einschließlich des Stick-Slip-Effekts, besonders bei weichen Materialien [Ehr 2003] [Erh 1980] [Hal 1988]. Hierbei sollen sowohl die Grenzflächeneffekte als auch die innere Struktur daran teilnehmen. Bei metallischen Materialien hingegen, die sich verhältnismäßig wenig deformieren, entscheidet sich das Auftreten von ähnlichen Phänomenen überwiegend an der Oberfläche.

Basierend auf den erhaltenen Messergebnissen und dem theoretischen Hintergrund kann für die untersuchten Ledervarianten von Automobilledern Folgendes geschlussfolgert werden:

$$\text{Stick-Slip} = f(\text{Oberflächeneigenschaften} + \text{Deformationsvermögen})$$

4.1.5 ZUSÄTZLICHE METHODE ZUR WEITEREN CHARAKTERISIERUNG DES DEFORMATIONSVERHALTENS

Die am Rheometer gewonnenen Messwerte beziehen sich auf die Beurteilung des gesamten Verformungsvermögens der Lederproben. Einzelheiten über die Verformungsvorgänge oder Verschiebung der Materialsschichten sind daraus nicht ersichtlich. Die Trennung der gesamten Verformung als eine Zusammensetzung von elastischen, plastischen bzw. zeitabhängigen Komponenten ist mit dieser Versuchsanordnung nicht möglich. Um

ergänzende Informationen diesbezüglich zu erlangen, musste auf spezifische Aspekte der Verformung mittels zielgerechter Messmethode zurückgegriffen werden.

Die Kompressibilität, die dynamische Deformation und die Biegesteifigkeit bieten sich als empfehlenswerte Messmethoden zu einer vielseitigen Analyse der Verformbarkeit der Lederproben an. Die Einflüsse von strukturellen Abweichungen des Grundmaterials, des Oberflächenprofils und der -veredlung können die integrale Betrachtung am Rheometer ergänzen. Die dadurch ermittelten Beiträge der elastischen und plastischen Anteile der Deformation genauso wie der Flexibilität werden in Zusammenhang mit der Stick-Slip-Neigung beider Ledergruppen gestellt.

4.1.6 KOMPRESSIBILITÄT (STATISCHES) UND DYNAMISCHES DEFORMATIONSVERHALTEN AM UST®

Das am UST® ermittelte Deformationsvermögen der Automobilleder sind in Abb. 4.5 und Abb. 4.6 zu sehen. Allgemein tendieren die Proben der Gruppe B zu einer geringen plastischen Deformation. Ein direkter Zusammenhang der gesamten Verformung mit der Einteilung der Leder in die Gruppen A und B ist jedenfalls nicht praktikabel. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist dadurch gewährleistet, dass beide Varianten der Untersuchungen die gleiche Tendenz eindeutig zeigen.

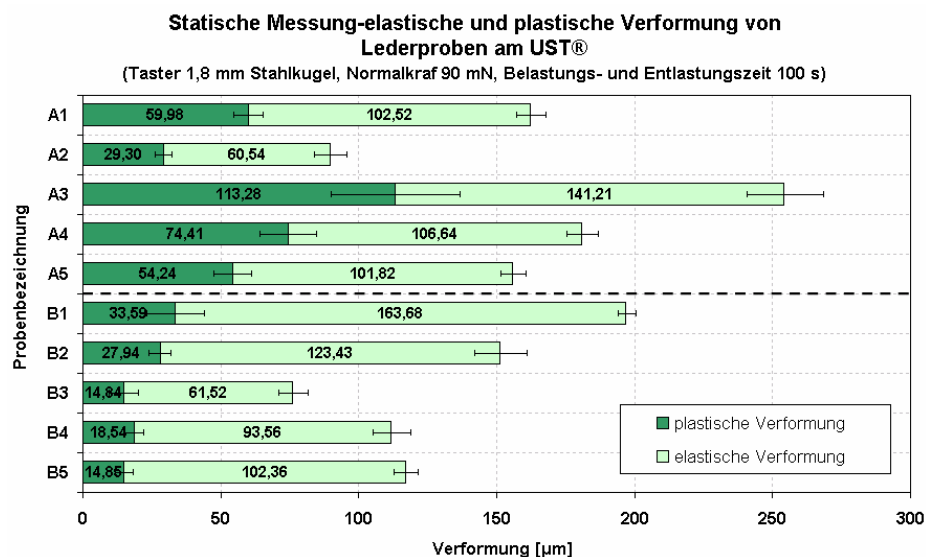


Abb. 4.5: Statische Deformation (Kompressibilität) der Ledergruppen A und B am UST®

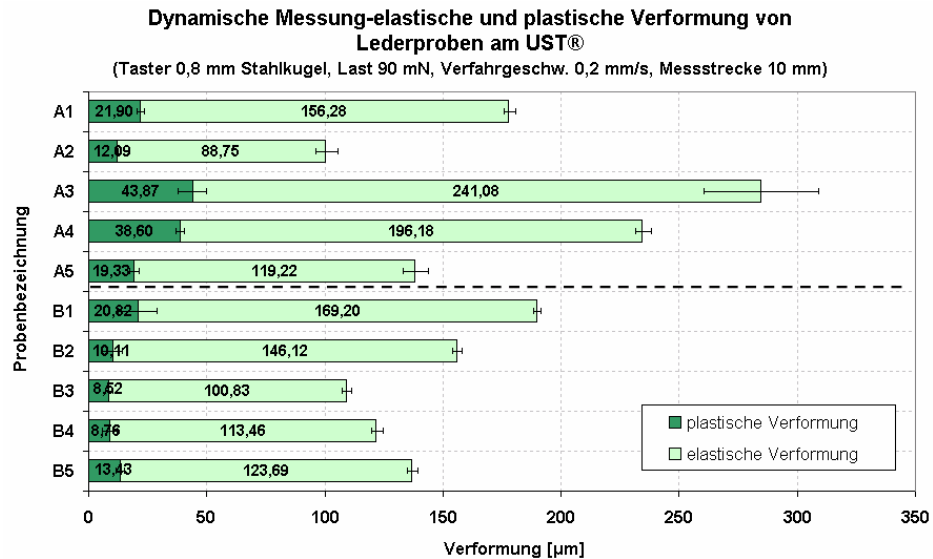


Abb. 4.6: Dynamische Deformation der Ledergruppen A und B am UST®

Obwohl die Ergebnisse von beiden Messmethoden, Rheometer und UST®, Maße für das Deformationsvermögen der Lederproben darstellen, ist eine Beziehung zwischen der erhaltenen Ergebnissen nicht zu erwarten. Hauptsächlich durch die Größe der Kontaktfläche, die Art der Belastung und der Bewegung, und die Größenordnungen der Eingangsparameter, ist die Vergleichbarkeit der Resultate nur sehr begrenzt.

4.1.7 BREITENBEZOGENEN BIEGESTEIFIGKEIT

In der Abb. 4.7 sind die Ergebnisse der breitenbezogenen Biegesteifigkeit (S) und, zwecks paralleler Analyse, des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) der Lederproben zu sehen. Daran ist es zu erkennen, dass die Lederproben der Gruppe A zu geringeren Werten der Biegesteifigkeit im Vergleich zu den Proben der Gruppe B tendieren. Eine Tendenz zur Zuordnung der Biegesteifigkeit hinsichtlich des Stick-Slip-Verhaltens wird durch die hohen Standardabweichungen nicht eindeutig wiedergegeben.

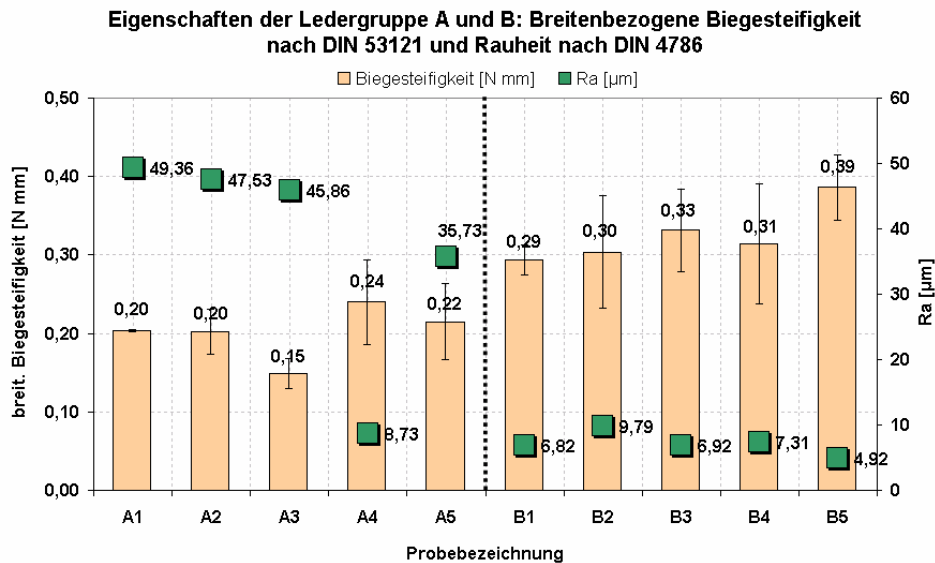


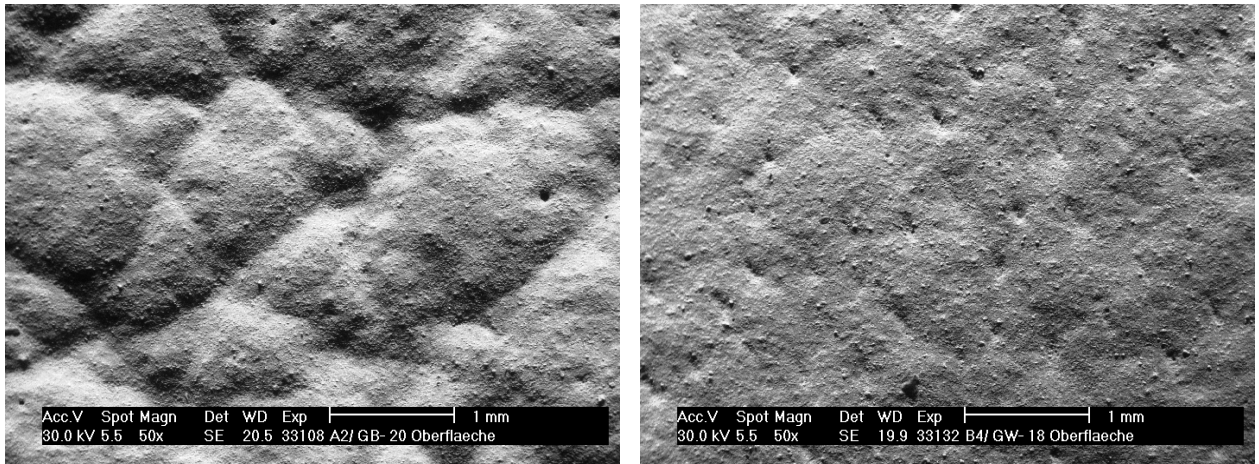
Abb. 4.7: Breitenbezogene Biegesteifigkeit und Rauheit der Automobilleder

In der Abb. 4.7 fällt zusätzlich auf, dass die geringsten Biegekräfte zu den Proben mit den höchsten Rauheitswerten gehören. Das kommt möglicherweise dadurch zustande, dass sich die oberflächlichen Unebenheiten bei den rauerer Proben als Eigenspannungspunkte verhalten. Im Gegensatz dazu verteilen sich, bei den feinnarbigen Lederproben die Biegekräfte praktisch einheitlich auf der Oberfläche, was in höherem Biegekräfte resultiert. Bei spröden Materialien, wie z. B. Keramik, führen derartige Oberflächendefekte zur Verbreitung von Rissen und demzufolge zum Versagen des Bauteils.

4.1.8 REM-AUFNAHME

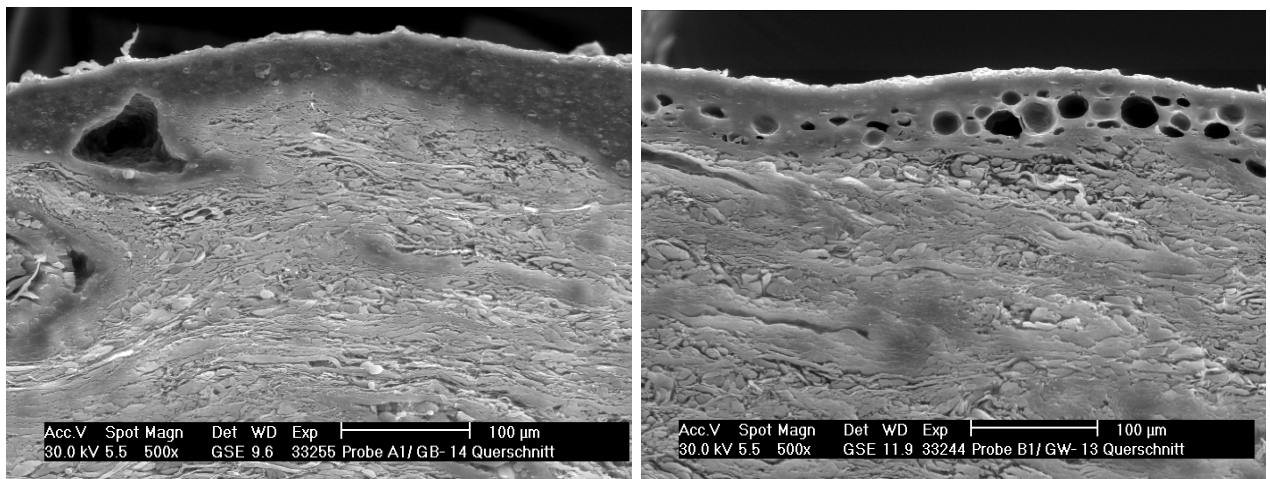
Die folgenden REM-Aufnahmen zeigen einige Proben der Automobilleder in unterschiedlichen Vergrößerungen. Darauf sind das Oberflächenprofil, die Struktur der Zurichtung und ebenso des Grundmaterials beider Gruppe zu betrachten.

In der Abb. 4.8 a) und b) werden Draufsichten einer rauerer (Abb. 4.8 a)) und einer flacheren (Abb. 4.8 b)) Lederprobe gezeigt. Sie vermitteln einen fassbaren Eindruck der in der vorherigen Abbildung gezeigten Ergebnisse bezüglich des Zusammenhangs zwischen Rauigkeit und breitenbezogener Biegesteifigkeit. Diese strukturellen Abweichungen der Oberfläche spiegeln sich unter anderem in der breitenbezogenen Biegesteifigkeit und dem oberflächlichen Haftvermögen wider, obwohl es sich hier nur um wenige µm handelt.



a) b)
 Abb. 4.8: Aufnahmen der Lederproben aus der a) Gruppe A und b) Gruppe B: Unterschiede an der Oberflächenbeschaffenheit

In der Abb. 4.9 a) und b) sind weitere Unterschiede zwischen den Lederproben der zwei Gruppen zu erkennen. Durch die mehrfache Vergrößerung ist die kompakte Zurichtung der Proben aus der Gruppe A von der porösen Zurichtung der Proben aus der Gruppe B eindeutig zu unterscheiden. Obwohl eine flexiblere Struktur erwartet wurde, wird vermutet, dass durch die poröse Zurichtung eine Art steifes peripheres Skelett entsteht. Dadurch kann die höhere Biegesteifigkeit der Lederproben der Gruppe B erklärt werden. Bedeutende Unterschiede des Grundmaterials sind anhand der Abbildungen nicht zu verzeichnen.



a) b)
 Abb. 4.9: Aufnahmen der Lederproben aus der a) Gruppe A und b) Gruppe B: Unterschiede an der inneren Gestaltung der Zurichtung

Die Abb. 4.10 zeigt einen Versuchsaufbau am Rasterelektronenmikroskop, welcher die Deformation der Zurichtung der Automobilleder nachstellen soll. In den Aufnahmen sind Probenpaarungen der jeweiligen Gruppen zu sehen. Die zwei Lederstücke werden mit Hilfe eines Schraubstockes gegeneinander gedrückt. An der Lederprobe der Gruppe A, Abb. 4.10

a), ist eine lokale Deformation der Zurichtung zu sehen. Trotz der großen Normalkraft, kommen beide Flächen nicht überall im Kontakt. Bei der Probe aus der Gruppe B, lässt sich wieder die komplette Deformation und die flach gedrückten Poren der Zurichtung verdeutlichen. Dadurch kommen die beiden Oberflächen völlig in Kontakt zueinander.

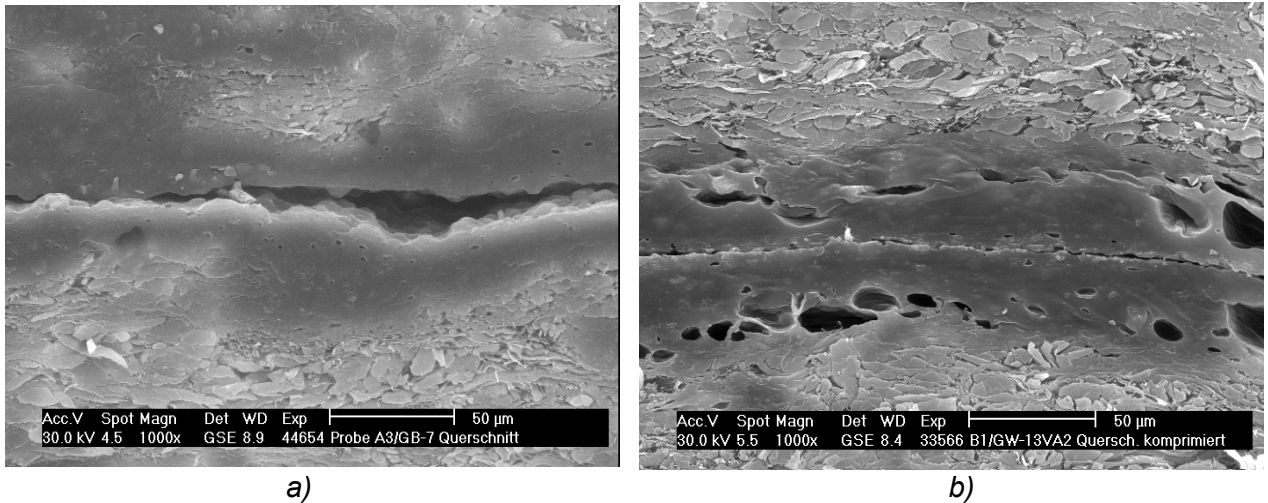


Abb. 4.10: Aufnahmen der Lederproben aus der a) Gruppe A und b) Gruppe B: Beobachtung des oberflächlichen Deformationsvermögens

Außer den oben beschriebenen deformativen Phänomenen der Oberfläche weisen die REM-Aufnahmen auf einiger adhäsiven Vorgänge zwischen den Probenpartnern auf. Die stattgefundenen Wechselwirkungen wurden in Proben der Gruppe A beobachtet und sind in der Abb. 4.11 a) und b) zu erkennen.

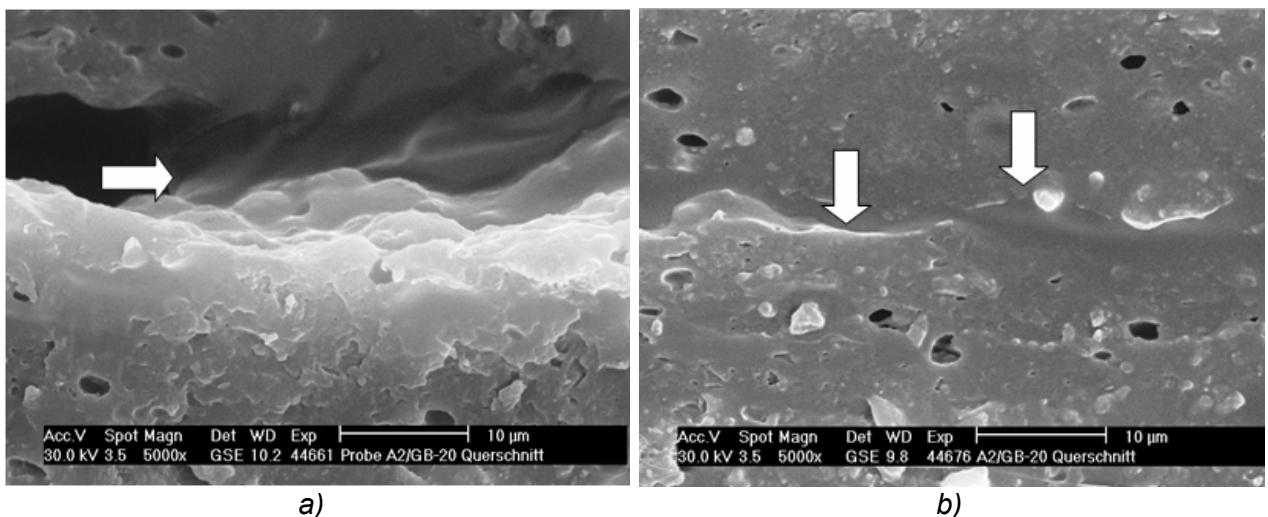


Abb. 4.11: Aufnahmen der Lederproben der Gruppe A: Beobachtung der oberflächlichen Kontaktstelle

Die Abb. 4.11 a) zeigt zwei aneinander zusammenwirkende Bereiche, eine so genannte Schweißstelle (*Pfeil Abb. a)*), beider Oberflächen. Darin ist keine Trennlinie zu erkennen, und beide Proben sehen so aus, als ob sie mit einander verschweißt wären. Eine andere Art Interaktion, nämlich die Verhakungen der Oberflächenspitzen, ein rein mechanisches Phänomen, ist in der Abb. 4.11 b) zu sehen. Die helle Trennlinie (*Pfeile Abb. b)*) beschreibt die perfekte Anpassung der Rauheitsspitzen aneinander. Die beobachteten deformativen und adhäsiven Vorgänge kamen erst durch die angewendete Normalkraft zustande. Bei einer Relativbewegung beider Partner würden sich diese Stellen ablösen und in einem anderen Bereich verlagern. Diese Übertragung kann je nach Intensität und Häufigkeit zum Stick-Slip-Effekt führen.

Die hier geschilderten Fakten betreffen Beobachtungen der obersten Schichten der Oberfläche. Da die innere Struktur des Leders praktisch identisch bei beiden Ledergruppen ist, ist die Anwendung des Rasterelektronenmikroskops in dem Fall nicht erfolgversprechend. Dabei bleiben weiterhin Fragen über die Teilnahme des Grundmaterials an den Reibungsphänomenen bei den Automobilledern offen.

4.2 PHASE II: UNTERSUCHUNGEN AN DEN HERGESTELLTEN PVC-FOLIEN

Obwohl die erhaltenen Resultate wichtige Hinweise lieferten, konnte kein schlüssiger Zusammenhang zwischen dem Deformations- und dem Stick-Slip-Verhalten der Automobilleder erstellt werden.

Zu den Automobilledern fehlten wesentliche Angaben, wie z. B. zur Art des Gerbprozesses und zu den gerb- und anwendungsbedingten Zusätzen und Behandlungen, welche die Interpretation der Ergebnisse vereinfachen würden. Die Eigenschaften eines Lederstückes sind stark von dessen Vorgeschichte abhängig. Es fängt beispielsweise damit an, aus welchem Bereich der gesamten Haut die Probe entnommen wird. Zusätzlich erschwert der natürliche und daher statistische Charakter des Leders die Erkenntnisse von Gesetzmäßigkeiten an dessen Eigenschaften. Sicherlich spielen diese Merkmale eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Reibphänomenen und sind daher von großer Bedeutung zu einer derartigen Untersuchung.

Der Versuch, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Stick-Slip-Verhalten und dem Deformationsvermögen der Automobilleder zu erstellen, erwies sich aus den oben genannten Gründen als eine schwerlösbare Aufgabe. Um weitere Erkenntnisse zur Problematik des Stick-Slip-Effektes bzw. des Störgeräusches im Fahrzeuginnenraum zu bekommen, mussten alternative Wege experimentiert werden. Eine empfehlenswerte Möglichkeit wäre mit einem synthetischen Material zu arbeiten, bei dem die gleiche Anwendung in Frage kommt und woraus gezielte Variationen und Modifikationen hergestellt werden können. Die Kenntnis dessen Zusammensetzung und Vorgeschichte ist ebenso von großer Bedeutung.

4.2.1 WAHL EINES GEEIGNETEN MATERIALS ZUR SYSTEMATISCHEN UNTERSUCHUNG DES STICK-SLIP-EFFEKTES

Polyvinylchlorid (PVC) wird wegen der gleichen Anwendung im Automobilinnenraum und der damit verbundenen wissenschaftlichen und ökonomischen Wichtigkeit des Themas für ein geeignetes Ersatzmaterial gehalten.

Die Verarbeitung von PVC in Form von Plastisolen ist für die Automobilindustrie besonders von Vorteil, da anwendungs- und untersuchungsgezielte Behandlungen und Modifizierungen vielfältige Möglichkeiten anbieten. Bahnartige Erzeugnisse aus PVC kommen für nahezu alle

Anwendungen im Fahrzeuginnenraum in Frage: an Türen, Boden, Dach, Sitze, Armaturenbrett, etc. Hierfür ist die fast uneingeschränkte Anwendung von PVC in Form von Kunstleder von Interesse. Aus diesen und den folgenden Gründen ist die Untersuchung des Stick-Slip-Phänomens an PVC-Bahnen von erheblicher Bedeutung. Die unten aufgelisteten Schwerpunkte betonen die wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Wichtigkeit des PVC.

- PVC ist der am dritthäufigsten produzierte Kunststoff in Europa mit 16,5 % der gesamten Kunststoffproduktion 2004 [Pvc 2005]. Daher ist die Verbesserung der Reibeigenschaften von PVC-Erzeugnissen allgemein von großer wirtschaftlicher Bedeutung für die Kunststoffbranche.
- Ferner, gezielt auf die Automobilindustrie, spielt die Problematik des Stick-Slip ein ebenso wichtige Rolle. 4,5 % des gesamt hergestellten PVC findet in der Branche Anwendung, und davon gehen 47,8 % in die Ausstattung des Fahrzeuginnenraums [Mic 2002] [Pvc 2003] [Pvc 2005]. Da der Stick-Slip-Effekt an PVC- und allgemein an Kunststoffbahnen bisher noch nicht gezielt erforscht wurde, versprechen jegliche Erkenntnisse zur Verbesserung diesbezüglich relevante Vorteile.
- Genauso wichtig ist eine tiefgründigere Analyse des Stick-Slip-Phänomens durch physikalische und mechanische Messmethoden und dem damit verbundenen besseren Verständnis. Der entstandene allgemeine wissenschaftliche Beitrag im Bereich der Tribologie wäre von großer Relevanz.
- Seit Jahren erweckte die Vorhersage bzw. Vorbeugung des Stick-Slip-Effektes ein erhebliches Interesse in den unterschiedlichsten Industriebranchen. Durch die gezielte Analyse der Eigenschaften und Einflüsse der Struktur eines bestimmten Materials auf dessen Reibungsverhalten konnte diese Vorstellung verwirklicht werden.
- Es gibt unzählige Möglichkeiten die PVC-Erzeugnisse zu modifizieren bzw. zu behandeln, z. B. durch Prägung, Lackierung, Verstärkung, direkte Schäumung, Hinterschäumung, Kaschierung, Füllung, durch Pigmentierung usw. Solche Varianten finden im Fahrzeuginnenraum Anwendung und könnten gezielt hergestellt und praxisnahe Resultate liefern.

Das folgende Organigramm illustriert den geplanten Ablauf zur systematischen Analyse der Ursachen von Störgeräuschen an PVC-Bahnen, die im Fahrzeuginnenraum Anwendung finden.

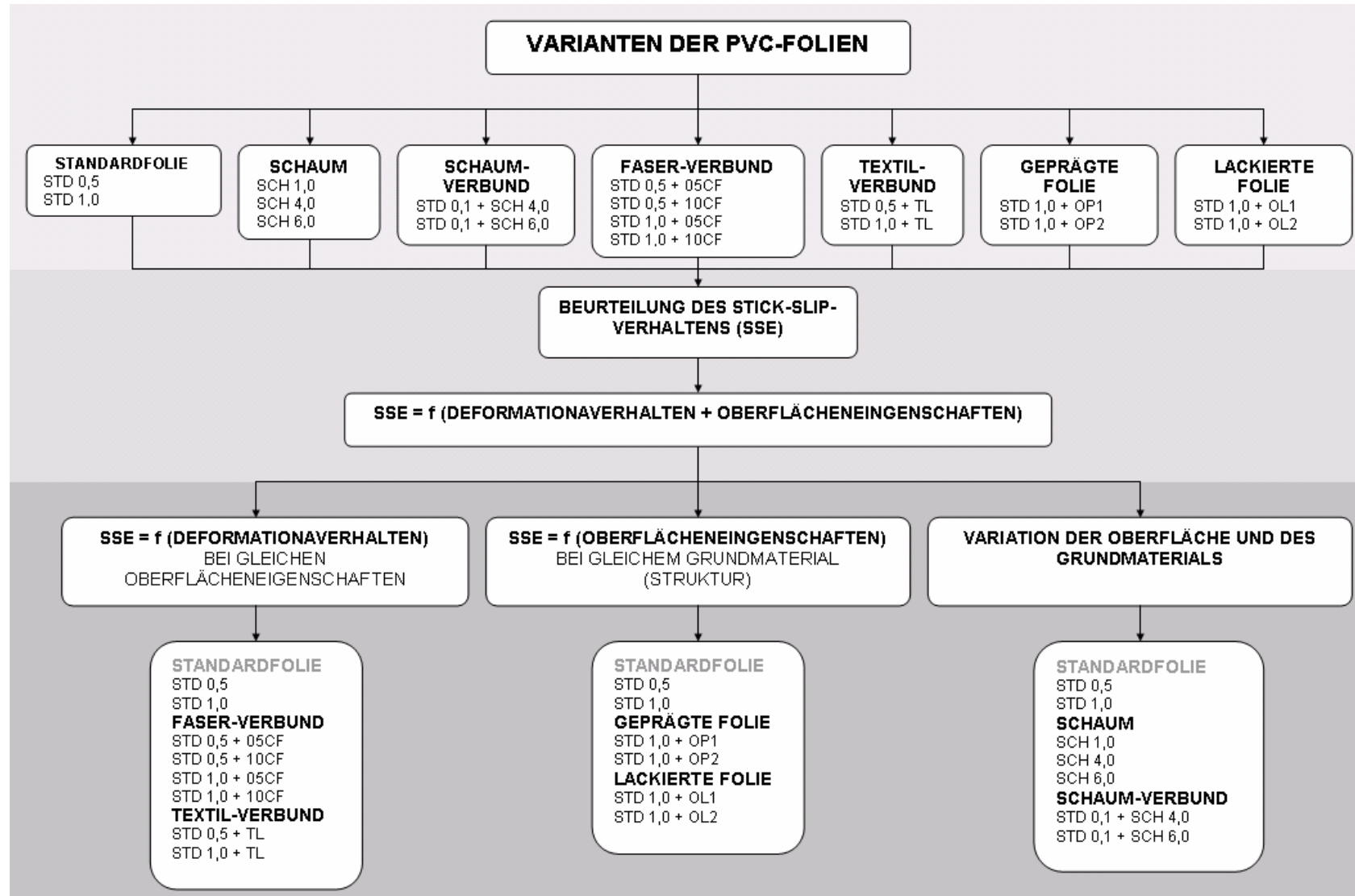


Abb. 4.12: Organigramm mit der geplanten Vorgehensweise zur Untersuchung des Stick-Slip-Verhaltens von PVC-Folien

Als Basismaterial wurde ein handelsübliches PVC-Plastisol angewendet, woraus die zu untersuchenden Bahnen hergestellt wurden. Gezielte und anwendungsrelevante Strukturmodifizierungen und Oberflächenbehandlungen wurden eingearbeitet, mit dem Zweck eine vielfältige Betrachtung der Beziehung zwischen dem Stick-Slip-Effekt zu ermöglichen.

Unterschiedliche Varianten wurden in Form von Weich-PVC-Folien gefertigt. Variation der Foliendicke, Schäumung, Herstellung von Folien-Verbunden und Kaschierungen wurden ein- bzw. ausgearbeitet. Die Lackierung und Prägung spezifischer Varianten wurde zusätzlich durchgeführt. Die hergestellten PVC-Folien sollen Produkte verkörpern, welche im Fahrzeuginnenraum eingesetzt werden und für die Entwicklung des Stick-Slip-Effektes ein Risiko darstellen. Außerdem wird erwartet, dass die unterschiedlich erzeugten Strukturen Auswirkungen auf das gesamte Eigenschaftsprofil der PVC-Bahnen besonders auf das Deformationsverhalten und die Reibungseigenschaften haben. Diese Einflüsse sollen sich wiederum in Form vom Stick-Slip-Effekt bemerkbar machen.

Den Lederproben ähnlich soll die Klassifizierung der gesamten Varianten der PVC-Folie nach der Risikoprioritätszahl und der Differenz zwischen Haft- und Gleitreibungskoeffizienten ($\mu_S - \mu_D$) stattfinden. Bei dieser globalen Betrachtung werden die ermittelten Deformations- und Oberflächeneigenschaften im Verhältnis zur Stick-Slip-Neigung der sämtlichen Varianten gebracht werden. Eine eigenschaftsbezogene Analyse des Stick-Slip-Verhaltens wird anschließend durchgeführt, in dem die Zuordnung der PVC-Folie drei Gruppen stattfindet. Die Betrachtung der drei Gruppen wird nach der folgenden Beschreibung unternommen.

- Zur Bestimmung der möglichen Korrelation mit dem *Deformationsverhalten* werden die Varianten mit den gleichen Oberflächenmerkmalen und modifizierten Grundmaterialien in Betracht gezogen. Dadurch soll der Einfluss der unterschiedlichen Strukturen des Grundmaterials zur Geltung kommen.
- Umgekehrt, um die *Oberflächeneigenschaften* in Verbindung mit dem Stick-Slip-Verhalten zu bringen, wird der gleiche Untergrund (die 1,0 mm dicke Standardfolie) mit unterschiedlichen Behandlungen und Modifizierungen der Oberfläche analysiert.
- Als Konsequenz des Schäumungsprozesses spielen bei den geschäumten Folien sowohl die Struktur des Grundmaterials, als auch die Oberflächeneigenschaften eine Rolle bei der Bestimmung der Reibeigenschaften. Die PVC-Schäumen setzen die dritte Gruppe zusammen.

4.2.2 BESCHREIBUNG DER ANGEWENDETEN MATERIALIEN, VERARBEITUNGS-METHODEN UND ERHALTENEN ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung der angewendeten Materialien und Messmethoden, die während der zweiten Etappe der Forschungsarbeit zum Einsatz kamen. Weiterhin wird eine genaue Beschreibung des Herstellungsverfahrens und der erhaltenen Messergebnisse dargelegt.

4.2.3 MATERIALIEN VERWENDET AN DER ZWEITEN ETAPPE

Aus einem handelsüblichen PVC-Plastisol wurden unterschiedliche bahnenartige Erzeugnisse für die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen dem Stick-Slip-Verhalten und dem Deformationsvermögen hergestellt. Dessen genaue Zusammensetzung wird in der Tabelle 4.6 verdeutlicht. Diese Rezeptur kommt im Automobilbau als fogging-arme Beschichtung zum Einsatz.

Komponente	Produktbezeichnung	Anteil [bezogen auf die 100 Teile PVC]
E-PVC	EVIPOLEP7485	100
Weichmacher 1	Palatinol 10-P (DPHP)	65
Kreide (Pigment/Füllstoff)	OMYOCARB® 6-AL	20
Lichtstabilisator	MarkScreen™ UV-781	2
Weichmacher 2/Stabilisator	Edenol D 82	3
Treibmittel	Unicell D 200 A	2,0 Gw%(*)

(*) angewendet an der Herstellung der geschäumten Bahnen

Tabelle 4.6: PVC-Rezeptur angewendet an der Herstellung der zu untersuchenden bahnenartigen Erzeugnisse

Alle Varianten der PVC-Folien wurden in den FILK-Einrichtungen hergestellt. Dafür kam eine Beschichtungsanlage zur Anwendung, die ein indirektes Streichverfahren mit Umkehrpapier nutzt. Diese Anlage ermöglicht auf Laborebene die Herstellung von PVC-Bahnen, z. B. Kunstledern und Folien, nach einer industrieähnlichen Methode. Durch die Einstellung des Walzen-Rakel-Spaltes ist eine genaue Definition der Folienstärke möglich. Ofentemperatur und Verarbeitungsgeschwindigkeit können ebenfalls exakt eingestellt und dadurch alle Arbeitsschritte von der Vor-Gelierung bis zum Schäumen des PVC-Plastisols durchgeführt werden. Ebenso ist das Kaschieren eines Schichtträgers möglich. Alle Parameter wurden getestet und auf die Forschungsziele abgestimmt. Die Abb. 4.13 zeigt eine schematische Skizze der Beschichtungsanlage.

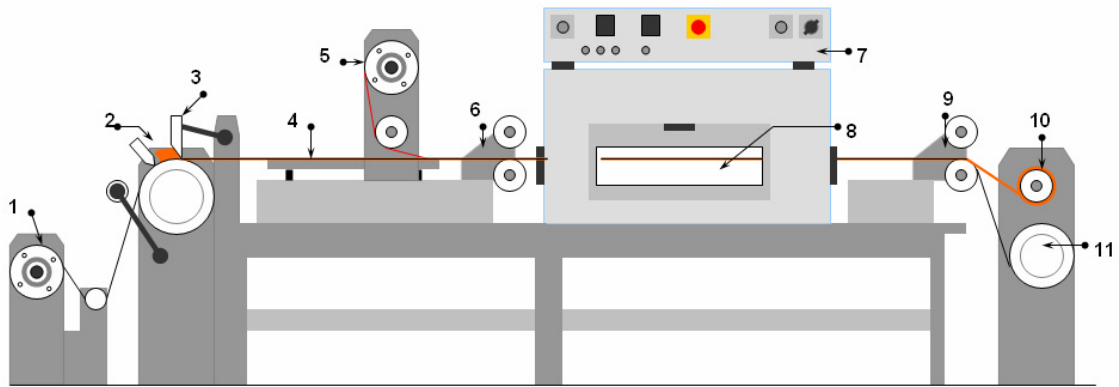


Abb. 4.13: Skizze der Beschichtungsanlage angewendet zur Herstellung der PVC-Folie

Während der Herstellung wird das gespannte Umkehrpapier, mit der Bezeichnung BOR supermatt, abgewickelt (1) und durch die Streicheinheit (2 und 3) mit kontrollierter Fahrgeschwindigkeit geführt. Dort findet das Auftragen des Plastisols (2) statt. Die Dicke des Spaltes wird durch das Rakelmesser (3) vordefiniert. Zur Reduzierung von Luftblasen in der hergestellten Folie wird die PVC-Paste mit Hilfe einer Heizplatte (4) auf 60°C erhitzt, bevor sie den Ofen (8) erreicht. Im Fall der Herstellung von kaschierten Folien, kommt die Kaschierereinheit (5) zum Einsatz. Die Folie wird mit Hilfe der Führungseinheiten (6 und 9) und der angetriebenen Aufwicklungseinheit (11) durch den Ofen gefahren. Im Ofen findet die Gelierung des Plastisols statt, welches als Folie, Verbund oder Schaum aufgewickelt werden kann (10). Die Verarbeitungsparameter, wie Ofen-, Heizplattentemperatur und Verarbeitungsgeschwindigkeit werden in die Steuerungseinheit (7) eingegeben. Die Angaben zur Herstellung der Folie werden in der folgenden Tabelle verdeutlicht.

Variante der PVC-Folie	Rakelspalt [mm]	Verarbeitungsgeschwindigkeit [m/min]	Ofentemperatur [°C]
Standardfolie	0,5	0,30	170
	2x 0,5	0,30	170
Schaum	1,0	0,30	200
	1,4	0,30	200
Schaum-Folie-Verbund	0,1 (Folie)	0,30	155
	1,0 (Schaum)	0,25	200
	0,1 (Folie)	0,30	155
	1,4 (Schaum)	0,25	200
Faser-Folie-Verbund	0,5	0,30	170
	2 x 0,5	0,30	170
Textil-Folie-Verbund	0,5	0,30	170
	1,0	0,30	170

Tabelle 4.7: Verarbeitungsbedingungen zur Herstellung der PVC-Folien

4.2.4 BESCHREIBUNG DER EINZELNEN VARIANTEN DER PVC-FOLIEN

Standardrezeptur (SR): Die Folien wurden aus der in der Tabelle 4.6 beschriebenen Standardrezeptur ohne Zusatz weiterer Komponenten hergestellt. Zwei unterschiedliche Foliendicken wurden hergestellt: 0,5 mm und 1,0 mm. Die Herstellung der 1,0 mm dicken Folie fand in zwei Schritten statt, wobei zwei 0,5 mm dicke Folien aufeinander geliert wurden. Dieses Verfahren wurde vorgezogen, weil die Viskosität des Plastisols zu gering war, um eine einzige Schicht mit 1,0 mm zu streichen. In der Abb. 4.14 ist eine Querschnittsaufnahme von der Standard PVC-Folie dargestellt. Daran sind Kreidepartikel zu erkennen, die üblicherweise als Pigment und Füllung in PVC-Plastisolen eingesetzt werden.

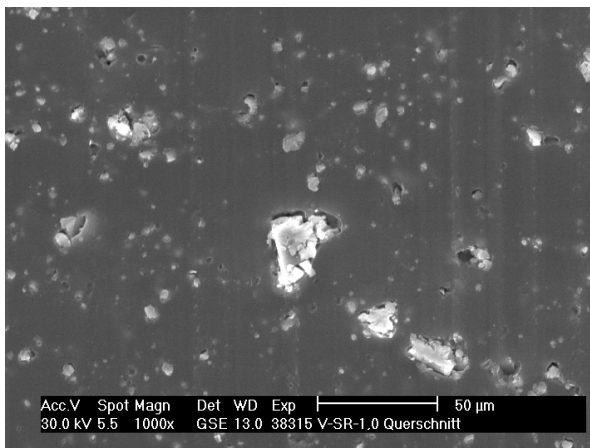


Abb. 4.14: REM-Aufnahme der Standardfolie aus PVC

Geschäumte Folie: Der Standardrezeptur wurden 2,0 Gw% Treibmittel zugegeben und mit Hilfe eines geeigneten Rührers eingemischt. Anschließend kam die Paste durch einen Reibstuhl, um die agglomerierten Partikel des Treibmittels zu zerkleinern. Die Größe der Partikel wurde anhand eines Grindometers kontrolliert.

Die Herstellung der Schäume erfolgte ebenfalls mit der Einstellung von zwei unterschiedlichen Rakelspalt, nämlich 1,0 mm und 1,4 mm, welche resultierenden Dicken von 4,0 mm und 6,0 mm erreichten.

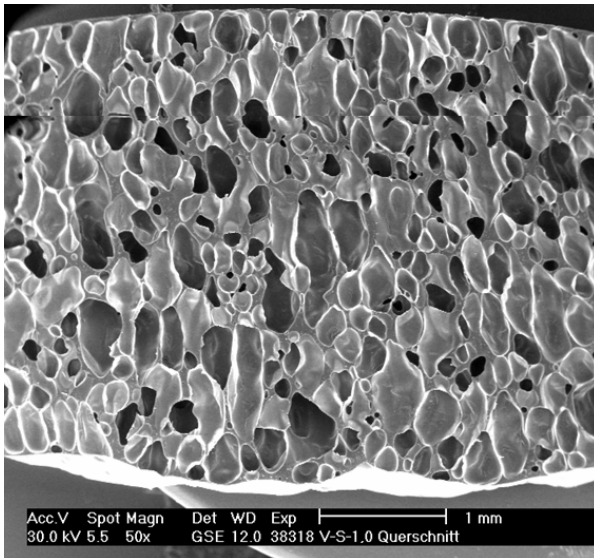


Abb. 4.15: Querschnitt der geschäumten PVC-Folie

Schaum-Folie-Verbund: Hierbei handelt es sich um einen zweischichtigen Verbund. Der Herstellungsprozess beruht darauf, dass auf einer 0,10 mm dicken und kompakten PVC-Folie zwei unterschiedlich dicke Schaumschichten aufgetragen und anschließend thermisch geschäumt wurden. Im oberen Bereich der Abb. 4.16 ist die 0,10 mm dicke Folie zu sehen, worauf die geschäumte Rezeptur mittels Umkehrbeschichtung aufgetragen wurde.

Im Vergleich zu den reinen Schaumvarianten stellt das Hinterschäumen einer dünnen Folie eine völlig neue Struktur des Materials dar. Bezüglich der Anzahl, der Form und der Größe der Poren, sind jedenfalls keine bedeutenden Unterschiede zu den einfach geschäumten Varianten zu verzeichnen.

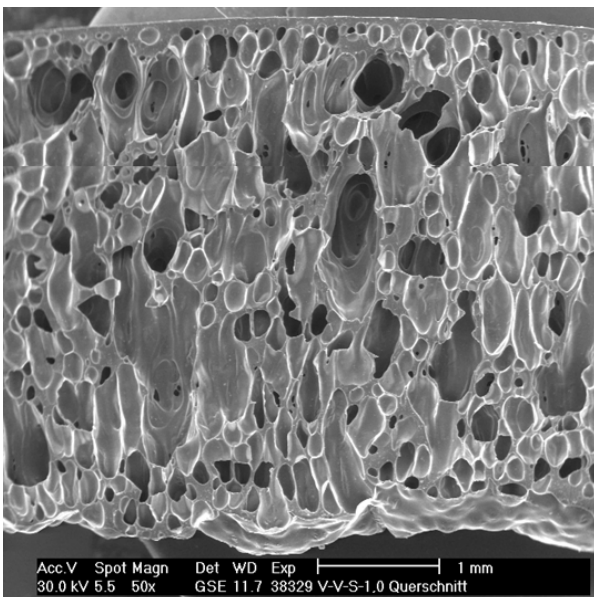


Abb. 4.16: Querschnitt der Schaum-Folie-Verbunde aus PVC

Kohlenstofffaser-Folie-Verbund: Der Kohlenstofffaser-Folie-Verbund wurde jeweils mit 0,05 Gw% und 0,10 Gw% Faseranteilen, und analog der Standardfolie mit 0,5 mm und 1,0 mm Stärke hergestellt. Die Anteile an Fasern sollen ausreichend sein, um Änderungen des Deformationsverhaltens zu erhalten, ohne die Oberflächeneigenschaften der Verbunde stark zu beeinträchtigen. Da eine Verstärkung der Folien nicht beabsichtigt wurde, wurde dabei weder eine Vorbehandlung der Faser unternommen noch Zusätze angewendet, um die Haftung zwischen Faser und Matrix zu verbessern.

Mit Anwendung der Bildverarbeitung wurde die Häufigkeitsverteilung der Kohlenstofffaserlänge ermittelt. Das folgende Diagramm (Abb. 4.17) zeigt das Ergebnis. Es kann festgestellt werden, dass die Mehrzahl der Fasern eine Länge von 60 µm bis 240 µm besitzt. Eine mittlere Dicke von $7,0 \pm 0,8$ µm wurde durch das gleiche Verfahren gemessen.

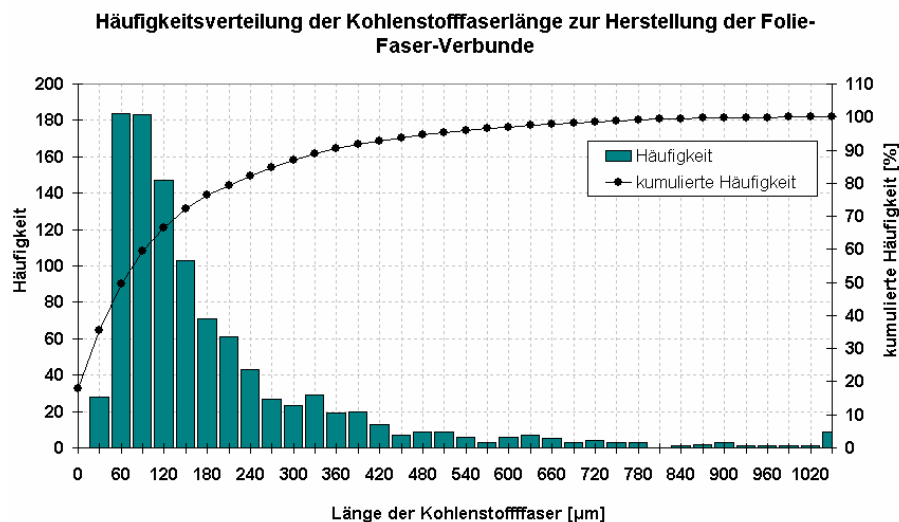


Abb. 4.17: Häufigkeitsverteilung der Länge der angewendeten Kohlenstofffasern

Die Abb. 4.18 zeigt eine Querschnittsfläche, die durch einen Zugversuch bei Raumtemperatur entstand. Daran sind sowohl die Kohlenstofffasern als auch die Kreidepartikel der ursprünglichen Paste zu sehen. Dadurch ist die wahrscheinliche Beteiligung dieser Füllstoffe am Versagen des Materials zu vermuten. Wichtig ist auch zu identifizieren, inwiefern die Einlagerung der Kohlenstofffaser das Deformations- und das Reibungsverhalten der PVC-Folie beeinflussen können.

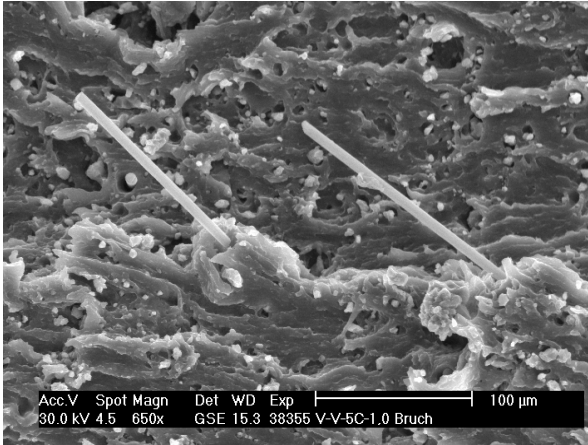


Abb. 4.18: REM-Aufnahme der Faser-Folie-Verbunde aus PVC

Textil-Folie-Verbund: Das PVC-Plastisol wurde mit einem technischen Träger kaschiert. Hierbei handelt es sich um ein flammhemmendes Textil, welches von der kunstlederverarbeitenden Industrie zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Textil findet gleichermaßen Anwendung im Fahrzeuginnenraum. Das Kaschieren an sich, die Art des Textils und die Dicke der kaschierten PVC-Folie können auch die Stick-Slip-Anfälligkeit dieser Produkte beeinflussen.

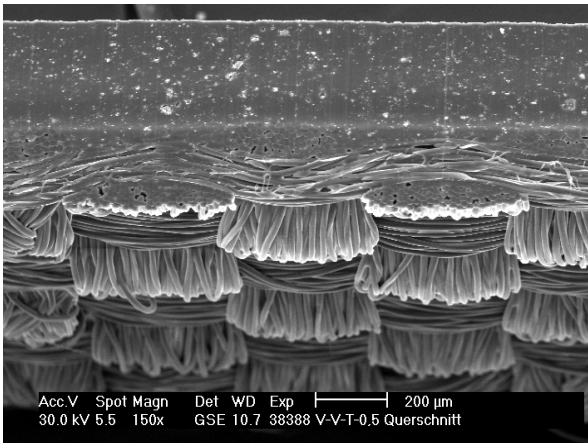


Abb. 4.19: REM-Aufnahme der Textil-Folie-Verbunde aus

In der Tabelle 4.8 werden die eingestellten und resultierenden Dicken genauso wie Anzahl der Schichten der fertigen PVC-Folien gezeigt.

Variante der PVC-Folie	Rakelspalt [mm]	Resultierende Dicke ($\pm 10\%$)[mm]	Anzahl der Aufträge
Standardfolie	0,5	0,5	1
	0,5	1,0	2
Schaum	1,0	4,0	1
	1,4	6,0	1
Schaum-Folie-Verbund	0,1 (Folie)	4,0	2
	1,0 (Schaum)		
	0,1 (Folie)	6,0	1
1,4 (Schaum)			
Faser-Folie-Verbund	0,5	0,5	1
	0,5	1,0	2
Textil-Folie-Verbund	0,5	0,6	1
	1,0	1,0	1

Tabelle 4.8: Eingestellte und resultierende Dicke der PVC-Folien

4.2.5 BESCHREIBUNG DES LACKIERUNGSPROZESSES UND DER LACKIERTEN PVC-FOLIEN

Die Lackierung von bahnenartigen Erzeugnissen für den Fahrzeuginnenraum erfolgt einerseits aus dekorativen Gründen, andererseits zum Schutz gegen aggressive Medien, Witterungseinflüsse und mechanische Beanspruchungen. Die Applikation von gleichmäßigen Lackschichten mit hoher Haftfestigkeit und zufriedenstellenden mechanischen Eigenschaften fassen die höchsten Anforderungen der Automobil- und Lackindustrie zusammen. Daher stellt die Oberflächenveredlung durch Lackierung einen unentbehrlichen Teil der Verarbeitung sowohl beim Natur- als auch beim Kunstleder dar. Aufgrund des praxisnah gesetzten Ziels der Forschungsarbeit, wird der Einfluss der Lackierung auf die Entwicklung des Stick-Slip-Effekts für relevant gehalten.

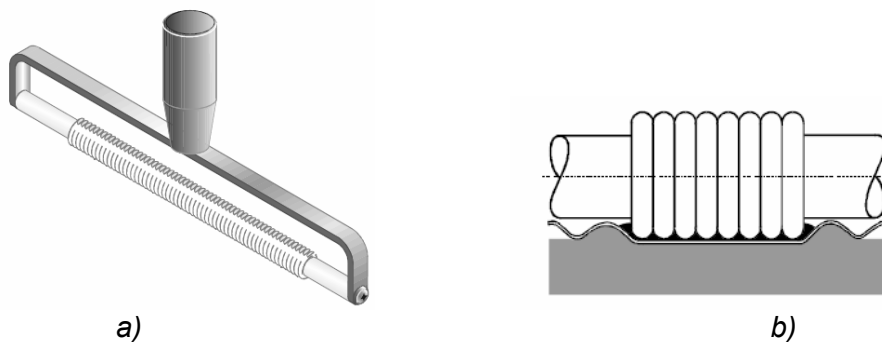
Zwei Lacksysteme von zwei unterschiedlichen Lackherstellern wurden verwendet. Die PVC-Variante Standardfolie 1,0 mm wurde als Grundmaterial bzw. Referenz zur Lackierung genommen. Der erste Lack, ein sogenannter

- **Gleitlack** auf wässriger Basis, mit Anti-Stick-Slip Wirkung empfiehlt sich besonders für die Applikation an harten Kunststoffen, wie z.B. für Kontaktstellen zwischen ABS/PC, POM, PP oder Leder/Folie. Er kann im Wesentlichen als ein lufthärtendes und fast durchsichtiges Trockenschmiermittel mit sehr hohem Haftungsvermögen, Abriebfestigkeit und antistatische Wirkung beschrieben werden. Dieser Lack ist im destillierten Wasser oder Leitungswasser löslich.

Das zweite Lacksystem, ein sogenanntes 2-Komponenten-System ist ein

- **Kunstlederlack**, ebenfalls eine wässrige Dispersion, für die Applikation an PVC-Kunstleder und PVC/ABS-Folie empfohlen und wird mit Netzmittel und Vernetzer auf Polyurethan Basis angesetzt. Dieser Lack enthält als Mattierungsmittel eine Kombination von anorganischen und organischen Partikeln mit einer Größe von 3,0 µm bis 8,0 µm. Außerdem ist er abrieb- und alkoholbeständig, flexibel, und schreibecht.

Zum Auftragen der ausgewählten Lacksysteme wurde ein Lackfilmziehgerät der Firma Erichsen GmbH & Co KG in Kombination mit mehreren Rakelmessern benutzt. Die meisten Auftraggeräte haben einen Spalt mit bestimmter Höhe, durch den der Lack beim Ziehen auf das Substrat aufgebracht wird. Dieses Laborauftragsgerät, der so genannte Spiralrakel, eignet sich besonders für flexible Anstrichträger und wurde daher angewendet. Beim Auftragen des Lackes, wird der Spiralrakel am beweglichen Arm des Lackfilmziehgerätes festgeklemmt und nach dem Aufgießen des Lackes mit 2,5 mm/s über die zu lackierenden PVC-Folie gefahren.



a) *Spiralrakel* und b) *schematische Darstellung* [Eri 2007]

Das Entscheidende bei der Anwendung des Spiralrakels liegt in der Spalthöhe, wodurch die Schichtdicke des aufgetragenen Mittels bestimmt wird. Dabei kann die mittlere Spalthöhe h wie folgt berechnet werden.

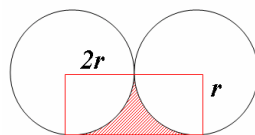


Abb. 4.21: *Model zur Berechnung der resultierenden Schichtdicke des Lackes*

Für das oben eingezeichnete Rechteck gilt:

$$A_R = 2 \cdot r^2$$

Formel 4.1

Für die maximale mit Lack ausfüllbare schraffierte Fläche A_{Lack} gilt:

$$A_{Lack} = A_R - \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 = \left(2 - \frac{1}{2} \cdot \pi\right) \cdot r^2 \quad \text{Formel 4.2}$$

Von einem optimalen Verlauf ausgegangen

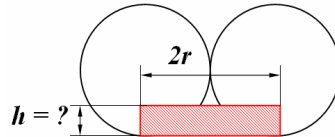


Abb. 4.22: Model zur Berechnung der resultierenden Schichtdicke des Lackes

gilt dann:

$$A_{Lack} = 2 \cdot r \cdot h \quad \text{Formel 4.3}$$

Die zu erwartende resultierende Schichtdicke lautet daher:

$$h = \frac{A_{Lack}}{2 \cdot r} = \frac{\left(2 - \frac{1}{2} \cdot \pi\right) \cdot r^2}{2 \cdot r} = \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \pi\right) \cdot r \quad \text{Formel 4.4}$$

Um das Rakelmesser mit der geeigneten Spalthöhe für die oben genannten Lacksysteme auszuwählen, wurde auf den Festkörperanteil und die Viskosität des Lacks geachtet. Je höher die Werte von beiden Parametern, desto höher ist der notwendige Rakelspalt, um eine zweckentsprechende Schichtdicke zu erhalten. Nach der Beurteilung der Auftragsmenge der Lacke im Trockenzustand, wurde sich für die in der Tabelle 4.9 gezeigten Spalthöhen entschieden.

Bezeichnung des Lackes	Festkörperanteil [%]	Auslaufzeit [s] DIN 4	Spalthöhe [μm]	Resultierende Dicke der Lackschicht [μm]
Gleitlack	30	12 [A]	30	20,7 \pm 4
Kunstlederlack	21,8 \pm 0,5	30 \pm 5 [A]	50	11,8 \pm 2

Tabelle 4.9: Eigenschaften der aufgetragenen Lacke und die eingestellten Spalthöhen bei der Lackierung der PVC-Standardfolie

Die resultierenden Schichten der aufgetragenen Lacke wurden zuletzt mittels Bildverarbeitung ermittelt, siehe Ergebnisse in der Tabelle 4.9. Nach dem Austrocknen des Lackes zeigt die Lackschicht eine geringere Dicke als die, die ursprünglich aufgetragen wurde. Das ist dadurch zu erklären, dass flüchtige Bestandteile des Lackes verdampfen. Die Menge an verlorenem Material ist charakteristisch für jedes Lacksystem.

4.2.6 BESCHREIBUNG DES PRÄGEPROZESSES UND DER GEPRÄGTEN PVC-FOLIEN

Eine zusätzliche Lösung um den Stick-Slip-Effekt im Fahrzeuginnenraum zu mindern, ist die Erzeugung stick-slip-reduzierender Oberflächenprofile. Früher nur ästhetisch bezweckt, heutzutage durch technische Anforderungen bestimmt, werden Bereiche wie z.B. Konsole, Armaturenbrett, Hutablage, Türverkleidung etc. mit dreidimensionalen Strukturen versehen um die Störgeräuschproblematik zu minimieren. Der Effekt der so genannten stick-slip-reduzierenden oberflächlichen Strukturen wurde, unter anderen, schon an spritzgegossenen Kunststoffplatten erforscht am FILK [Loh 2004]. Auf den erhaltenen Feststellungen basierend, wurden zwei dieser speziell entworfenen Prägestrukturen zur Prägung der PVC-Standardfolie 1,0 mm ausgewählt.

Die Aufbringung der Strukturen auf die PVC-Folie fand unter der Anwendung einer Presse statt. Die mit dem Negativ versehene Stahlplatte, sog. Prägeplatte, wurde auf die untere Heizplatte gelegt und darauf die PVC-Folie, mit der zu prägenden Oberfläche zur Prägeplatte gerichtet. Zum Schutz gegen Überhitzung wurde eine Teflonfolie zwischen die PVC-Folie und die obere Heizplatte gelegt, wie in der Abb. 4.23 zu sehen ist.

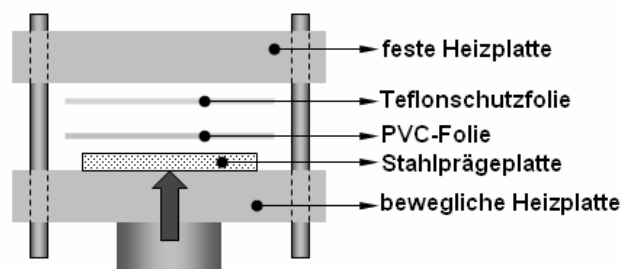


Abb. 4.23: Skizze der Presse mit der Anordnung zur Prägung der PVC-Folien

Während der Prägung wurden beide Heizplatten leicht aneinander herangefahren und die Presse auf 160°C hoch geheizt. Dabei erreichte die Folie eine Temperatur von ungefähr 80°C, den Erweichungspunkt des PVC. Anschließend unter einem Druck von 20 bar,

während 2 min, fand die Übertragung des beliebigen Profils auf die Folie statt. Die Abb. 4.24 zeigt die angewendeten Einstellparameter zur Prägung.

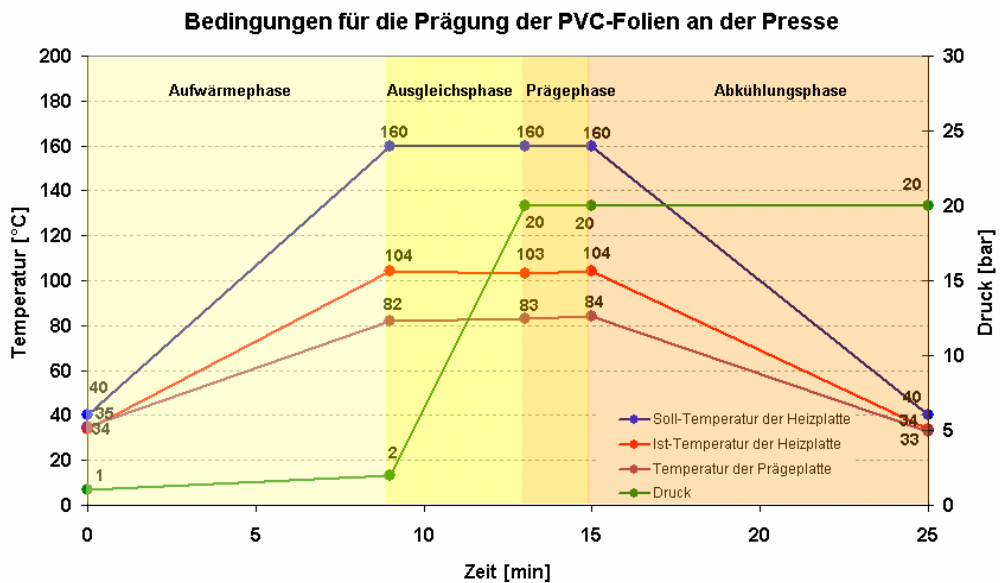


Abb. 4.24: Soll-, Ist-Temperatur und Druck angewendet zur Prägung der PVC-Folien

4.2.7 KONTROLLE DER ÜBERTRAGUNG DER NARBUNGEN: RAUHEIT UND 3D-TOPOGRAPHIE

Die Rauheit der geprägten PVC-Folien wurde mit der von Kunststoffplatten verglichen, welche die gleiche Oberflächenbeschaffenheit durch Spritzgießen erhalten haben. Die Werte in der Abb. 4.25 zeigen eine gute Übertragung der Narbungen auf die Folien.

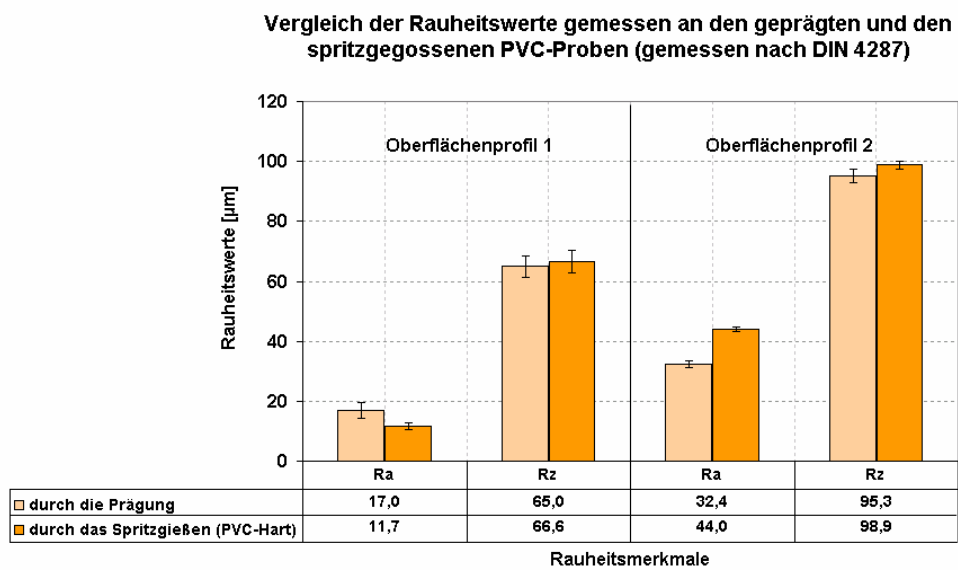


Abb. 4.25: Analyse der Übertragung beider Oberflächenprofile auf die PVC-Folien

Das geprägte Oberflächenprofil 1 stellt eine feine und weiträumige Struktur dar mit geringflächigen Erhebungen und maximalen Vertiefungen von ca. 70 µm. Andererseits zeigt das Oberflächenprofil 2 eine typisch grobe Ledernarbung mit großflächigen Erhebungen und Vertiefungen von ca. 110 µm. Die Abb. 4.26 und Abb. 4.27 illustrieren durch eine 3D-Abtastung der Oberfläche beide geprägte Strukturen.

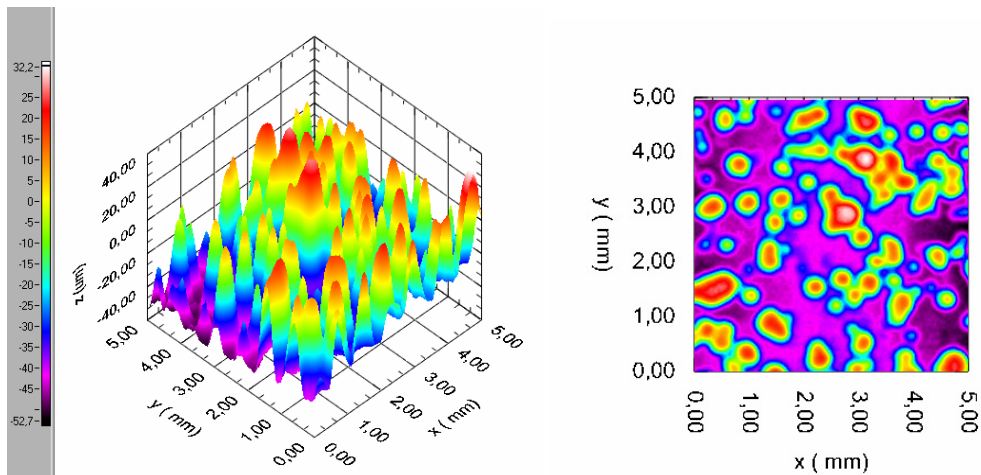


Abb. 4.26: 3D Illustration des geprägten Oberflächenprofils 1

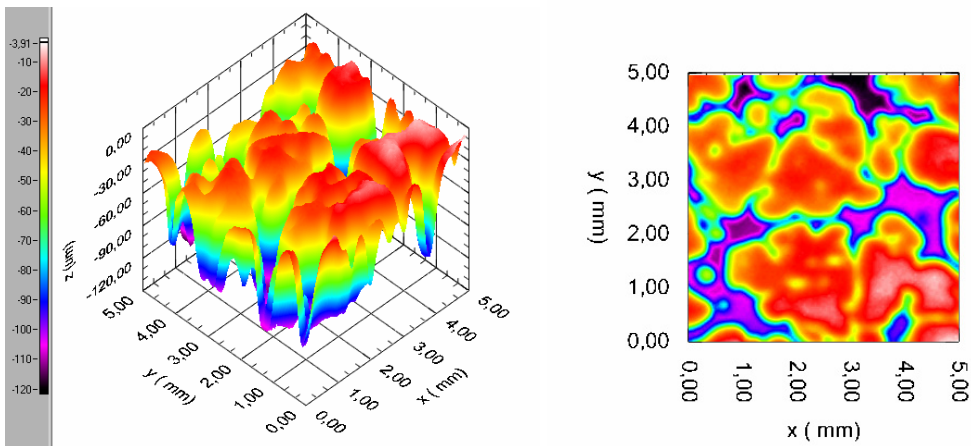


Abb. 4.27: 3D Illustration des geprägten Oberflächenprofils 2

4.2.8 ÜBERBLICK ÜBER DAS GESAMTE SPEKTRUM AN VARIANTEN DER PVC-FOLIE

Das gesamte Spektrum an hergestellten Proben umfasst 17 mögliche Erscheinungsformen von bahnenartigen PVC-Produkten. Sämtliche Varianten kommen im Fahrzeuginnenraum vor bzw. stellen innovative Lösungen, am Beispiel der Faserverstärkung, dar.

Laut Erfahrungen der Zulieferer der Automobilindustrie zeigen die eingearbeiteten Modifikationen und Behandlungen an den PVC Bahnen einen direkten Einfluss auf deren resultierendes Stick-Slip-Verhalten. Es ist bei solchen Mustern oft der Fall, dass Kombinationen solcher Einflussgrößen auf unterschiedlichen bzw. unbekanntem Grundmaterialien auftreten. Dadurch wird die Bestimmung der Ursachen von Störgeräuschproblemen erschwert. Mit der Festlegung von PVC als Standardgrundmaterial können diese Einflussgrößen einzeln und im Vergleich miteinander betrachtet werden. Daher sollte eine gezielte Vergleichsanalyse sowohl an den deformations- als auch an den oberflächlichbedingten Reibphänomenen möglich sein. Außerdem, sind die wichtigsten Einflussparameter an der Problematik damit abgedeckt.

Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung aller hergestellten Varianten der PVC-Folie. Dazu sind die resultierende Dicke und die festgelegte Kennzeichnung der einzelnen Folie angegeben.

Kennzeichnung	Variante der PVC-Folie	Dicke [mm] (± 10%)	Querschnitt der erschaffenen Struktur
STD 0,5	Standardfolie 0,5 mm	1,0	
STD 1,0	Standardfolie 1,0 mm	0,5	
SCH 1,0	Schaum 1,0 mm	1,0	
SCH 4,0	Schaum 4,0 mm	4,0	
SCH 6,0	Schaum 6,0 mm	6,0	
STD 0,1 + SCH 4,0	Schaum (4,0 mm) + Folie(0,1 mm)	4,0	
STD 0,1 + SCH 6,0	Schaum (6,0 mm) + Folie(0,1 mm)	6,0	
STD 1,0 + 05CF	Kohlenstofffaser (0,05 Gw%) + Folie(0,5 mm)	1,0	
STD 0,5 + 05CF	Kohlenstofffaser (0,05 Gw%) + Folie(1,0 mm)	0,5	
STD 1,0 + 10CF	Kohlenstofffaser (0,10 Gw%) + Folie(0,5 mm)	1,0	
STD 0,5 + 10CF	Kohlenstofffaser (0,10 Gw%) + Folie(1,0 mm)	0,5	
STD 1,0 + TL	Textil + Folie(0,5 mm)	0,6	
STD 0,5 + TL	Textil + Folie(1,0 mm)	1,0	
STD 1,0 + OP1	Standardfolie 1,0 mm + Gleitlack	1,0	
STD 1,0 + OP2	Standardfolie 1,0 mm + Kunstlederlack	1,0	
STD 1,0 + OL20	Standardfolie 1,0 mm + Oberflächenprofil 1	1,0	
STD 1,0 + OL10	Standardfolie 1,0 mm + Oberflächenprofil 2	1,0	

Abb. 4.28: Schematische Darstellung sämtlicher hergestellten Varianten der PVC-Folie

4.2.9 PROBENPRÄPARATION

Mehrere Maßnahmen wurden während der gesamten Forschungsarbeit unternommen, um eine sichere Abwicklung der Untersuchungen, und die Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten. Beispielsweise wurde die Gelierung der PVC-Folie während der Herstellung durch den in der Industrie üblichen „Knick“-Test in Ethylacetat nach PV 3407 (VW Norm) kontrolliert. Zusätzlich wurde deren Qualität durch die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften durch Zugversuche beurteilt. Als Basis für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden sämtliche zu untersuchenden Proben im Klimaraum unter Normklimabedingungen (23 °C und 50 %rel. F) laut DIN 50014 während der gesamten Untersuchungen aufbewahrt. Unmittelbar vor jeder Messung wurden die Proben einer Oberflächenbehandlung unterzogen. Das Abwischen der Oberflächen mit porösem Filterpapier wurde vorgenommen, um mögliche Adhäsionsschichten zu entfernen, welche z.B. durch Weichmachermigration oder Absetzen von Staubpartikeln zustande kommen.

Zu den Themen Alterung und Weichmachermigration an den PVC-Folien wurde während der ersten 20 Wochen parallel zur Durchführung der Messung ein Migrationstest durchgeführt. Drei unterschiedliche Methoden wurden angewendet: zwei Varianten unter Normklima und eine dritte Variante (in Anlehnung an ISO 177) bei 50 °C. Anhand aller drei Methoden wurde eine nur geringfügige und daher akzeptable Migration des Weichmachers festgestellt.

Die Angabe und Messergebnisse zu diesen und weiteren Maßnahmen, wie die Ermittlung der Porosität der geschäumten Folien, die Kontrolle der Viskosität des Plastisols während der Pastenverarbeitung etc, sind im Anhang A, B, C und D zu sehen.

5 KAPITEL

5.1 ALLGEMEINE BEURTEILUNG DER EIGENSCHAFTEN DER HERGESTELLTEN PVC-FOLIEN

Auf die gleiche Weise wie bei den Automobilledern fand die Charakterisierung der gesamten Varianten der PVC-Folie hauptsächlich durch die Ermittlung der Oberflächen-, Deformations- und Reibeigenschaften statt. Die eingearbeiteten Modifizierungen, Variationen und Behandlung zeigten, wie anfänglich vermutet, einen Einfluss auf die genannten Eigenschaften. Für alle Messbedingungen ließ sich ein gezielter Einfluss dieser Variationen auf die Stick-Slip-Neigung der einzelnen Folien feststellen. Prinzipiell wurde dadurch bestätigt, dass die strukturelle Verschiedenheit eine ausschlaggebende Rolle bei den Reibeigenschaften spielt. Basierend auf der Beurteilung dieser Eigenschaften, wird versucht, die im Abschnitt 4.1.4 aufgestellte Hypothese zu beweisen.

5.1.1 STICK-SLIP-NEIGUNG (RISIKOPRIORITÄTSZAHL)

Wie in der Abb. 5.1 zu sehen ist, wurden alle Varianten der PVC-Folie hinsichtlich ihrer Stick-Slip-Neigung in zwei Gruppen eingeteilt. Die Messungen wurden bei 10 N und 30 N Normalbelastung und jeweils mit 1,0 mm/s und 4,0 mm/s Schlittengeschwindigkeit durchgeführt. Zeigte die PVC-Variante eine Note höher als 5 ($RPZ > 5$), wurde sie als stick-slip-behaftet klassifiziert. Wurde hingegen unter allen Bedingungen eine Note von maximal 5 ($RPZ \leq 5$) erreicht, wurde die PVC-Variante als stick-slip-frei eingeteilt. Die RPZ 4 und 5, welche eine bedingte Stick-Slip-Neigung zum Ausdruck bringen, werden dadurch als „noch“ stick-slip-frei betrachtet.

Wie in den nächsten Abbildungen zu sehen ist, wird der Stick-Slip-Effekt sowohl von internen (Normalkraft, Geschwindigkeit etc.) als auch von externen Einflussparametern (Raumtemperatur, Feuchte etc.) stark beeinflusst. Zur Einteilung hinsichtlich des Stick-Slip-Verhaltens wurde hauptsächlich die Messbedingungen 10 N und 1,0 mm/s herangezogen. Diese stellt die kritischste Kombination im Automobilinnenraum dar, die gleichzeitig in der VDA-Norm zur Ermittlung des Stick-Slip-Risikos vorgesehen wird. Eine Ausnahme hierfür ist die Folien Variante STD 1,0 + OP2, bei der der höchste RPZ-Werte bei 10 N und 4,0 mm/s ermittelt wurde (siehe Abb. 5.1).

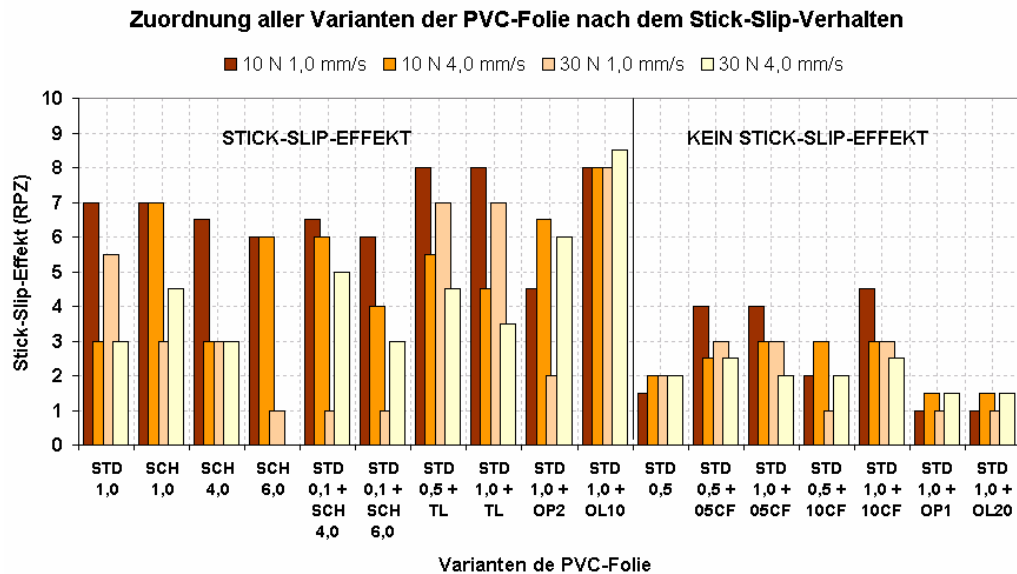


Abb. 5.1: Einteilung der PVC-Folie nach dem Stick-Slip-Effekt (für die Erklärung der Abkürzungen siehe Abb. 4.28 Seite 98)

Die Abb. 5.1 zeigt, dass die Reduzierung der Dicke der Standardfolie von 1,0 mm (STD 1,0) auf 0,5 mm (STD 0,5), eine Verbesserung des Stick-Slip-Verhaltens bewirkt. Dabei wurde STD 1,0 als stick-slip-behaftet und STD 0,5 als stick-slip-frei klassifiziert. Beide Varianten besitzen die gleiche Struktur des Grundmaterials, die gleiche Oberflächenbeschaffenheit und –zusammensetzung. Der einzige Unterschied zwischen beiden liegt in der Foliendicke, wobei die 1,0 mm dicke Folie sich aus zwei aufeinander gelierten 0,5 mm dicken Folien zusammensetzt. Diesbezüglich konnte anhand der angewendeten Untersuchungsmethoden kein Grenzflächeneinfluss festgestellt werden.

Das gesamte Spektrum der geschäumten PVC-Folie (SCH 1,0, SCH 4,0, SCH 6,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) wird als stick-slip-behaftet klassifiziert. Mit der Herstellung einer 1,0 mm dicken geschäumten Folie (SCH 1,0) konnte prinzipiell keine Verbesserung der RPZ bezüglich der Standardfolie mit der gleichen Stärke (STD 1,0) nachweisen werden. Wird die Dicke des Schaums auf 4,0 mm und 6,0 mm (SCH 4,0 und SCH 6,0) erhöht, nimmt die RPZ generell ab. Die Dickenerhöhung durch die poröse Struktur und die dadurch hervorgerufenen Änderungen der Oberflächencharakteristik bestimmen das Verformungsvermögen des Grundmaterials. Dieser Effekt kann wiederum für die Reduzierung der Stick-Slip-Neigung verantwortlich sein.

Bei den zusammengesetzten Schaum-Folien (STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) wurden ungefähr die gleiche Stick-Slip-Neigung wie bei den reinen geschäumten Varianten ermittelt. Dabei ist der Einfluss der Dicke ebenfalls festzustellen. Die Erzeugung einer

zusammengesetzten Struktur rief prinzipiell keine aussagekräftige Änderung des Stick-Slip-Verhaltens hervor. Der Einfluss der Messbedingungen macht sich bei den geschäumten Varianten besonders bemerkbar. Bei 30 N Normalkraft und 1,0 mm/s Geschwindigkeit wird eine sehr geringe RPZ beobachtet ebenfalls eine Konsequenz der Änderung Struktur des Grundmaterials.

Durch die Kaschierung der PVC-Folien mit einem technischen Textil (STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL) wird eine mehrschichtige Struktur erschaffen, welche im Idealfall als eine PVC-Folie, eine PVC-Folie verstärkt mit Textilfaser und eine Textilfaserschicht beschrieben werden kann (siehe Abb. 5.2). Daraus kann angenommen werden, dass das gesamte Volumen sich anders deformiert als die Standardvarianten. Die einzelnen Schichten des Verbundmaterials deformieren sich ebenfalls unterschiedlich.

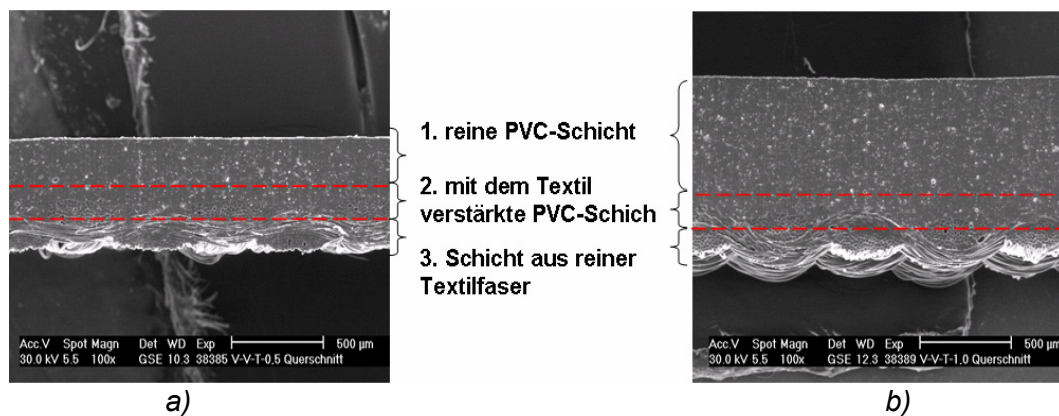


Abb. 5.2: Darstellung des Aufbaus der Textil-Folie-Verbunde a) 0,5 mm und b) 1,0 mm Dicke

Nach Abb. 5.1 führt der Zusatz des Textils zu einem höheren Stick-Slip-Risiko im Vergleich zur den reinen Standardfolien. Unabhängig von den ursprünglichen Dicken erreichten die zusammengesetzten Folien ungefähr die gleichen RPZ für alle durchgeführten Messbedingungen. Mit der Umgestaltung des Grundmaterials wurde ein einheitlicher Zustand der Reibeigenschaften erzeugt. Es muss in Erfahrung gebracht werden, inwieweit diese Feststellung sich auf weitere ermittelte Eigenschaften zurückführen lässt.

Im Gegensatz dazu verbesserte sich das Stick-Slip-Verhalten der Standardfolie durch die Verstärkung mit Kohlenstofffasern (STD 0,5 + 05CF, STD 0,5 + 10CF, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF). Sämtliche verstärkte Varianten wurden als stick-slip-frei eingestuft. Dabei erreichten sie RPZ-Werte, welche zwischen denen der 0,5 mm (STD 0,5) und der 1,0 mm dicken Standardfolie (STD 1,0) liegen. Die Einlagerung der Fasern implizierte eine Änderung

des Gefüges und damit der inneren Eigenschaften der PVC-Folie, welche diese Verbesserungen bewirkte.

Die folgende Abbildung zeigt eine geringfügige Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Standardfolie aufgrund der Einlagerung der Kohlenstofffasern. Sowohl bei der 0,5 mm als auch bei der 1,0 mm dicken Folie ist eine Erhöhung des integralen Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit zu verzeichnen. In Anlehnung an die Mischungsregel ist das theoretische Verstärkungsvermögen von Kohlenstoffkurzfasern allerdings viel höher als das an den PVC-Folien Erreichte (siehe Abb. 5.3 a) und b)). Dieser nur minimale Verstärkungseffekt kam dadurch zustande, dass die Kurzfasern ohne weitere Behandlung oder Anwendung von Haftvermittlern eingesetzt wurden.

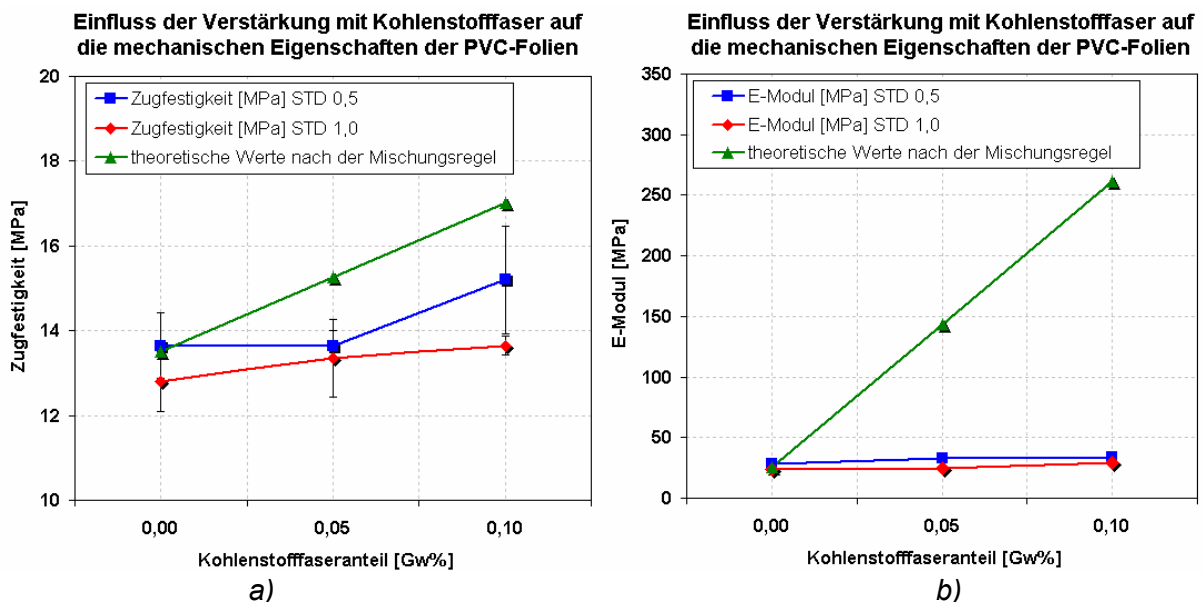


Abb. 5.3: Mechanische Eigenschaften der verstärkten PVC-Folie: a) Zugfestigkeit und b) Elastizitätsmodul

Die Untersuchung von Bruchflächen der verstärkten Folien am Rasterelektronenmikroskop untermauert die vorherigen Ergebnisse. Die folgenden REM-Aufnahmen zeigen unbeschädigte Segmente von Kurzfasern, die aus den Bruchflächen herausragen (Abb. 5.4 a) und b)) bzw. die lose in der Matrix stecken (Abb. 5.5 a) und b)).

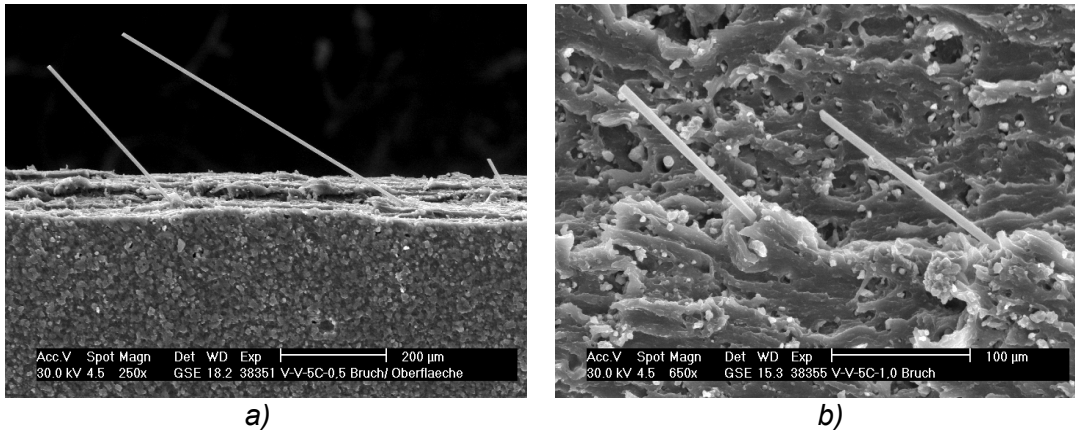


Abb. 5.4: REM-Aufnahmen der faserverstärkten PVC-Folie: a) Querschnitt und b) Draufsicht einer Bruchfläche

Beim Reißen der Folie unter Normalbelastung wurden die meisten Faser aus der Matrix einfach herausgezogen. Dieser Effekt ist bekannt als „pull-out“-Effekt der Faser. Ein klares Zeichen dafür, dass aufgrund der niedrigen Polaritäten beider Komponente kaum Haftung zwischen den Fasern und der PVC-Matrix stattfand und folglich auch keine sinnvolle Verstärkung. Darauf basierend kann vermutet werden, dass je nach Faseranteil die eingelagerten Fasern für eine lockerere, fast schaumartige Struktur des Grundmaterials sorgten. Das machte sich durch die Anwesenheit von Lufteinschlüssen bzw. Weichmacher um die Faser bemerkbar, welche an der Oberfläche zu beobachten sind. Diese beeinträchtigten die Rauheit der Folie nicht.

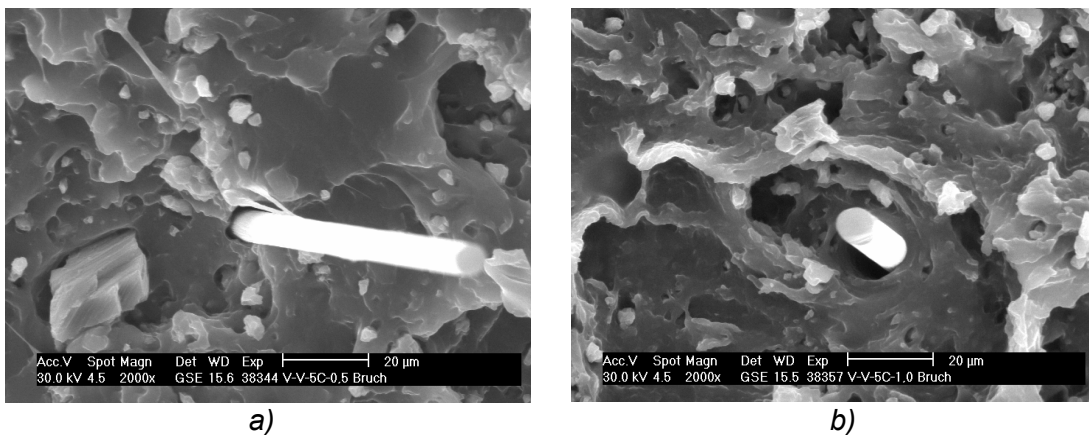


Abb. 5.5: REM-Aufnahmen der faserverstärkten PVC-Folie: Draufsicht einer Bruchfläche

Durch die Modifizierung der Oberflächen anhand der Prägung der Standardfolie mit den technischen Oberflächenprofilen (STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2) wurden unterschiedliche Effekte festgestellt. Mit der Aufbringung des Oberflächenprofils 1 konnte ein völlig stick-slip-freier Zustand erreicht werden. Die RPZ-Werte lagen für alle Einstellungen

bei 1. Hingegen brachte das Oberflächenprofil 2 keine Verbesserung der RPZ im Vergleich zu STD 1,0. Der RPZ-Wert blieb zwischen 6 und 7.

Durch die Applikation des Gleitlackes (STD 1,0 + OL1) wurde die Stick-Slip-Neigung der STD 1,0 stark reduziert, von einem RPZ-Wert von 7 auf 1. Aus der Applikation des Kunstlederlackes (STD 1,0 + OL2) resultierte hingegen eine Verschlechterung der Stick-Slip-Neigung. Die damit behandelten Folien erreichten eine RPZ von 8.

Im Folgenden soll versucht werden, ein Verständnis für die Unterschiede in der RPZ anhand ausgewählter Eigenschaften der PVC-Folie zu erzielen.

5.1.2 REIBUNGSKOEFFIZIENT

Mit der Ermittlung des Reibungskoeffizienten lassen sich wichtige ergänzende Informationen über die Rolle der Struktur des Grundmaterials und der Oberflächenmerkmale der PVC-Folie an den Reibphänomenen feststellen. Im Gegensatz zu den Automobilledern (Abb. 4.1 im Abschnitt 4.1.3), bei denen die Differenz $(\mu_s - \mu_D)$ einen klaren Hinweis auf deren Stick-Slip-Neigung zeigte, erwies sich dieser Parameter bei den PVC-Folien als weniger schlüssig. Nach Abb. 5.6 kann jedoch gesagt werden, dass die stick-slip-freien PVC-Folien zu geringeren Werten der Differenz $(\mu_s - \mu_D)$ tendieren als die stick-slip-behafteten. $(\mu_s - \mu_D)$ ist allein nicht ausreichend, um einen direkten Bezug zum Stick-Slip-Effekt der PVC-Folien herzustellen. Eventuell könnte die Differenz $(\mu_s - \mu_D)$ für einzelne Variantengruppe der PVC-Folie repräsentativer sein.

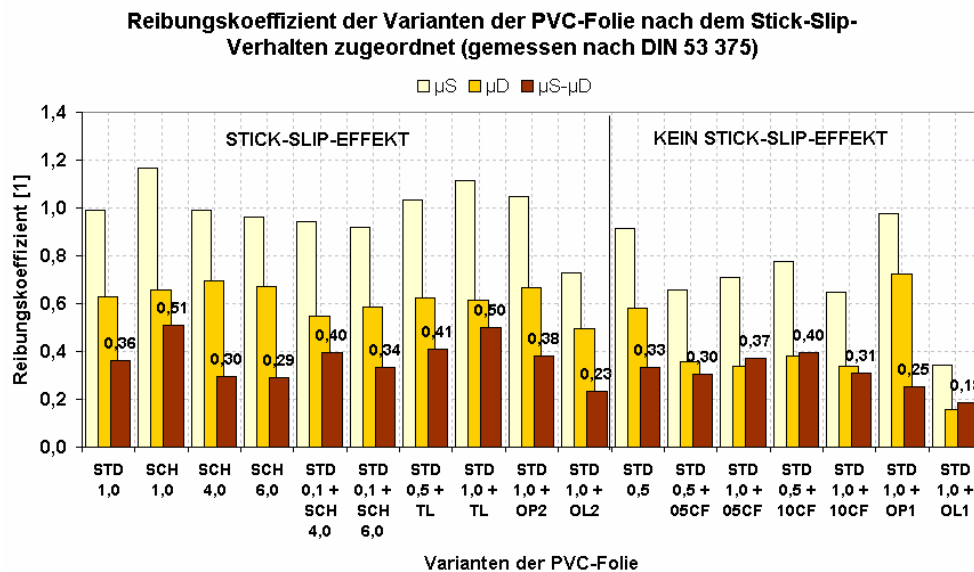


Abb. 5.6: Reibungskoeffizient der PVC-Folien

Aus der Abb. 5.6 ist im Hinblick auf die Differenz ($\mu_S - \mu_D$) zu erkennen, dass die Probenpaarung STD 1,0 eine geringfügig höhere Stick-Slip-Neigung als die STD 0,5 zeigt. Diese Tendenz bestätigt die am Stick-Slip-Prüfstand ermittelte RPZ. Die oberflächliche Gestaltung, Zusammensetzung des Grundmaterials und das adhäsive Vermögen von beiden Varianten der PVC-Folien sind gleich. Daher ist die Einteilung des unterschiedlichen Reibungsverhaltens auf den Dickenunterschied zurückzuführen.

Durch die Schäumung nahm der Haftreibungskoeffizient der 1,0 mm dicken Folie (SCH 1,0) im Vergleich zu der nicht geschäumten Variante mit gleicher Dicke stark zu. Mit der konsekutiven Erhöhung der Dicke auf 4,0 mm und 6,0 mm (SCH 4,0 und SCH 6,0) blieb der Haftreibungskoeffizient im Vergleich zu der STD 1,0 praktisch unverändert. Bei sämtlichen geschäumten Varianten blieb ebenso der Gleitreibungskoeffizient im vergleichbaren Bereich zu der STD 1,0. Die Zunahme der Haftreibungskoeffizienten bei der SCH 1,0 deutet auf die Einwirkung des Dickenunterschieds und der schäumungsbedingten Änderungen der Rauheit und des Verformungsvermögens der neuen Struktur hin. Diese Ergebnisse zeigen, dass die entstandenen Wechselwirkungen zwischen den Reibpartnern von diesen Parameter stark beeinflusst werden. Bei konstanter Normalbelastung und steigender Flexibilität muss mit einer höheren realen Kontaktfläche gerechnet werden. Je dünner die Schaum-Folie, desto flexibler und desto höher die Kontaktfläche. Dieser Effekt ist für den hohe Haftreibungskoeffizienten der SCH 1,0 verantwortlich.

Die Kombination der Schäume mit der 0,10 mm dicken kompakten PVC-Folie (STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) stellt einen Zwischenstand der Eigenschaften dar. Es ist

nachvollziehbar, dass der Einfluss der Topographie und des Deformationsverhaltens der Schaumschicht von der obersten kompakten PVC-Schicht beeinflusst wird. Daraus resultiert, dass der Gleitreibungskoeffizient niedriger ist als bei der reinen STD 1,0, da die Rauheit durch die 0,1 mm Folie geringer wird. Der Haftreibungskoeffizient wurde hingegen durch den Anstieg der Dicke von 4,0 mm auf 6,0 mm, wie bei SCH 4,0 und SCH 6,0, geringfügig beeinflusst.

Aus der Kaschierung der PVC-Folien (STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL) folgte ein Anstieg der Reibungskoeffizienten gegenüber den entsprechenden Standardvarianten. Die Steigung der Differenz ($\mu_S - \mu_D$) durch die Kaschierung ist in der Abb. 5.7 zu sehen. Die Oberflächeneigenschaften dieser Varianten sind mit denen der STD 1,0 vergleichbar. Es lässt sich daraus schlussfolgern, dass die Foliendicke und die strukturellen Modifizierungen für die Verschlechterung der Reibungseigenschaften, d. h. die Erhöhung der Stick-Slip-Neigung, verantwortlich sind.

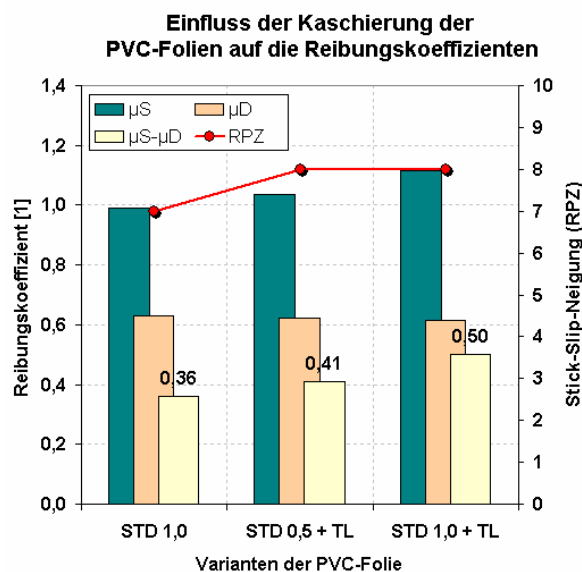


Abb. 5.7: Reibungskoeffizient und Stick-Slip-Neigung der kaschierten PVC-Folien

Die aufgrund der Verstärkung hervorgerufenen Änderungen verursachten eine allgemeine Reduzierung der Reibungskoeffizienten in Bezug auf die Standardvarianten (STD 0,5 und STD 1,0). Die Abb. 5.8 a) und b) fassen diese Werte zusammen. Bei den 0,5 mm dicken Varianten ist die Abnahme der Reibungskoeffizienten bei einem Faseranteil von 0,05 Gw% stärker als bei einem Faseranteil von 0,10 Gw% zu verzeichnen. Während für die STD 1,0 gilt, je höher der Faseranteil, desto höher die Abnahme beider Reibungskoeffizienten. Alle verstärkten Folien wurden, nach der RPZ, als stick-slip-frei eingestuft. Sie zeigen jedoch

keine schlüssige Tendenz nach der Differenz ($\mu_S - \mu_D$) wenn mit den Standardvarianten verglichen wird. Dieser Effekt kann eventuell durch die Anwesenheit der Kurzfaser sowohl im Inneren als auch an der Oberfläche erklärt werden. Einerseits können herausragende Fasern die Relativbewegung der Folie erschweren, andererseits können Fasersegmente an den Oberflächen einen Gleiteffekt hervorrufen. Auf jeden Fall ist die allgemeine Reduzierung der Reibungskoeffizienten durch die Einlagerung der Faser eine wichtige Feststellung.

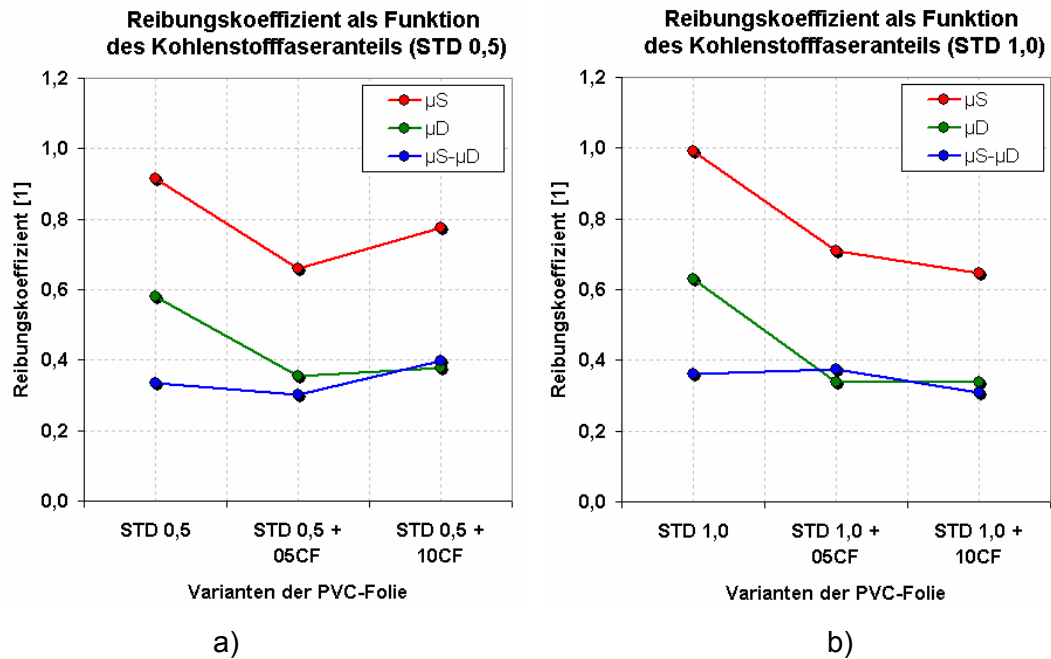


Abb. 5.8: Reibungskoeffizient der faserverstärkten PVC-Folien

Die Prägung beider Oberflächenprofile hat unterschiedliche Einflüsse auf die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten der PVC-Folie. Der Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und der Rauheit der geprägten Folie ist in der Abb. 5.9 verdeutlicht. Trotz des Anstiegs der Rauheit ist beim Oberflächenprofil 1 eine Reduzierung bezüglich der STD 1,0 zu erkennen. Daraus resultierte wiederum eine deutliche Verbesserung des Stick-Slip-Verhaltens. Im Gegensatz dazu, die Aufbringung des Oberflächenprofils 2 verursachte einen kleinen Anstieg der Differenz ($\mu_S - \mu_D$) im Verhältnis zu der STD 1,0, wodurch der RPZ-Wert sich kaum änderte. Die Prägung der PVC-Folie impliziert eine Veränderung der Kontaktkräfte und der Kontaktvorgänge durch mechanische Verhakungen der Oberflächenspitzen. Diese haben sowohl beim Überwinden der Haftkräfte als auch bei der Aufrechterhaltung der Gleitbewegung einen Einfluss. Obwohl eine erhebliche Erhöhung der Rauheit durch die Prägung beider Oberflächenprofile erreicht wurde, resultierten daraus zwei

gegenläufige Tendenzen des Stick-Slip-Verhaltens. Diese sind möglicherweise auf die unterschiedlichen Deformationsverhalten der beiden geprägten Strukturen zurückzuführen.

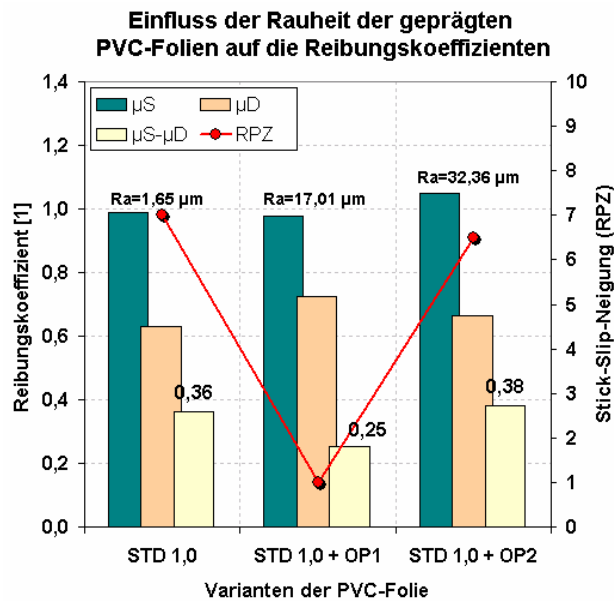


Abb. 5.9: Reibungskoeffizienten und Rauheit der geprägten Folien

Durch die Lackierung der STD 1,0 fand eine Modifizierung sowohl der chemischen als auch der mechanischen Eigenschaften der obersten Schichten statt. Dadurch kamen die geringsten Reibwerte unter allen PVC-Folien zustande. Trotz der vergleichbaren Werte der Differenz ($\mu_s - \mu_D$) wurde anhand der RPZ STD 1,0 + OL1, als stick-slip-frei, und STD 1,0 + OL2, als stick-slip-behaftet, klassifiziert. Es wird angenommen, dass entweder die chemische Zusammensetzung der Oberfläche oder der Anteil an festen Komponenten der beiden Lacke für diesen Unterschied verantwortlich ist.

5.1.3 SCHERDEFORMATION

Die folgende Abbildung umfasst die am Rheometer erhaltenen Messergebnisse der Scherdeformation aller Varianten der PVC-Folien. Daran ist zu erkennen, dass die unternommenen Modifizierungen und Behandlungen unterschiedliche Wirkungsweise zeigen. Die Werte der Scherdeformation wurden bei drei unterschiedlichen Werten der Schubspannung gemessen, nämlich 7000 Pa, 9000 Pa und 15000 Pa. Bei allen Schubspannungen verhält sich die Scherdeformation analog.

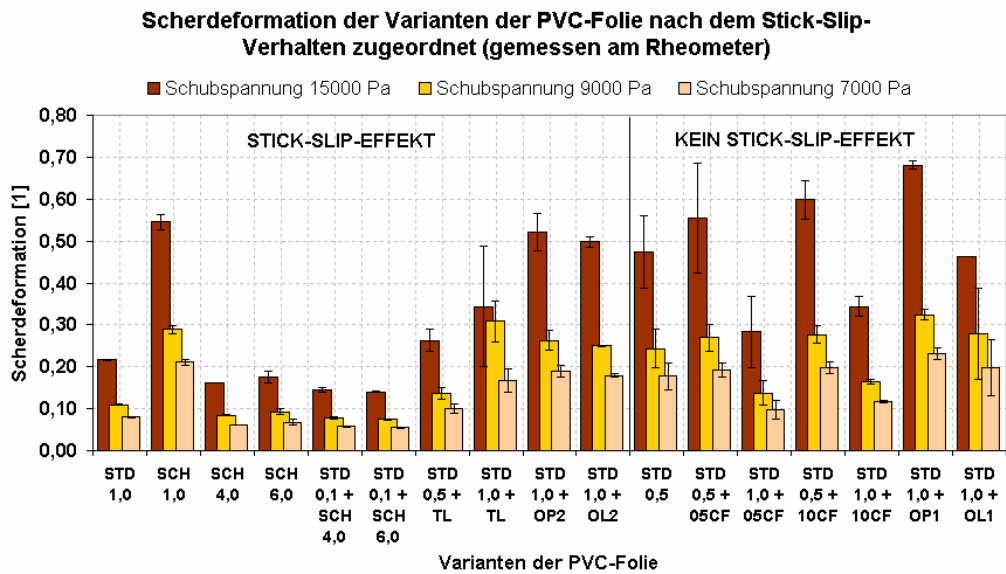


Abb. 5.10: Scherdeformation der PVC-Folien

Aufgrund stark schwankender Ergebnisse kann jedoch kein eindeutiger Bezug zum Stick-Slip-Effekt erstellt werden wie bei den Automobilledern zu verzeichnen ist (siehe Abb. 4.2 Seite 71). Aus der Abb. 5.10 ist allgemein zu entnehmen, dass die stick-slip-behafteten Varianten zu kleineren Scherdeformationen tendieren während bei den stick-slip-freien der gegenläufige Effekt stattfindet.

Offensichtlich sind zwischen Naturleder und den PVC-Folien erhebliche Unterschiede der Eigenschaften zu erwarten. Beide Materialien besitzen Strukturell, chemisch, physikalisch, etc. wesentliche Unterschiede. Naturleder besteht hauptsächlich aus Kollagenfaserbündel. Die Kollagenbündel sind durch andere Strukturproteine querverbunden und ergeben als Ganzes ein dichtes, dreidimensionales Netzwerk, das bei der Gerbung mit Gerbstoffen ausgefüllt und stabilisiert wird [Zun]. Bei einer Weich-PVC-Folie hingegen zeichnet sich die Struktur durch vom Weichmacher gequollene Agglomerate aus, wobei keinerlei Querverbindungen zwischen den Polymerketten vorhanden sind.

Bezugnehmend auf die Standardfolien kann aus dem Diagramm entnommen werden, dass die STD 0,5 ungefähr eine zweifache Scherdeformation im Vergleich zur STD 1,0 zeigte. Obwohl die STD 0,5 die Hälfte der Dicke besitzt, erlitten die Proben eine vergleichbare Verschiebung der Schichten. Hierbei zeigt sich, dass das Schergefälle bei den beiden Standardvarianten ungefähr gleich ist.

Es wird vermutet, dass die hohe Standardabweichung bei der 0,5 mm dicken Folie auf eventuelle Deformation bzw. Verschiebung der Klebschicht zurückzuführen ist. Je höher die Schubspannung desto höher ist die ermittelte Standardabweichung der Folie.

Als Resultat der Änderung der Struktur des Grundmaterials durch den Schäumungsprozess konnten ein deutlicher Unterschied der Scherdeformation im Vergleich zu STD 1,0 festgestellt werden. Bei dem Schaum mit gleicher Dicke, SCH 1,0, ist die Anzahl der Materialschichten gleich und der Scherwiderstand der Struktur aber wesentlich geringer als bei STD 1,0. Das erklärt die hohe Scherdeformation. Es besteht die Vermutung, dass die geschaffene Struktur ein steifes „Skelett“ der Folie durch das Strecken der Polymerketten bildete. Je dicker der Schaum, desto geringer sollte die Flexibilität dieser Struktur werden. Mit der Zunahme der Dicke auf 4,0 mm und 6,0 mm (SCH 4,0 und SCH 6,0) vervielfacht sich die Anzahl der Schaumschichten und dadurch sinkt die Scherdeformation stark ab. Das spricht für die Versteifung der Struktur. Die Abb. 5.11 a) und b) zeigen Rissen in den Schaumfolien, welche auf eine spröde Struktur hinweisen. Dadurch kann diese Vermutung bestätigt werden. Die Ergebnisse der breitenbezogenen Biegesteifigkeit im Abschnitt 5.1.5 bestätigen diese Tendenz.

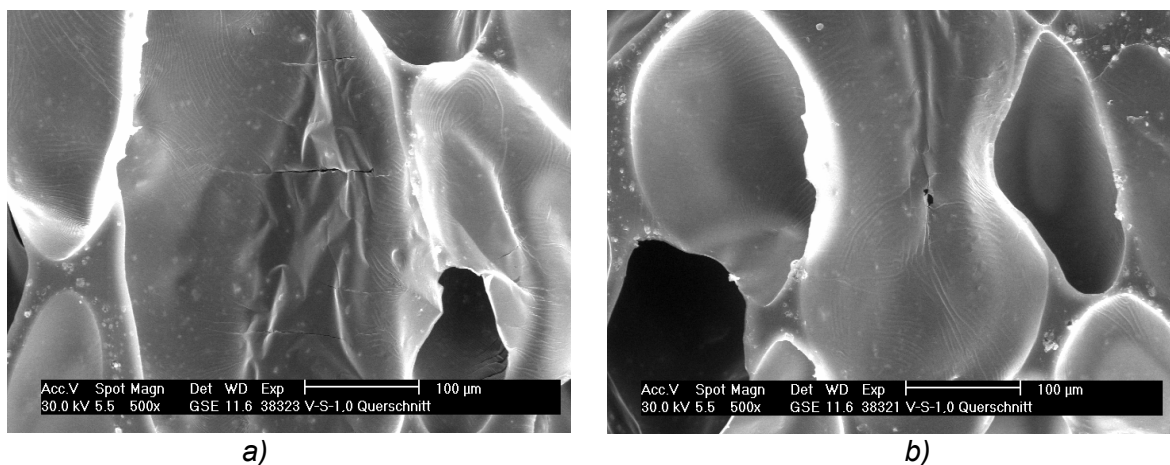


Abb. 5.11: REM-Aufnahmen der Schaumfolie

Bei den STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0 nahm die Scherdeformation im Vergleich zu den reinen Schäumen weiter ab. Darauf basierend kann vermutet werden, dass durch die zusätzliche kompakte 0,10 mm dicke Folie die Relativbewegung der Materialschichten beeinträchtigt wurde.

Die Abb. 5.10 zeigt weiterhin, dass STD 0,5 + TL im Vergleich zur reinen 0,5 mm PVC-Folie eine geringere Scherdeformation aufweist. Die mit dem Textil verstärkte PVC-Schicht ist

wahrscheinlich für diesen Unterschied verantwortlich. Diese Vermutung kommt durch die Betrachtung des Textilverbundes als eine mehrschichtige Struktur (siehe Abb. 5.2) zustande. In dem Bereich findet eine eindeutige Verstärkung der Folie durch die Textilfasern statt, welche wahrscheinlich für die Abnahme der Verschiebung zwischen den Schichten sorgt. Bei der dickeren Variante STD 1,0 + TL nahm die Scherdeformation hinsichtlich der reinen Standardfolie zu. Anscheinend spielen hierbei die flexibleren Schichten der reinen PVC-Folien und die freistehenden Textilfasern die größte Rolle.

Die Einlagerung der Kohlenstofffasern mit jeweils 0,05 Gw% (STD 0,5 + 05CF und STD 1,0 + 05CF) und 0,10 Gw% (STD 0,5 + 10CF und STD 1,0 + 10CF) Faseranteil verursachte bei der STD 0,5 und der STD 1,0 eine Erhöhung der Scherdeformation. Dieser Effekt ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Kohlenstofffasern neben einem geringfügigen Verstärkungseffekt die Beweglichkeit zwischen den Schichten fördern. Aufgrund der Orientierung der Kurzfasern und der Tatsache, dass kaum Benetzung zwischen Faser und Matrix vorhanden ist, kam diese Vermutung zustande.

Die Modifizierung der Oberflächeneigenschaften durch die Prägung und die Lackierung bewirkte ebenfalls eine allgemeine Erhöhung der Scherdeformation bei der STD 1,0. Die bei der Prägung der STD 1,0 entstandenen oberflächlichen Erhebungen sind relativ leicht verformbar. Während der rotierenden Bewegung des Platte-Platte-Messsystems sorgen diese Unebenheiten durch das Aneinanderverkeilen für den Anstieg der Kontaktkräfte. Die höheren Kontaktkräfte sind möglicherweise der Grund für sehr hohe Scherdeformationen der beiden geprägten Folien. Die deformierten Bereiche setzen sich aus dem Grundmaterial plus Oberflächenspitzen zusammen. Von der Gestalt und Größe der Unebenheiten ausgegangen sind höhere Kontaktflächen und -kräfte bei der STD 1,0 + OP1 als bei der STD 1,0 + OP2 zu erwarten (siehe Abb. 4.26 und Abb. 4.27). Es würde wiederum die höhere Scherdeformation der STD 1,0 + OP1 erklären. Die Abb. 5.12 zeigt die Werte der Rauheit und der Scherdeformation der geprägten Folie sowie der Variante STD 1,0.

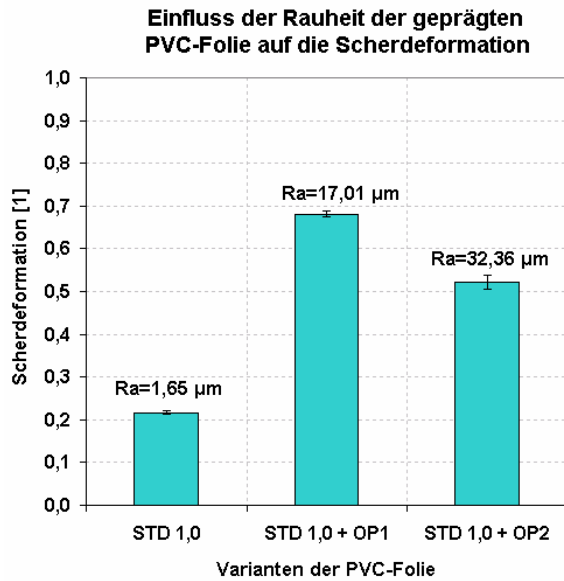


Abb. 5.12: Scherdeformation und Rauheit der geprägten Folie und der STD 1,0

5.1.4 KOMPRESSIBILITÄT UND DYNAMISCHE DEFORMATION

Die Abb. 5.13 zeigt die Ergebnisse der Kompressibilität und der dynamischen Verformung ermittelt an den PVC-Folien. Als Messwert wurde die Gesamtverformung (elastische und plastische Verformung) der Probe herangezogen. Allgemein ist die gleiche Tendenz bei beiden Varianten der Methode zu erkennen. Infolge der unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten (0,5 mm/s und 1,0 mm/s) findet bei der dynamischen Deformation eine kurzzeitige Übertragung der Kraft auf das Material statt. Die gleichzeitig ausgeübten Normal- und Scherbelastungen sorgen daher für niedrigere Verformungswerte.

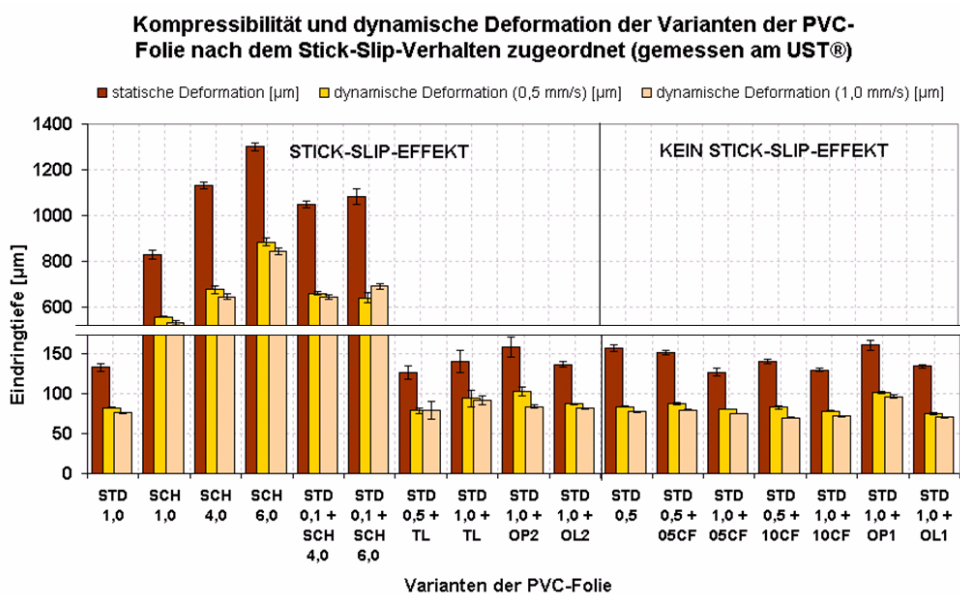


Abb. 5.13: Kompressibilität und dynamische Deformation

Auf der Abb. 5.13 ist allgemein kein Bezug zur Einteilung der PVC-Varianten nach deren Stick-Slip-Verhalten zu verzeichnen. Im Vergleich zu den Automobilledern zeigte die PVC-Folie eine gegenläufige Tendenz, indem die stick-slip-behafteten Varianten höhere und die stick-slip-freien geringere Deformationswerte zeigen (siehe Abb. 4.5 und Abb. 4.6 Seite 75). Es besteht auch hierbei die Notwendigkeit, zusätzliche Parameter einzubeziehen um einen schlüssige Zusammenhang zum Stick-Slip-Effekt erstellen zu können.

Trotz der Dickenunterschiede zwischen der STD 0,5 und der STD 1,0, ist in der Abb. 5.14 ersichtlich, dass die 0,5 mm dicke Variante eine etwas höhere Gesamteindringtiefe als die 1,0 mm dicke Folie zeigt. Unter der gleichen Normalbelastung leistet die dickere Folie möglicherweise einen höheren Widerstand zur Deformation, da doppelt so viele Materialschichten zusammengepresst werden müssen. Wenn beide Varianten um den gleichen Betrag deformiert werden, braucht die STD 1,0 folglich längere Zeit im Vergleich zu der STD 0,5,. Die folgende Abbildung illustriert diesen Effekt, welcher an der Neigung beider senkrechten Segmente der Kurven zu erkennen ist.

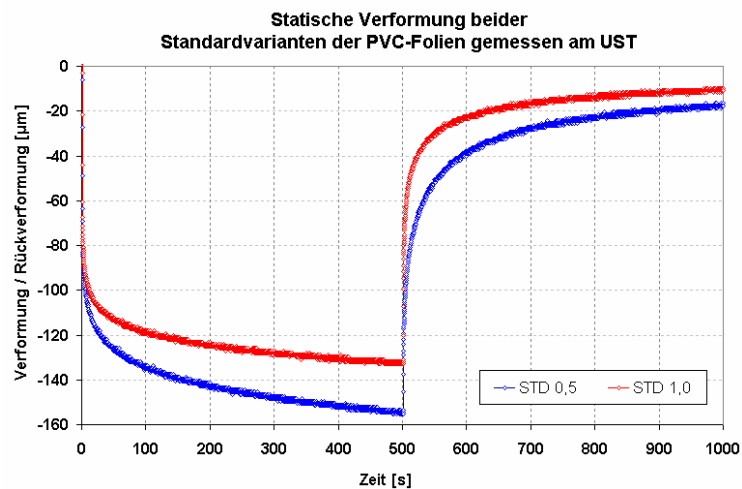


Abb. 5.14: Statisches Verformungsverhalten der STD 0,5 und STD 1,0

Durch den Vergleich zwischen der Standardfolie und dem Schaum (STD 1,0 und SCH 1,0) in der Abb. 5.13 ist den Einfluss der porösen Struktur auf die Gesamteindringtiefe des Tasters zu betrachten. Im Grunde genommen unterscheiden sich beide Varianten nur durch die Struktur des Grundmaterials, chemische Zusammensetzung und Dicke der Folien sind gleich. Zudem steigt das Verformungsvermögen bei SCH 4,0 und SCH 6,0 mit der Erhöhung der Dicke eindeutig an. Durch den Zusatz der 0,10 mm kompakten PVC-Folie (STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) wird die oberste Schicht unflexibler und der Widerstand

zum Eindringen des Tasters erhöht sich. Der Einfluss der Dicke der Folien wurde dadurch schwächer.

Basierend auf den Messungen am UST[®] bewirkte die Kaschierung gegenläufige Effekte in Bezug auf die Standardvarianten der PVC-Folie (STD 0,5 und STD 1,0). Bei der STD 0,5 + TL wurde eine Abnahme der Eindringtiefe des Tasters im Vergleich zu STD 0,5 festgestellt. Es ist zu vermuten, dass die mit dem Textil verstärkte PVC-Schicht für die geringere statische Deformation verantwortlich ist. Im Gegenteil dazu stieg bei der STD 1,0 + TL die Kompressibilität geringfügig an. Ein Effekt, der hauptsächlich mit der höheren Verformung der freien Textilfasern und des Anteils der nicht verstärkten Folie zusammenhängt.

Die Einlagerung von Kohlenstofffasern beeinflusste die Kompressibilität und die dynamische Deformation der Standardvarianten nur geringfügig. In der Abb. 5.15 a) ist bei der 0,5 mm dicken Folie mit 0,05 Gw% Faseranteil (STD 0,5 + 05CF) noch keine bedeutende Veränderung zu verzeichnen. Steigt der Faseranteil auf 0,10 Gw% (STD 0,5 + 10CF) an, nimmt die Eindringtiefe des Tasters im Vergleich zu der reinen Folie (STD 1,0) ab. Obwohl es sich hier um einen minimalen Effekt handelt, könnte bei der Folie mit 0,10 Gw% Faseranteil auf den in der Abb. 5.3 gezeigten Verstärkungseffekt beziehen. Die Abb. 5.15 b) zeigt, dass nur die Kompressibilität der 1,0 mm dicken Variante davon beeinflusst wurde. Sowohl bei 0,05 Gw% (STD 1,0 + 05CF) als auch bei 0,10 Gw% (STD 1,0 + 10CF) ist eine leichte Abnahme der Kompressibilität zu sehen. Der Effekt wird an den Werten der dynamischen Deformation nicht erfasst.

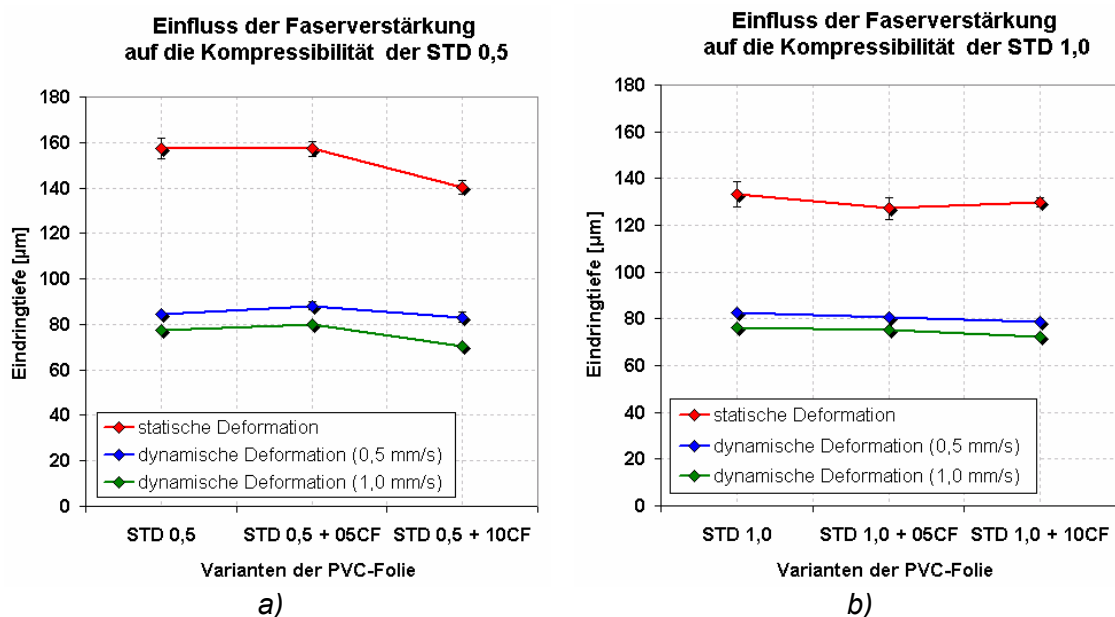


Abb. 5.15: Verformungsverhalten der faserverstärkten STD 0,5 und STD 1,0

Obwohl die Folien während der Prägung etwas kompakter wurden, ist es anzunehmen, dass die Verformung der aufgetragenen Rauheitsspitzen bzw. Unebenheiten eindeutig höher ist, als die der praktisch „flachen“ Standardfolie (STD 1,0). Die Deformation am UST[®], besonders beim dynamischen Messprinzip, ist stark davon abhängig, ob ein „Hügel“ oder ein „Tal“ der rauen Oberfläche mit dem Taster getroffen bzw. überfahren wird.

Allgemein konnte eine gleichmäßige Zunahme der Kompressibilität und der dynamischen Deformation durch die Prägung bei STD 1,0+ OP1 und STD 1,0+ OP2 im Vergleich zur STD 1,0 festgestellt werden. Die Abb. 5.16 illustriert diesen Effekt. Aufgrund der relativ hohen Geschwindigkeit von 1,0 m/s ergab sich bei den großflächigen Unebenheiten der STD 1,0 + OP2 eine geringere Eindringtiefe des Tasters.

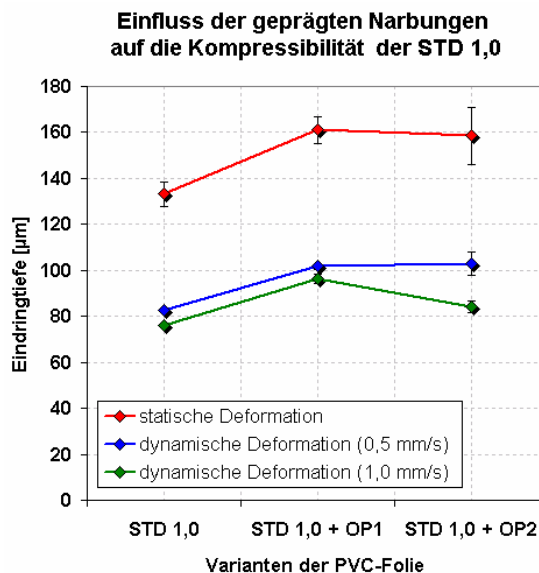
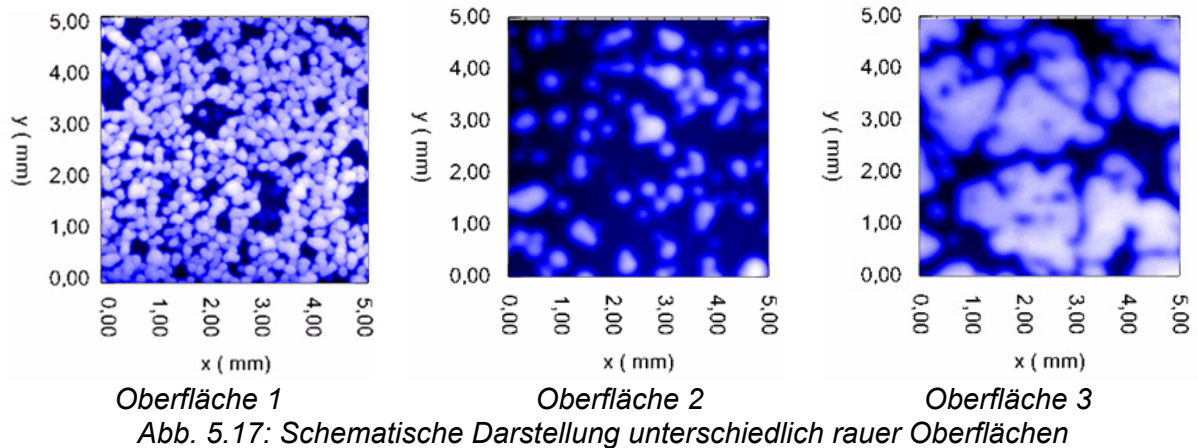


Abb. 5.16: Verformungsverhalten der geprägten STD 1,0

Die in Abb. 5.17 illustrierten Oberflächen 1, 2 und 3 geben annäherungsweise die drei Rauheitsstufen der untersuchten Folie wieder. Dabei ist die Kompressibilität der beiden rauen Oberflächen (2 und 3 in der Abb. 5.17) etwas höher als die der Standardfolie. Beim Ausüben einer Normalbelastung lassen sich zuerst die Unebenheiten und Spitzen ohne großen Widerstand zusammendrücken, während bei einer ebenen Fläche die gesamten Bereiche um den Belastungspunkt herum mitverformt werden müssen (Oberflächen 1 in der Abb. 5.17).



Bei den lackierten Varianten der PVC-Folie (STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2) wurde keine bedeutende Veränderung der Kompressibilität hinsichtlich der nicht lackierten Folien (STD 1,0) festgestellt. Durch die aufgetragene Dicke der Lackschichten, 20 µm beim Gleitlack und 10 µm beim Kunstlederlack, konnte kein zusätzlicher Widerstand zur punktuellen Normalbelastung des Tasters erzeugt werden. Weder ein direkter Einfluss der Lackeigenschaften noch eine chemische Einwirkung auf die Oberflächeneigenschaften konnte durch die Methode erfasst werden. Der kurzzeitige Kontakt zwischen dem Taster und den lackierten Oberflächen bei der dynamischen Deformation ist für den geringeren Effekt der Normalbelastung verantwortlich.

5.1.5 BREITENBEZOGENE BIEGESTEIFIGKEIT

Die Ergebnisse der Charakterisierung der PVC-Folie anhand der Biegesteifigkeit sind in der Abb. 5.18 zu sehen. Trotz der unidirektionalen Herstellungsmethode ist keine relevante Richtungsabhängigkeit zwischen den in der Längs- und Querrichtung ermittelten Ergebnissen zu verzeichnen. Der ausschlaggebende Einfluss der Folienstärke bzw. der inneren Struktur auf die Flexibilität der PVC-Bahnen ist eindeutig zu erkennen.

Die stick-slip-behafteten PVC-Varianten neigen teilweise zu höheren Werten der breitenbezogenen Biegesteifigkeit während die stick-slip-freien Varianten wesentlich geringere Werte zeigen. Hierbei zeigen die PVC-Folien die gleiche Tendenz, die bei den Automobilledern festgestellt wurde (siehe Abb. 4.7). Ebenso kann die Stick-Slip-Neigung der PVC-Folien nicht allein durch die Biegesteifigkeit erklärt werden.

Biegesteifigkeit der Varianten der PVC-Folie nach dem Stick-Slip-Verhalten zugeordnet (gemessen nach DIN 53 121)

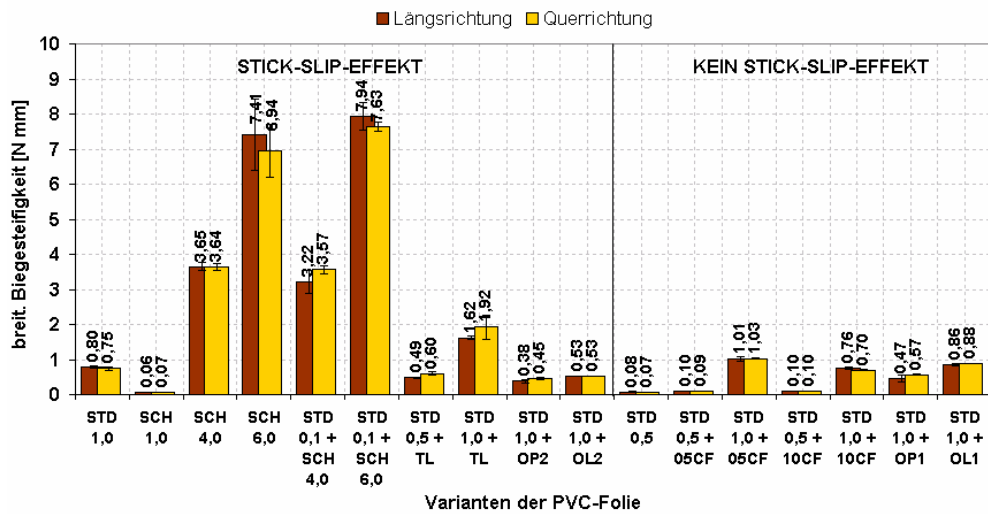


Abb. 5.18: Biegesteifigkeit der PVC-Folien

Beispielsweise wird aus dem Vergleich zwischen STD 1,0 und STD 0,5 die Einwirkung der Foliendicke auf die Flexibilität der PVC-Folie deutlich. Durch die Reduzierung der Dicke um die Hälfte fand eine starke Abnahme der breitenbezogenen Biegesteifigkeit statt. Ungefähr der gleiche Effekt konnte aus dem Vergleich des Schaums mit den gleichen Dicken (SCH 1,0) beobachtet werden. Eine starke Zunahme der breitenbezogenen Biegesteifigkeit resultierte aus der Erhöhung der Dicke der Schaumfolie auf 4,0 mm und 6,0 mm (SCH 4,0 und SCH 6,0). Die Ergebnisse bekräftigen die bereits geäußerte Vermutung, dass eine steife innere „Skelett“-Struktur durch die Schäumung entsteht. Bei STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0 ließ sich den gleichen Effekt feststellen. Der Zusatz der 0,10 mm dicken PVC-Schicht beeinflusste nur geringfügig die Steifigkeit im Vergleich zu der reinen Schäume (SCH 4,0 und SCH 6,0).

Die Herstellung der kaschierten PVC-Folien (STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL) beruht prinzipiell auf dem Konzept der Materialverbunde. Bei diesen Folien wird das Aneinandergleiten der Materialschichten während der Biegung durch das partielle Einbetten der Textilfasern in die PVC-Matrix verhindert. Diese Kombination verursachte eine eindeutige Verstärkung der Standardfolie und damit die Zunahme der Biegesteifigkeit. Daher zeigen beide Varianten entsprechend höherer breitenbezogenen Biegesteifigkeit als die reinen Standardfolie. Sowohl STD 0,5 + TL als auch STD 1,0 + TL wurden in die stick-slip-behaftete Gruppe eingeteilt.

Bei den 0,5 mm Folien ist eine geringfügige Zunahme der Biegesteifigkeit in beiden Stufen der Verstärkung mit Kohlenstofffaser (STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF) zu beobachten.

Bei den 1,0 mm dicken Varianten ist eine Verstärkung der Folie (STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF) nur bei 0,05 Gw% zu verzeichnen. Steigt die Konzentration der Kohlenstofffaser auf 0,10 Gw% weiter, sinkt die Biegesteifigkeit. Trotz der nachgewiesenen geringfügigen Haftung zwischen Faser und Matrix deuten die Ergebnisse darauf hin, dass bei einem 0,05 Gw% Faseranteil ein schwacher Verstärkungseffekt vorhanden ist, wodurch die Biegesteifigkeit leicht ansteigt. Bei 0,10 Gw% Faseranteil hingegen wird die relative Verschiebung der Materialschichten von losen Fasern bzw. Fasersegmenten begünstigt. Es ist besonders bei den dickeren Folien zu beobachten, deren periphere Schichten höheren Zug- und Druckkräfte ausgesetzt sind. Das Phänomen trat in der Längs- und Querrichtung in vergleichbaren Ausmaßen auf. Die detaillierten Ergebnisse sind in der Abb. 5.19 zu betrachten.

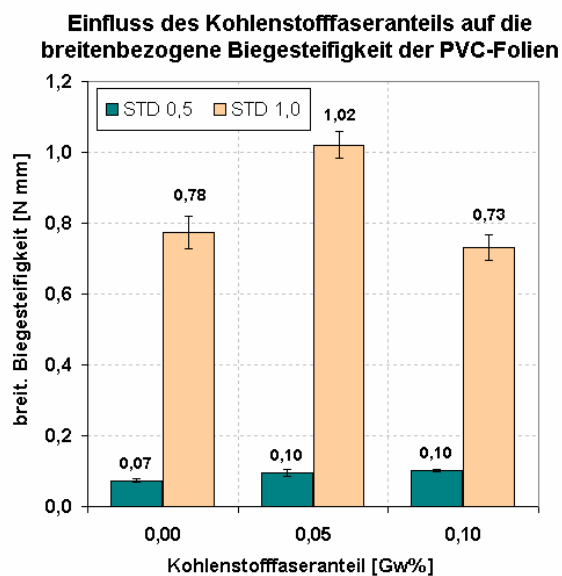


Abb. 5.19: Biegesteifigkeit der faserverstärkten PVC-Folien

An der Abb. 5.20 ist zu erkennen, dass die Rauheit der geprägten Folien (STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2) einen direkten Einfluss auf die Biegesteifigkeit nimmt. Wie bei den Lederproben im Abschnitt 4.1.7 bereits erwähnt wurde, kommt dieser Effekt möglicherweise dadurch zustande, dass die tiefsten Bereiche der geprägten Oberfläche (siehe Abb. 5.21), als Punkte geringeren Biege widerstandes wirken.

Einfluss der Rauheit auf die breitenbezogene Biegesteifigkeit der geprägten PVC-Folien

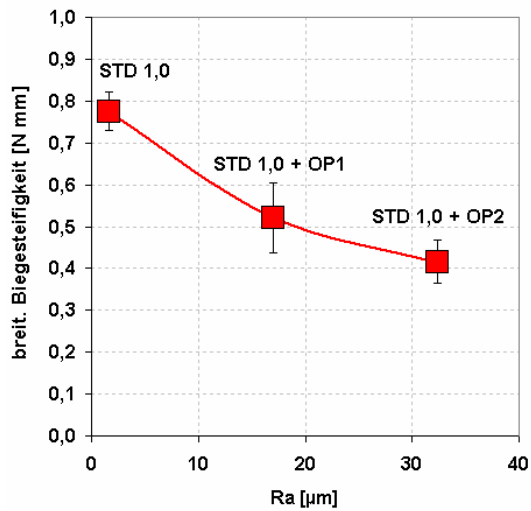


Abb. 5.20: Biegesteifigkeit der geprägten PVC-Folien

Bei der feineren Narbung (STD 1,0 + OP1), welche größere ebene Flächen aufweist (siehe Abb. 4.26 und Abb. 4.27 auf der Seite 96), verteilen sich die Biegekräfte einheitlicher auf der Oberfläche. Bei der gröberen Narbung (STD 1,0 + OP2) sind die Unebenheiten wesentlich größer und die Grenze zwischen höchsten und tiefsten Stellen stärker ausgeprägt. Dadurch findet eine ungünstigere Verteilung der Biegebelastungen an der Oberfläche statt. Die breitenbezogene Biegesteifigkeit nimmt daher bei den geprägten Folien im Vergleich zu der STD 1,0 eindeutig ab. Infolge der Profilcharakteristik ist der Effekt bei der STD 1,0 + OP2 besonders stark. Die Abb. 5.21 zeigt eine Strecke auf der Oberfläche einer geprägten Probe (OP2), welche eine Stelle geringeren Biege widerstandes schildern würde.

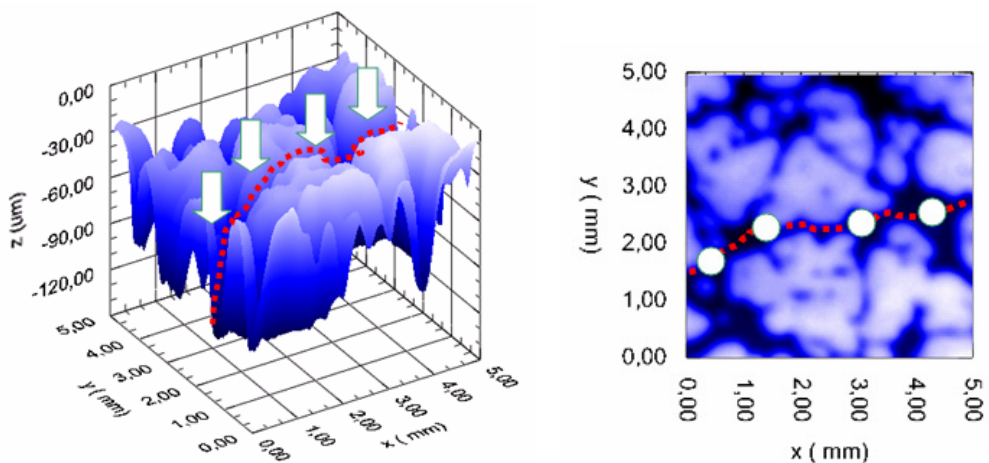


Abb. 5.21: Darstellung des Einflusses der Prägung auf die Biegesteifigkeit

Als Resultat der Lackierung der PVC-Folie wurden zwei gegenläufige Effekte beobachtet. Durch den Auftrag einer 20 μm dicken Schicht des Gleitlacks (STD 1,0 + OL1) nahm die

Biegesteifigkeit im Vergleich mit der nicht lackierten Folie zu. Im Gegensatz dazu resultierte aus der Applikation der 10 µm dicken Schicht des Kunstlederlacks (STD 1,0 + OL2) eine geringere Biegesteifigkeit als die der Standardfolie. Diese Auswirkung entspricht den Eigenschaften des Lackes, wobei der STD 1,0 + OL1 eine etwas unflexiblere Schicht als der STD 1,0 + OL2 zeigte. Es wird daher vermutet, dass die hohe Flexibilität und die auf PVC-Kunstleder abgestimmte Zusammensetzung des Lacks für diese Unterschiede verantwortlich sind.

5.1.6 RAUHEIT

Während der Herstellung sämtlicher Varianten der PVC-Folie wurde das gleiche Umkehrpapier angewendet. Abhängig von den Modifizierungen und Behandlungen der einzelnen Varianten, sind unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten während der Verarbeitung entstanden, die denen des Papiers nicht entsprechen. Unterschiedliche Oberflächenprofile wurden ebenfalls durch die Prägungen und Lackierungen erschaffen. Die Abb. 5.22 zeigt anhand des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) und der gemittelten Rautiefe (R_z) die Beurteilung der Rauheit der gesamten PVC-Folien.

Allgemein betrachtet konzentrieren sich die höchsten Rauheitswerte bei den stick-slip-behafteten PVC-Varianten. Bei den Automobilledern wurde jedoch das Gegenteil festgestellt, die höchsten Rauheitswerte wurden bei den stick-slip-freien Proben ermittelt (siehe Abb. 4.7 Seite 77). Ähnlich wie bei den bisher betrachteten Eigenschaften erlaubt die Rauheit allein keine ausschlaggebende Schlussfolgerung im Zusammenhang mit dem Stick-Slip-Effekt der PVC-Folie.

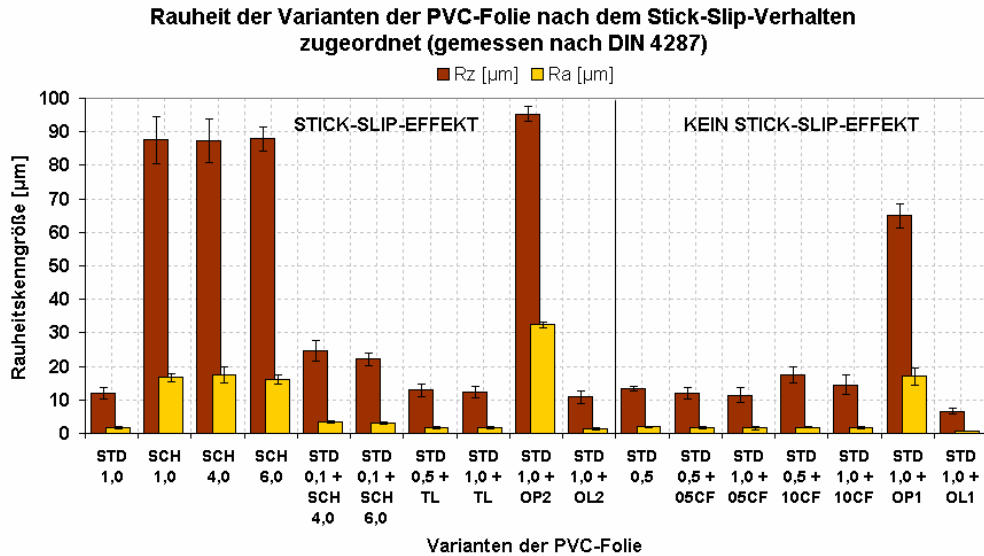


Abb. 5.22: Rauheit der PVC-Folien

Aus der Abb. 5.22 ist zu entnehmen, dass folgende Folienvarianten praktisch die gleichen Rauheiten, die des Umkehrpapiers, erhielten:

- STD 0,5 und STD 1,0,
- STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL und
- STD 0,5 + 05CF, STD 1,0 + 05CF, STD 0,5 + 10CF und STD 1,0 + 10CF

Bei den faserverstärkten Folien, ist an der STD 0,5 + 10CF Variante eine leichte Zunahme der Rauheit zu beobachten. Die einzelnen Kurzfasern riefen geringfügige Veränderungen an der Oberfläche hervor, welche dafür verantwortlich sind. Trotzdem liegen die Rauheitswerte in einem vergleichbaren Bereich mit den der sonstigen verstärkten Folie.

Bei den Schaum-Folie-Verbunden und den faserverstärkten Varianten wurden abweichende Rauheitswerte festgestellt. Bei der STD 0,1 + SCH 4,0 und der STD 0,1 + SCH 6,0 wurde die Rauheit der obersten 0,10 mm dicke PVC-Folie durch den Schäumungsprozess der untersten Schicht beeinflusst. Bei den reinen Schäumen resultierte daraus eine neue und rauere Oberflächenstruktur. Die Steigung der Rauheit in der Reihenfolge Standardfolie, Standardfolie + Schaum, reiner Schaum, ist eindeutig.

Wie im Abschnitt 4.2.6 beschrieben, wurde die Oberfläche der Standardfolien mit den Spezialnarbungen (STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2) versehen, um den Auftritt des Stick-Slip-Effekts zu minimieren. Im Vergleich zu der Standardfolie ist die Rauheit beider Strukturen erheblich höher. Im Gegensatz dazu wurden bei den lackierten Varianten (STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2) die geringsten Rauheitswerte gemessen. Diese

Ergebnisse resultieren daraus, dass bei der Lackierung die tieferen Bereiche der Oberfläche vom Lack aufgefüllt und dadurch die oberste Schicht geglättet wurde.

5.1.7 OBERFLÄCHENSPIGUNG

Durch die Entfernung der eventuell vorhandenen abgesetzten Schmutz- bzw. Adhäsionsschichten mit Filterpapier wurde ein vergleichbarer energetischer Zustand an der Oberfläche der PVC-Folien erzeugt. Aufgrund dieser Behandlung sind die ermittelten Werte der Oberflächenspannung der Mehrheit der PVC-Varianten ungefähr gleich und entsprechen den in der Literatur [Ehr 2003] vorhandenen Werten für PVC. In der Abb. 5.23 ist zu verzeichnen, dass bis auf die Schaum-Folie-Verbunde und die lackierten Folien die oben genannte Aussage zutrifft.

Bezogen auf die Stick-Slip-Neigung der PVC-Folie sind die ermittelten Werte der Oberflächenspannung für die gesamte Betrachtung wenig schlüssig. Bezogen auf polare und dispersive Anteile der Oberflächenspannung ist eine aussagekräftige Unterscheidung der beiden Gruppe nicht möglich. Im Vergleich dazu, wurden bei den Automobilledern durchschnittlich geringere Werte sowohl des polaren als auch des dispersiven Anteils der Oberflächenspannung gemessen (siehe Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4).

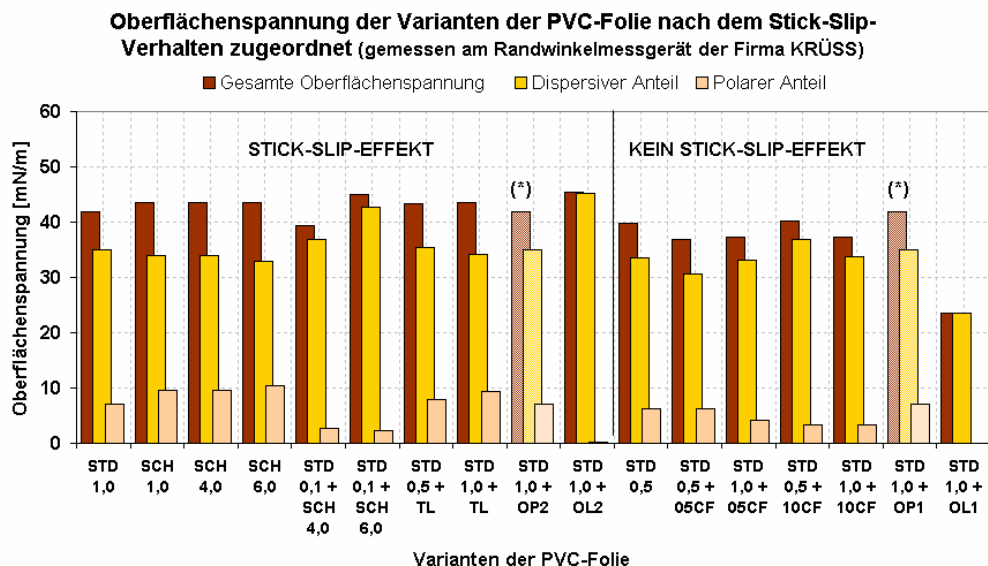


Abb. 5.23: Oberflächenspannung der PVC-Folien

Da die oberste Schicht der Schaum-Folien-Verbunde (STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) aus einer Standardfolie besteht, sind die gleichen Werte der polaren und dispersiven Energieanteile für beide Varianten zu erwarten. Die ermittelten Werte zeigen

jedoch einen Unterschied der Oberflächenspannung zwischen den beiden PVC-Varianten. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich an der Rauheit der obersten Schicht, welche vom Schäumungsprozess verändert wurde und die Bildung der Randwinkel beeinflusste.

Basierend auf der Messung der Oberflächenspannung konnten Veränderungen an der Oberfläche bestätigt werden, welche durch die Einlagerung der Kohlenstofffaser hervorgerufen wurden. An manchen Stellen erschwerten eventuell vorhandenen Fasern oder Fasersegmente die Ermittlung des Randwinkels. Obwohl die Kohlenstofffasern unpolar (hydrophob) sind, fand dabei das sofortige Spreiten der polaren Messflüssigkeit statt. Trotzdem ist es gelungen, die Werte der Oberflächenspannung zu messen, welche ungefähr denen der Standardfolie entsprechen.

Die starken oberflächlichen Unregelmäßigkeiten der geprägten Folien verhindern die korrekte Messung beider energetischen Anteile, daher wurden die Werte der nicht geprägten Standardfolie angenommen. Die Messergebnisse sind in der Abb. 5.23 durch die (*) zu erkennen.

Wie bei den vorherigen Analysen stellt sich aus dem gesamten Bild heraus, dass die Oberflächenspannung allein kein relevanter bzw. ausreichender Parameter ist, um den Stick-Slip-Effekt zu charakterisieren. Die Analyse dieses Phänomens soll eine Betrachtung sämtlicher Einflussfaktoren einschließen damit ausschlaggebende Aussagen gemacht und folglich die aufgestellte Hypothese bestätigt werden können.

5.1.8 ERSTELLUNG MATHEMATISCH FORMULIERBARER KORRELATIONEN

Scherdeformation, Kompressibilität, Reibungskoeffizient, breitenbezogene Biegesteifigkeit, Rauheit und Oberflächenspannung von allen 17 Varianten der selbst gefertigten PVC-Folie wurden ermittelt. Mit Ausnahme der Oberflächenspannung konnte, wenn auch mit hoher Unsicherheit behaftet, eine oftmals nur schwach ausgeprägte Korrelation zum Stick-Slip-Verhalten für die restlichen Variablen erkannt werden. Anhand der einzelnen Variablen allein ist es jedoch nicht möglich einen zufriedenstellenden Zusammenhang zum Stick-Slip-Verhalten zu erstellen. Sie sollten daher in einen Faktor mittels mathematischer Methode kombiniert werden.

Eine Zusammenstellung der gesamten Einflussfaktoren fand durch einen geometrischen Mittelwert statt, da anstelle einer physikalisch unsinnigen Summe (arithmetischer Mittelwert)

das Produkt dieser Variablen interpretierbar ist. Dafür müssen die folgenden ermittelten Relationen in Betracht gezogen werden:

$$SSN \propto \frac{1}{\gamma}, SSN \propto d, SSN \propto R_a, SSN \propto S \text{ und } SSN \propto (\mu_S - \mu_D) \quad \text{Formel 5.1}$$

Dabei steht SSN für Stick-Slip-Neigung. Die weiteren Symbole werden unten erklärt.

γ : Scherdeformation [1]

d : Kompressibilität [μm]

R_a : Rauheit [μm]

S : breitenbezogene Biegesteifigkeit [N mm]

$(\mu_S - \mu_D)$: Differenz zwischen Haft- und Gleitreibungskoeffizienten [1]

Um die Werte zu einer mit der Skalierung der RPZ vergleichbaren Größenordnung zu bringen wurde das gesamte Produkt (Formel 5.1) durch 10 geteilt und der natürliche Logarithmus daraus genommen, so dass die Formel 5.2 sich ergibt.

$$F_{SSE} = \ln \left[\frac{d_{[\mu\text{m}]} \cdot R_{a[\mu\text{m}]} \cdot S_{[\text{N}\cdot\text{mm}]} \cdot (\mu_S - \mu_D)_{[1]}}{10 \cdot \gamma_{[1]}} \right] \quad \text{Formel 5.2}$$

Näher betrachtet weist die abgeleitete Gleichung (Formel 5.2) auf logische bzw. durch die Literatur bekannte Zusammenhänge hin. Die direkte Proportionalität des *Stick-Slip-Faktors* (*SSE-Faktor*) zur Kompressibilität (d) kann dadurch erklärt werden, dass das Anpassen bzw. Eindringen der Profile beider kontaktierenden Oberflächen aneinander begünstigt wird. Die hohe Kompressibilität impliziert wiederum die Erhöhung der Kontaktfläche und der damit verbundenen Adhäsionskräften. Aus der Formel 5.2 ist ebenfalls zu entnehmen, dass bei rauerer Oberflächen (R_a) logischerweise die Wahrscheinlichkeit des Auftretens vom Stick-Slip-Effekt höher ist. Der Einfluss des nacheinander stattfindenden Aufeinandersteigens, Verhakens und Loslassens der Rauheitsspitzen auf das Stick-Slip-Verhalten von Bauteilen ist längst in der Literatur bekannt [Erh 1980] [Wei 1989] und wird durch die auf die Oberflächentopographie bezogenen Stick-Slip-Modelle repräsentiert (siehe Abschnitt 2.6.1, Seite 40).

Die breitenbezogene Biegesteifigkeit (S) drückt den Widerstand zur Biegung bzw. das Formänderungsvermögen eines Bauteils aus und ist laut Formel 5.2 direkt proportional zur

Stick-Slip-Neigung der PVC-Folie. Je geringer die Flexibilität der Folie, desto höher der Stick-Slip-Faktor. Zu einer besseren Interpretation dieses Zusammenhangs müssen die Kompressibilität (d) und Rauheit (R_a) miteinbezogen werden. Bei sehr hoher breitenbezogener Beigesteifigkeit ist sowohl die Oberfläche als auch das innere Material unflexibler. Obwohl mit einer geringeren Anzahl von Kontaktstellen gerechnet werden muss, kommt der Einfluss der Rauheitsspitzen und die Bildung von relativ großen Wülsten dadurch stärker zur Geltung. Dabei ist mit einem bemerkbaren Abwechseln zwischen Haft- und Gleitphase zu rechnen. Im Gegensatz dazu, besitzt das Material eine hohe Flexibilität, werden die in punktuellen Bereichen stattfindende Deformation erhöht und die Nachgiebigkeit der Rauheitsspitzen trotz der zu erwartenden höheren Kontaktfläche begünstigt.

Ebenso wichtig ist das Einbeziehen der Differenz zwischen beiden Reibungskoeffizienten ($\mu_s - \mu_D$) an den abgeleiteten Stick-Slip-Faktor. Dieser Zusammenhang ist aus der Literatur bekannt und wird im Abschnitt 2.6.1 in Details behandelt.

Die geringere Scherdeformation (γ) bei den stick-slip-behafteten PVC-Varianten spricht für die Entstehung von hohen Haftkräften, die beim Übergehen in die Gleitphase sprunghaft abgegeben werden. Umgekehrt, bei den stick-slip-freien PVC-Varianten charakterisiert die höhere Scherdeformation ein allmähliches Übergehen von der Haft- in die Gleitphase, wobei Teil der gespeicherten Energie, beispielweise, beim Relaxieren des Materials abgegeben wird. Diese Überlegung kann aus der Abb. 5.28 entnommen werden und erklärt die Rolle der Scherdeformation bei der Berechnung des Stick-Slip-Faktors.

Die Tabelle 5.1 zeigt den durch die Formel 5.2 berechneten Stick-Slip-Faktor der gesamten PVC-Folien. Das Diagramm dazu ist in der Abb. 5.24 zu betrachten.

Variante der PVC-Folie	SSE (RPZ)	Scher deformation [1]	Kompressibilität [μm]	Biege steifigkeit [N mm]	Rauheit [μm]	$\mu_s - \mu_0$ [1]	SSE-FAKTOR
STD 0,5	2,0	0,473	157,4	0,07	1,96	0,31	0,4
STD 1,0	7,0	0,217	133,2	0,78	1,65	0,33	3,3
SCH 1,0	7,0	0,545	828,5	0,06	16,74	0,36	4,1
SCH 4,0	6,5	0,162	1131,1	3,65	17,33	0,51	10,0
SCH 6,0	6,0	0,177	1301,2	7,17	16,16	0,30	10,1
STD 0,1 + SCH 4,0	6,5	0,145	1047,7	3,39	3,38	0,29	7,8
STD 0,1 + SCH 6,0	6,0	0,141	1083,6	7,78	3,13	0,40	8,9
STD 0,5 + TL	8,0	0,263	126,8	0,55	1,75	0,34	2,7
STD 1,0 + TL	8,0	0,344	140,8	1,77	1,74	0,30	3,6
STD 0,5 + 05CF	4,0	0,554	151,9	0,10	1,66	0,41	0,6
STD 1,0 + 05CF	4,0	0,284	127,1	1,02	1,54	0,50	3,6
STD 0,5 + 10CF	3,0	0,598	140,4	0,10	1,87	0,25	0,1
STD 1,0 + 10CF	4,5	0,344	129,9	0,73	1,77	0,38	2,9
STD 1,0 + OP1	1,5	0,682	161,1	0,52	17,01	0,18	3,7
STD 1,0 + OP2	6,5	0,521	158,6	0,42	32,36	0,37	5,0
STD 1,0 + OL1	1,5	0,462	135,0	0,87	0,69	0,23	1,4
STD 1,0 + OL2	8,0	0,498	136,9	0,53	1,47	0,40	2,1

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Berechnung des Stick-Slip-Faktors

Obwohl die Messwerte sich im Bereich zwischen 2,1 und 3,7 überschneiden besteht eine eindeutige Tendenz dazu, dass die stick-slip-behafteten PVC-Varianten einen wesentlich höheren SSE-Faktor als die stick-slip-freien besitzen. Basierend auf den Ergebnissen stellen die d , R_a , S , und γ entscheidende Einflussparameter bei der Analyse des Stick-Slip-Verhaltens der PVC-Folien zusammen. Außerdem, ermöglicht die Kombination dieser Deformations- und Oberflächenmessgrößen Vorhersage über die Stick-Slip-Neigung mit einer zufriedenstellenden Sicherheit.

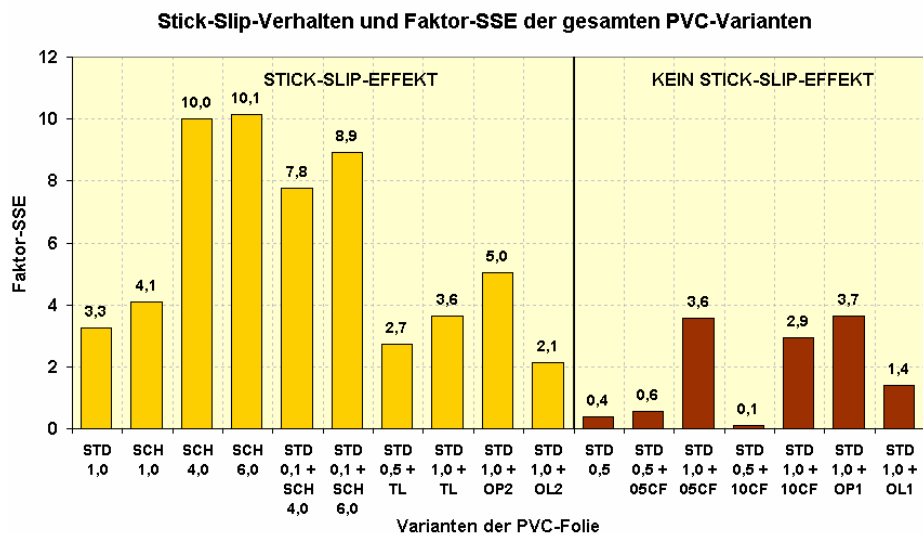


Abb. 5.24: Berechneter SSE-Faktor der gesamten PVC-Folien

Die folgende Abbildung illustriert den direkten Zusammenhang zwischen Stick-Slip-Neigung und SSE-Faktor. Daran ist eine hohe Streuung der Resultate um die ideal eingefügte Trendlinie erkennbar. Das weist darauf hin, dass offensichtlich noch nicht alle Einflussnehmenden Parameter in die Berechnung des SSE-Faktors einbezogen wurden oder die einzelnen Faktoren mit unterschiedlicher Wichtung einbezogen werden sollten, da zwischen einzelnen Größen Abhängigkeiten bestehen können.

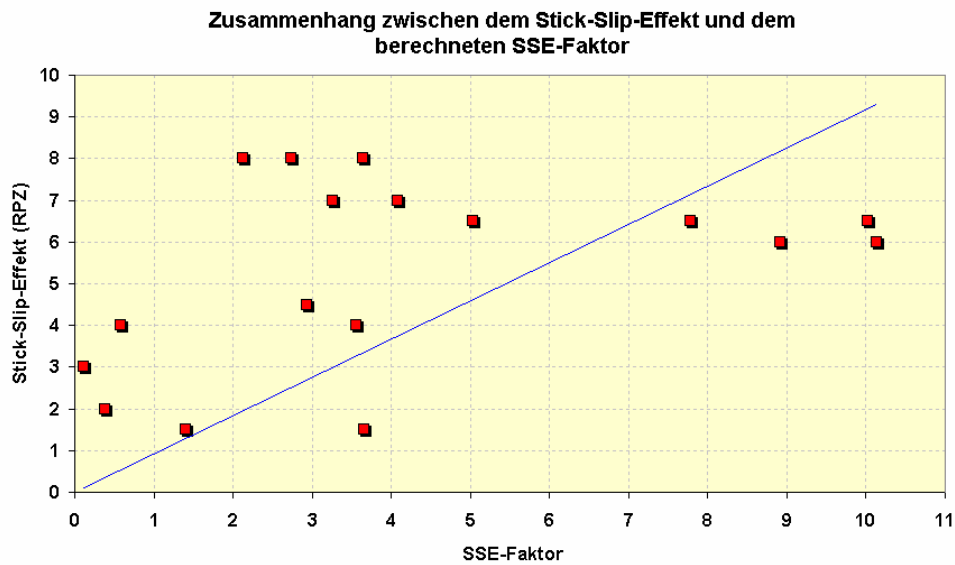


Abb. 5.25: Zusammenhang zwischen dem SSE-Faktor und der RPZ

5.2 EIGENSCHAFTSBEZOGENE ANALYSE DES STICK-SLIP-EFFEKTES DER PVC-FOLIEN

Im vorherigen Abschnitt stellte sich heraus, dass die strukturellen bzw. oberflächlichen Merkmale der PVC-Folie durch die Berechnung eines geometrischen Mittelwerts in Bezug zur Stick-Slip-Neigung der PVC-Folie gebracht werden konnte. Die einzelnen Einflussparameter allein waren ungenügend um dieser Art Querverbindung herzustellen, aus diesem Grund wurde die Zusammenstellung mehrerer Einflussgrößen nötig um den Zusammenhang zu ermöglichen.

Zusätzlich wird in diesem Abschnitt eine eigenschaftsbezogenen Analyse der Stick-Slip-Verhaltens der PVC-Bahnen nach drei unterschiedlichen Betrachtungsweisen durchgeführt (siehe Organigramm in Abb. 4.12). Die erste Betrachtungsweise schließt die Varianten ein, welche vergleichbare Oberflächeneigenschaften, d. h. Oberflächenspannung und Rauheit, haben. Das Entstehungspotential von oberflächlichen Wechselwirkungen wie z. B. Verkeilung der Rauheitsspitzen und Adhäsionskräfte liegen bei diesen Varianten in einem vergleichbaren Bereich. Dadurch kann der Einfluss des Aufbaus des Grundmaterials auf das Stick-Slip-Verhalten beurteilt werden. Nach der zweiten Betrachtungsweise werden die Varianten mit dem gleichen Grundmaterial und verschiedenartiger Oberfläche ausgewählt. Hierbei handelt es sich um die geprägten und lackierten PVC-Varianten. Der Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf das Stick-Slip-Verhalten bezogen auf die STD 1,0 kann ebenso erörtert werden. Die dritte Betrachtungsweise umfasst die Variante, den Modifizierungen sowohl des Grundmaterials als auch der Oberfläche unterzogen wurden. Hierbei handelt es sich um die geschäumten PVC-Varianten.

Zusätzlich zur Beurteilung der Stick-Slip-Neigung anhand der RPZ und der Differenz ($\mu_S - \mu_D$) wurde der Einfluss folgender Material- und Oberflächeneigenschaften herangezogenen:

- die statische Deformation,
- die Scherdeformation bei der Schubspannung von 15 kPa,
- die breitenbezogene Biegesteifigkeit
- die Rauheit
- und der polare Anteil der Oberflächenspannung.

Die ermittelten Eigenschaften wurden auf die gleiche Skalenteilung umgerechnet, 0 bis 100 %, und in Netzdiagrammen dargestellt. Dabei bezieht sich der höchste ermittelte Wert der entsprechenden Eigenschaft auf 100 % in der angegebenen Skala. Auf der oberen zentralen Achse ist die Stick-Slip-Neigung der PVC-Varianten zu sehen. Auf der rechten Seite des Netzes sind die Deformations- und auf der linken Seite die Oberflächenmerkmale dargestellt.

Bei allen geschäumten Varianten wurden erheblich hohe Werte der Kompressibilität und der breitenbezogenen Beigesteifigkeit ermittelt. Die Schäume stehen daher im obersten und die restlichen PVC-Varianten in den niedrigsten Bereich der entsprechenden Achsen. Dadurch scheinen aussagekräftige Unterschiede bei den weiteren PVC-Varianten in den Netzdiagrammen geringfügig zu sein. Diese Unterschiede können an den einzelnen Darstellungen des Verformungsverhaltens eindeutiger betrachtet werden.

5.2.1 BETRACHTUNG DES EINFLUSSES DES DEFORMATIONSVERHALTENS BEI GLEICHEN OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN

Das Organigramm in der Abb. 5.26 zeigt die PVC-Folie mit den vergleichbaren Werten der Oberflächenspannung und der Rauheit. Zur geplanten Analyse wird das gesamte Eigenschaftsspektrum auf die Standardvarianten (STD 0,5 und STD 1,0) bezogen und in Zusammenhang mit deren Stick-Slip-Neigung gesetzt.

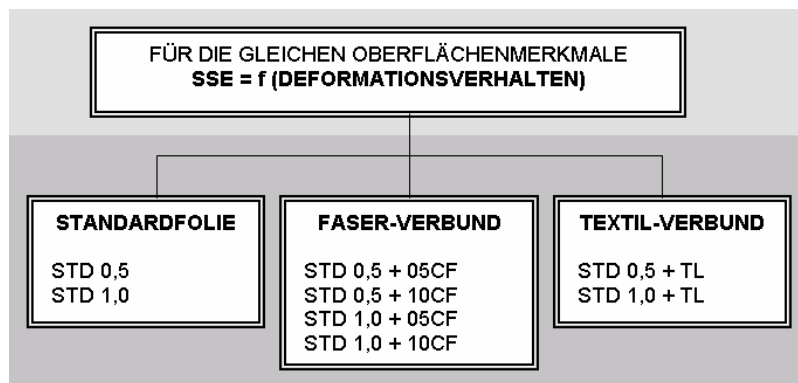


Abb. 5.26: Varianten der PVC-Folien mit gleichen Oberflächenmerkmalen

5.2.1.1 STANDARDFOLIE (STD 0,5 UND STD 1,0)

Die Abb. 5.27 zeigt, dass eine Standard PVC-Folie mit 1,0 mm Dicke eine Stick-Slip-Neigung von 70 % (hoch) zeigt, während bei der gleichen Folie mit einer 0,5 mm Dicke eine Neigung von 20 % (niedrig) am Stick-Slip-Prüfstand gemessen wird.

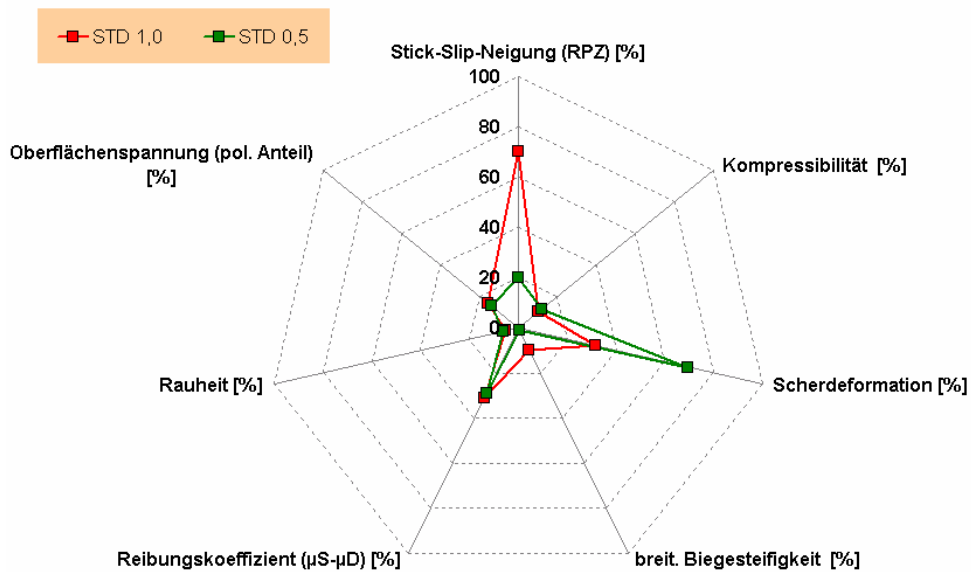


Abb. 5.27: Eigenschaftsprofil von STD 0,5 und STD 1,0

Die Variante STD 0,5 zeigt aufgrund der geringeren Dicke ein allgemein höheres Deformationsvermögen als die Variante STD 1,0. Dies kann aus den höheren Werten der Deformation der STD 0,5 bei der Kompressibilität, Scherdeformation und breitenbezogener Biegesteifigkeit in der Abb. 5.27 entnommen werden.

An den Abb. 5.28 a) und b) ist das Verformungsverhalten von beiden Standardvarianten zu sehen. Daran ist zu erkennen, dass die STD 0,5 sowohl eine höhere Retardation als auch Rückstellung UST[®] zeigt.

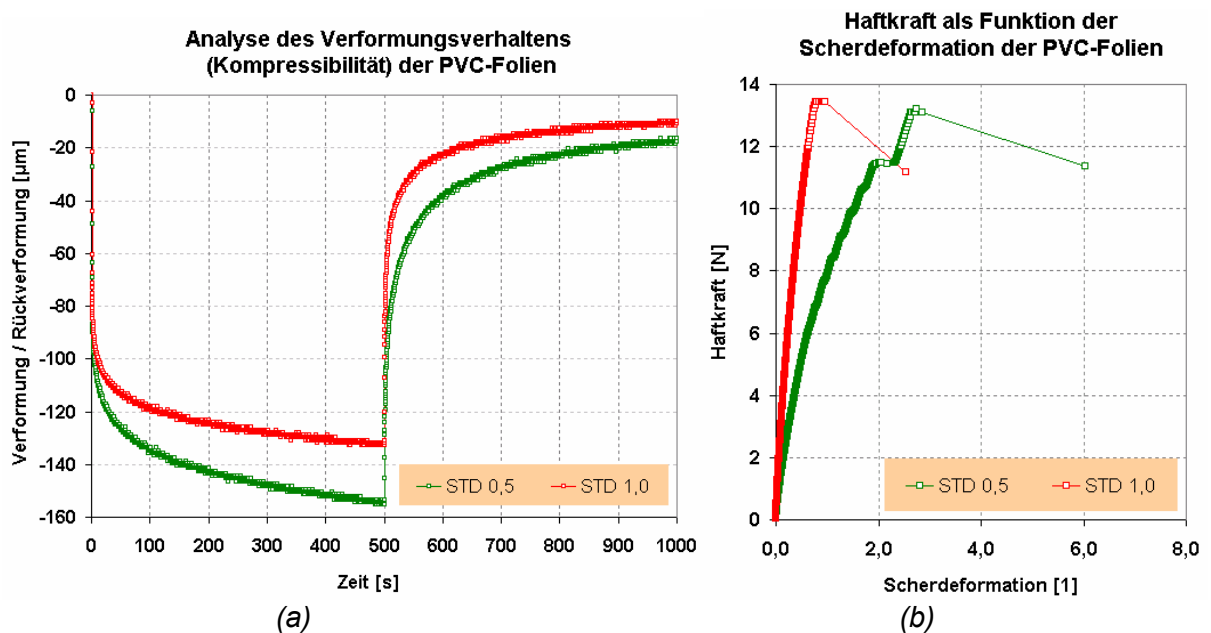


Abb. 5.28: Verformungs-(a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5 und STD 1,0

Bei der Be- bzw. Entlastung mit der gleichen Dauer ergibt sich bei der Variante der STD 0,5 eine schnellere und stärkere Veränderung ihres Volumen als bei der STD 1,0, unabhängig davon. Dieser Effekt konnte bei Normal-, Scher- und Biegebelastung festgestellt werden. Daraus lassen sich folgenden Modelle erstellen, die die Stick-Slip-Neigung der beiden Varianten erklären könnten:

- a) Durch das relativ hohe Verformungsvermögen der STD 0,5, d. h. hohe Kompressibilität, Scherung und Flexibilität, sind Verformungen in geringen Bereichen auf der gesamten Oberfläche zu erwarten. Diese Verformungen zeichnen sich durch das kurzfristige Abreißen, die Verschiebung und Neubildung winziger Kontaktstellen aus und erlauben ein allmähliches Übergehen von der Haft- in die Gleitphase. Daraus würde eine kontinuierliche Relativbewegung der Reibpartner resultieren, bei der die große Anzahl der Kontaktstellen einen relativ hohen Widerstand zur Bewegung hervorrufen würde. Die Entwicklung von einer stick-slip-bedingten Bewegung wäre daher von geringer Wahrscheinlichkeit.
- b) Im Gegensatz dazu, wären bei einem geringeren Verformungsvermögen dieser Art punktuelle Deformationen nicht möglich. Die langfristige Verschiebung größerer Kontaktbereiche der gesamten Oberfläche sorgt wahrscheinlich für eine ruckartige Relativbewegung. Höhere Haftkräfte würden in der Ruhelage entstehen. Beim Eintreten einer Gleitphase würden die Kontaktkräfte durch das sofortige Loslassen der Kontaktstellen hingegen stark abnehmen. Dies würde die hohe Stick-Slip-Neigung der STD 1,0 erklären.

Die Verläufe der Reibungskurven (Abb. 5.28 b), ermittelt am Rheometer, bestätigen die vorherige Überlegung. Am Verlauf der STD 0,5 ist ein allmählicher Übergang der Haft- in die Gleitphase nach einem schwach ausgeprägten Stick-Slip-Effekt zu sehen. Bei der Variante STD 1,0 findet hingegen ein steiler Anstieg der Haftkraft und ein plötzlicher Übergang in die Gleitphase statt. Dabei nimmt die Reibkraft beim Übergehen in die Gleitphase wesentlich stärker als bei der STD 0,5 ab.

Die Ermittlung der Reib- und Verformungseigenschaften der Standardvariante der PVC-Folie deutet darauf hin, dass das gesamte Verformungsvermögen, d. h. Kompressibilität, Scherdeformation und breitenbezogenen Biegesteifigkeit, eine ausschlaggebende Rolle bei deren Stick-Slip-Neigung spielt. Der Dickenunterschied zwischen beiden Standardvarianten

rief zwei gegenläufige Verhaltensweise hervor, die als Basis für die Analyse der restlichen PVC-Varianten als Referenz angewendet werden.

5.2.1.2 STANDARDFOLIE UND FASERVERSTÄRKTE FOLIE I (STD 0,5 + 05CF UND STD 0,5 + 10CF)

An der Abb. 5.29 ist zu erkennen, dass das Eigenschaftsprofil der mit Kohlenstofffasern verstärkten Folien (STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF) sich zwischen den der Standardvarianten (STD 0,5 und STD 1,0) befindet. Die verstärkten Varianten sind mit 40 % und 30 % unterhalb der kritischen Risikoprioritätszahl.

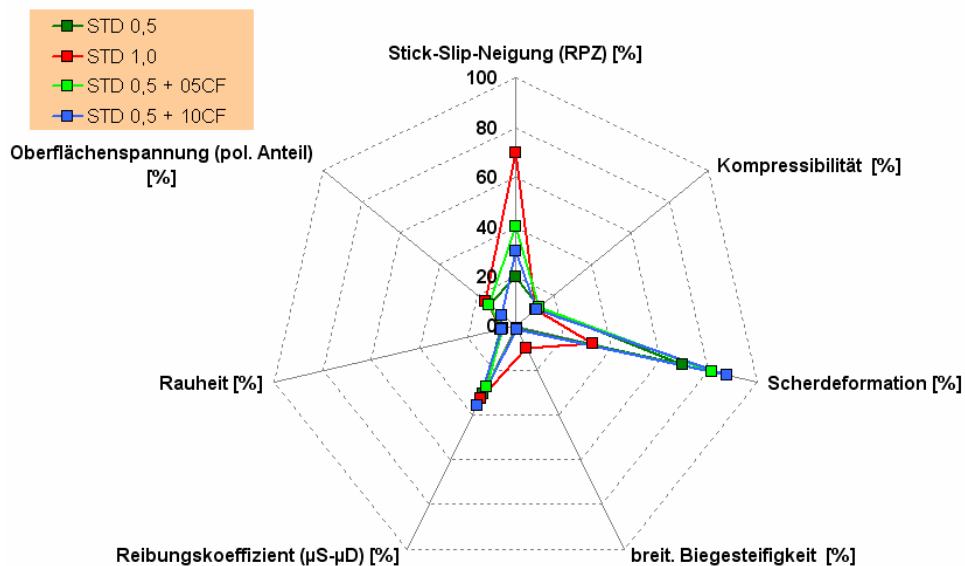


Abb. 5.29: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF

Durch die Einlagerung der Kohlenstofffasern fand eine eindeutige Erhöhung der Scherdeformation bezüglich der reinen STD 0,5 statt. Je höher der Faseranteil desto höher die Scherdeformation. Die Werte der Kompressibilität und der breitenbezogenen Biegesteifigkeit nähern sich den der reinen STD 0,5 an.

Aus der Abb. 5.30 a) und b) sind bei den Varianten STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF ähnliche Verformungseigenschaften und Retardation bzw. Rückstellung des Folienvolumen wie bei der STD 0,5 zu entnehmen. Aus den gleichen Gründen ist daher mit einer geringeren Stick-Slip-Neigung im Vergleich zu STD 1,0 zu rechnen.

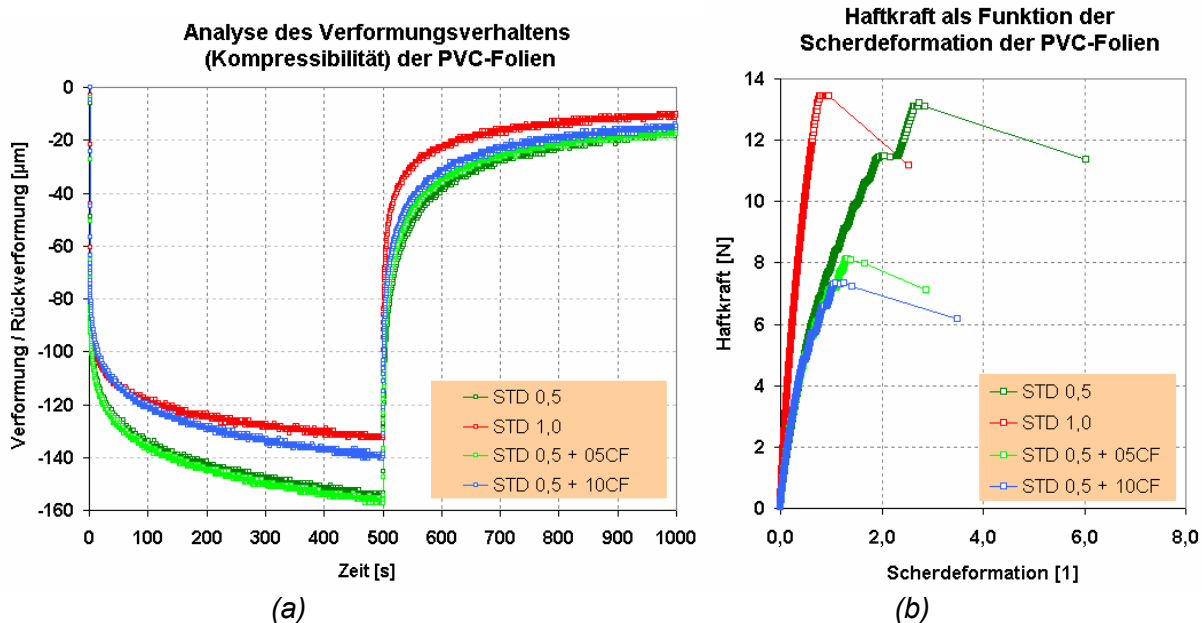


Abb. 5.30: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5+05CF und STD 0,5 + 10CF

Die Abb. 5.31 zeigt beispielsweise das allgemeine Verhältnis zwischen der Stick-Slip-Neigung und der Scherdeformation der Varianten STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF. Daran ist die Abnahme der Stick-Slip-Neigung mit der Erhöhung der Scherdeformation bezüglich der STD 1,0 zu erkennen. Diese Ergebnisse stimmen mit den oben geäußerten Vermutungen überein.

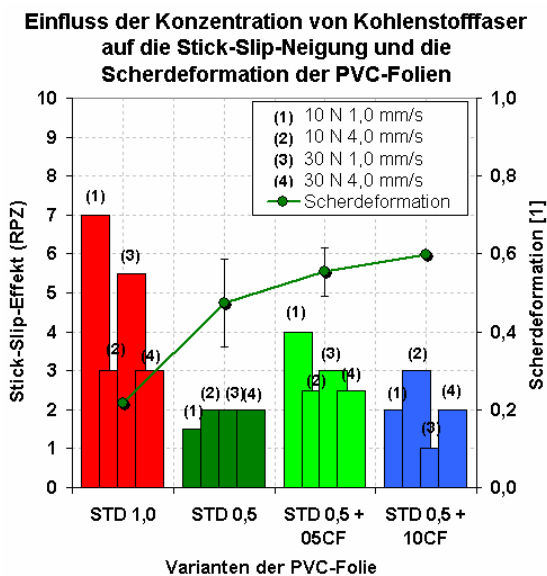


Abb. 5.31: Stick-Slip-Neigung und Scherdeformation der STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF

Nach dem vorher aufgestellten Modell ist eine Erhöhung des gesamten Deformationsvermögens mit einer Abnahme der Stick-Slip-Neigung möglicherweise verbunden. An der Abb. 5.29 kann diesen Effekt für die verstärkten Varianten betrachtet werden, jedenfalls nicht in direkter Verhältnismäßigkeit mit der STD 0,5. Das deutet darauf hin, dass bei den verstärkten Folien die Einflussparameter unterschiedliche strukturbezogene Wichtungen gegenüber der Standardfolien haben können.

5.2.1.3 STANDARDFOLIE UND FASERVERSTÄRKTE FOLIE II (STD 1,0 + 05CF UND STD 1,0 + 10CF)

Die verstärkten 1,0 mm dicken Folien (STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF) werden mit den grenzwertigen 45 % und 50 % Stick-Slip-Neigung noch als stick-slip-frei klassifiziert.

Im Vergleich mit dem Deformationsverhalten der 0,5 mm dicken Standardfolie (STD 0,5), zeigen die 1,0 mm dicken verstärkten Folien eine höhere breitenbezogene Biegesteifigkeit und eine geringere Scherdeformation, siehe Abb. 5.32. Bezugnehmend auf die vorherigen Überlegungen kann es zur Folge haben, dass das gesamte Verformungsvermögen abnehmen und die Stick-Slip-Neigung sich dadurch erhöht.

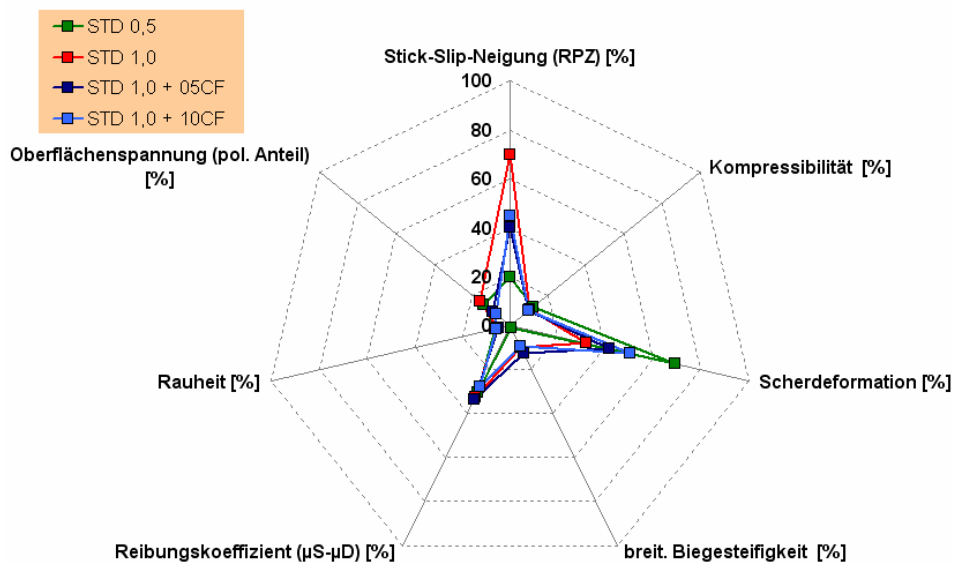


Abb. 5.32: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF

Die Abb. 5.33 a) und b) zeigen zusätzlich das Verformungs- und Reibungsverhalten der STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF, welche sich den der reinen STD 1,0 annähern. Daran ist zu erkennen, dass das gesamte Verformungsvermögen der betrachteten Folien in Richtung höherer Stick-Slip-Neigung tendiert.

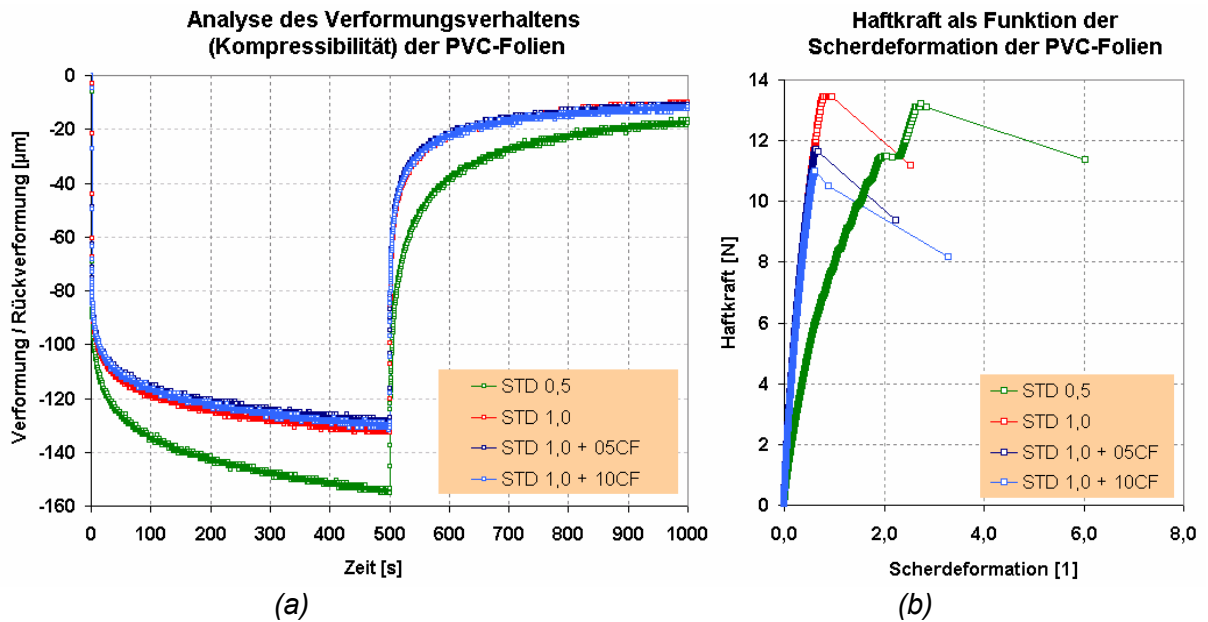


Abb. 5.33: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF

In der Tat bestätigt die Abb. 5.34 die obere Annahme. Daran ist zu erkennen, dass die Erhöhung des Faseranteils mit der Erhöhung der Scherdeformation verbunden ist, die wiederum in Bezug zu der Abnahme der Stick-Slip-Neigung steht. Bezogen auf das Deformationsverhalten der 0,5 mm dicken Standardfolie (STD 0,5) impliziert die Reduzierung der verformungsbezogenen Merkmale, hier als Beispiel die Scherdeformation, die Erhöhung der Stick-Slip-Neigung. Daher sind aus 30 % und 40 % Stick-Slip-Risiko bei der STD 0,5 die grenzwertigen 45 % und 50 % entstanden.

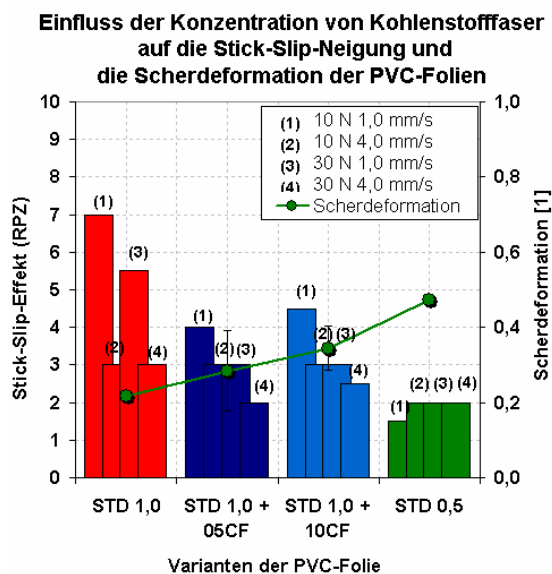


Abb. 5.34: Stick-Slip-Neigung und Scherdeformation der STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF

5.2.1.4 STANDARDFOLIE UND KASCHIERTE FOLIE (STD 0,5 + TL UND STD 1,0 + TL)

Die Abb. 5.35 zeigt die Eigenschaften der kaschierten PVC-Varianten (STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL) und der STD 1,0. Mit einer Stick-Slip-Neigung von 80 % erwiesen sich die beiden kaschierten Varianten als die mit höchsten Stick-Slip-Neigungen behafteten Folien. Die Rolle der Differenz ($\mu_S - \mu_D$) als ein Indikator der Stick-Slip-Neigung bestätigt diese Tendenz.

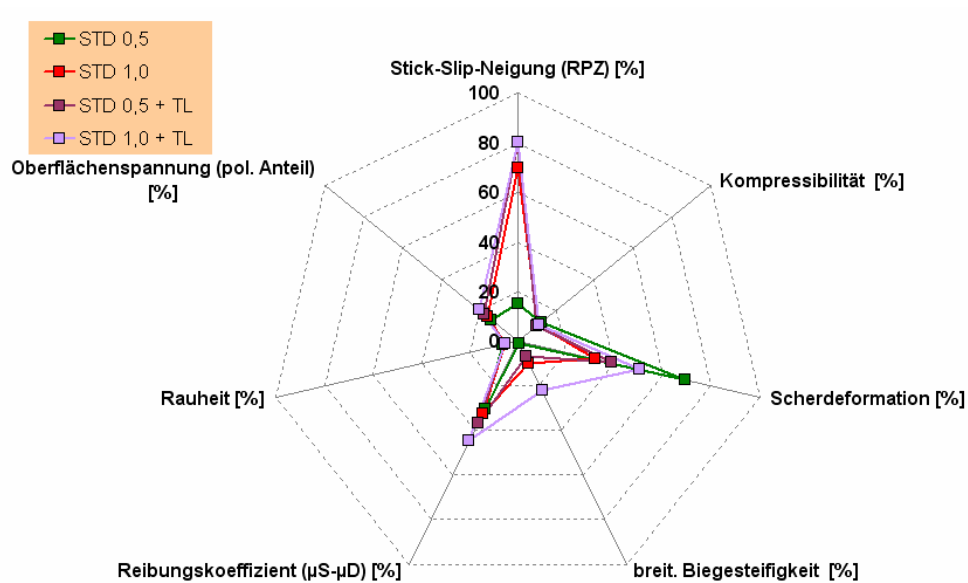


Abb. 5.35: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL

Nach Abb. 5.35 wurde durch die Kaschierung der 0,5 mm dicken Standardfolie (STD 0,5 + TL) ein neues Eigenschaftsprofil geschaffen, das dem der reinen STD 1,0 ähnlich ist. Bis auf die höhere Scherdeformation und die niedrigere breitenbezogene Biegesteifigkeit der STD 0,5 + TL unterscheiden sich beide Profile wenig. Von den bisher dargestellten Vermutungen ausgegangen, wäre zu schlussfolgern, dass die gesamten verformungsbezogenen Merkmale beider Varianten gleich sind. Beim Betrachten der Abb. 5.36 a) und b) lässt sich jedoch feststellen, dass diese Vermutung nicht stimmt.

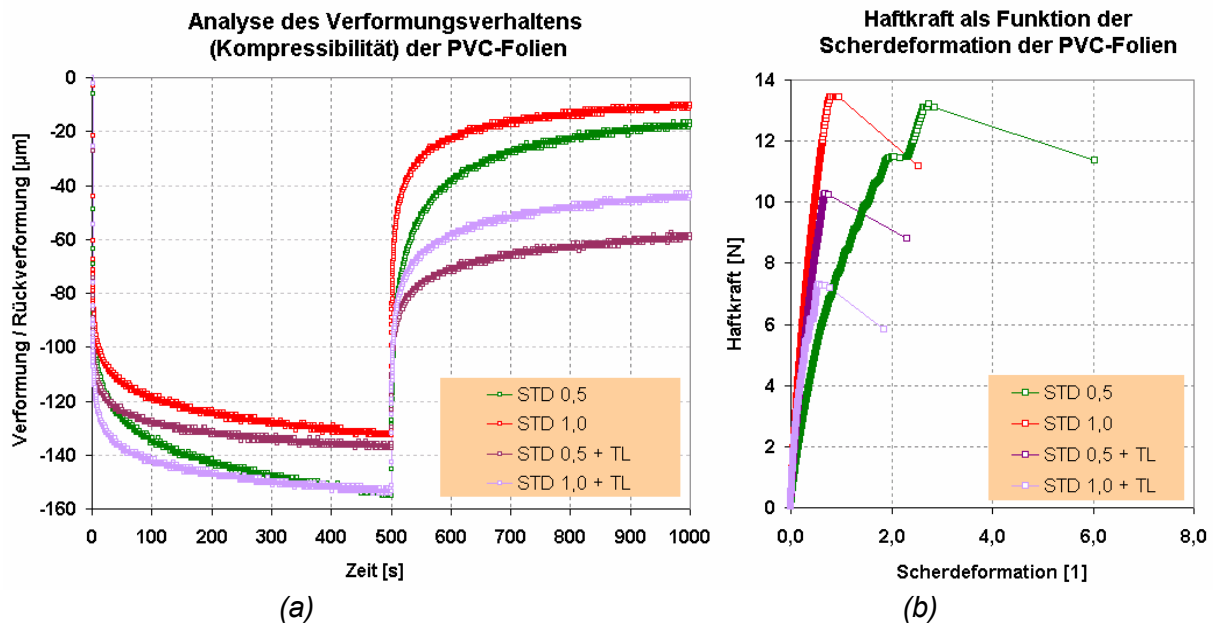


Abb. 5.36: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL

Die Abb. 5.36 a) und b) zeigt die Eigenschaften der integralen mehrschichtigen Struktur, die aus einer PVC-Schicht, einer mit Textil verstärkten PVC-Schicht und einer Textilfaser-Schicht besteht. Beim Ausüben einer Belastung erleidet die Folie eine einmalige und irreversible Deformation, die nicht mit den Retardationseigenschaften der Folie verbunden ist sondern mit dem Zusammenpressen der Textilfaser-Schicht. Rechnet man diesen Anteil der Deformation aus den Diagrammen in der Abb. 5.36 a) und b) ab, verschieben sich die Kurven STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL in die Richtung geringerer Verformung. Durch die Abnahme der Kompressibilität und der Scherdeformation nimmt das gesamte Verformungsvermögen der STD 0,5 + TL mit ab. Die 80 % hohe Stick-Slip-Neigung bei der STD 0,5 + TL ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen.

Bei der STD 1,0 + TL ist zusätzlich einen Anstieg der Scherdeformation zu verzeichnen der für die Erhöhung des integrale Verformungsvermögen spricht. Es wird allerdings angenommen, die wesentlich stärkere Erhöhung der breitenbezogenen Biegesteifigkeit die 80 %ige Stick-Slip-Neigung rechtfertigt.

Das Reibungsverhalten der beiden kaschierten Varianten in der Abb. 5.36 b) entwickelt ebenso einen ähnlichen Verlauf wie bei der reinen STD 1,0: steiler Anstieg der Haftkraft und plötzliches Übergehen in die Gleitphase.

Bei den mit Kohlenstofffaser verstärkten PVC-Varianten (STD 0,5 + 05CF und STD 0,5 + 10CF, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF) wurden RPZ-Werte ermittelt, die einen Zwischenstand zwischen beiden Standardvarianten (STD 0,5, STD 1,0,) zugeordnet werden können. Während bei den kaschierten sehr die allerhöchsten RPZ-Werte wurden. Basierend auf beiden Modellen zum gesamten Verformungsvermögen der Standardvarianten (STD 0,5 und STD 1,0) konnte die Stick-Slip-Neigung dieser Varianten interpretiert bzw. erklärt werden. Hierbei muss auf den Einfluss einer möglichen strukturbezogenen Wichtung auf die untersuchten Eigenschaften hingewiesen werden. Ob es sich um eine Standardfolie oder einen Schaum handelt, hat beispielsweise eine Normalbelastung von 10 N aufgrund der Dicke, Kraftverteilung, Kompaktheit, Deformationsprozess, etc eine unterschiedliche Wirkungsweise.

5.2.2 BETRACHTUNG DER OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN

Das Diagramm in der Abb. 5.37 zeigt die Varianten, welche aus dem gleichen Grundmaterial bestehen, jedoch einen unterschiedlichen Oberflächenaufbau besitzen. Zwei unterschiedliche Prägungen (STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2) und zwei unterschiedliche Lacke (STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2) wurden für die Modifizierung bzw. Behandlung der 1,0 mm dicken Standard PVC-Folie angewendet. Durch die Prägung wird die Rauheit als ein neuer Einflussparameter bei den Folien definiert. Bei der Lackierung wird zusätzlich die chemische Zusammensetzung der Oberfläche beeinflusst.

Durch den Vergleich der Stick-Slip-Neigung und des Eigenschaftsprofils der oben genannten Varianten wird beabsichtigt, Korrelationen zu erstellen, welche auf die Modifizierungen der Folie zurückzuführen sind. Dadurch, dass das Grundmaterial gleich ist, ist eine derartige Betrachtung möglich.

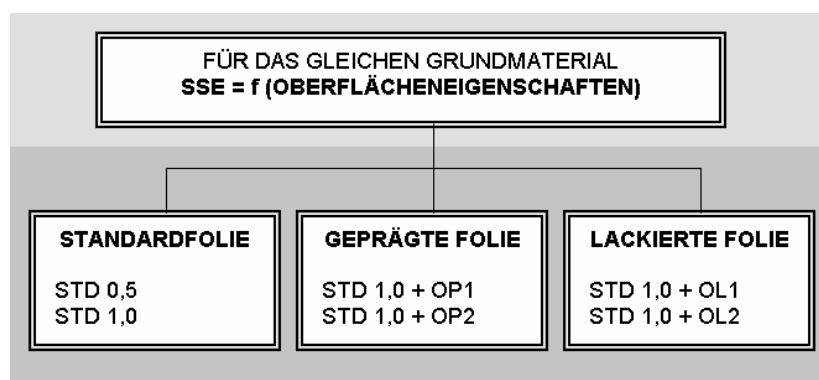


Abb. 5.37: Varianten der PVC-Folien mit gleichem Grundmaterial

5.2.2.1 STANDARDFOLIE UND GEPRÄGTE FOLIE (STD 1,0 + OP1 UND STD 1,0 + OP2)

Durch die Applikation der ausgewählten Oberflächenprofile resultiert zwei gegenläufige Effekte. Die Abb. 5.38 zeigt eine Stick-Slip-Neigung von 15 % für die STD 1,0 + OP1 und 65 % für die OP2 im Vergleich zu 70 % der reinen Standardfolie (STD 1,0). Die Differenz zwischen den beiden Reibungskoeffizienten ($\mu_S - \mu_D$) stimmt mit der Tendenz der RPZ-Werte der beiden Folie überein.

Lohse [Loh 2004] untersuchte den Effekt der gleichen Oberflächenprofile (OP1 und OP2) an relativ flexiblen spritzgegossenen PVC-Platten. Es wurde die gleiche Tendenz der RPZ wie bei den geprägten Folien ermittelt. Beide Strukturen verursachten die gleichen Effekte sowohl bei den spritzgegossenen Platten als auch bei den gelierten Folien. Der Vergleich der Ergebnisse ist in der Tabelle 5.2 zu sehen.

	Stick-Slip-Neigung (RPZ) [%]		
	nicht strukturierte Fläche	Oberflächenprofil 1 (OP1)	Oberflächenprofil 2 (OP2)
gemessen bei [Loh 2004]	90 (hoch) (*)	40 (mittel)	75 (hoch)
gemessen an den geprägten PVC-Folien	70 (hoch) (**)	15 (niedrig)	65 (hoch)

(*) sehr glatte Oberfläche und (**) matte Oberfläche vom Umkehrpapier mit Bezeichnung BOR Supermatt

Tabelle 5.2: Stick-Slip-Neigung von spritzgegossenen PVC-Platten und geprägten PVC-Folie

Aus der Abb. 5.38 ist die Zunahme der Kompressibilität und der Scherdeformation, und die Abnahme der breitenbezogenen Biegesteifigkeit im Vergleich zu der STD 1,0 zu entnehmen. Dadurch ist das höhere gesamte Verformungsvermögen der geprägten Folien im Vergleich zu der 1,0 mm dicken Standardvariante nachgewiesen.

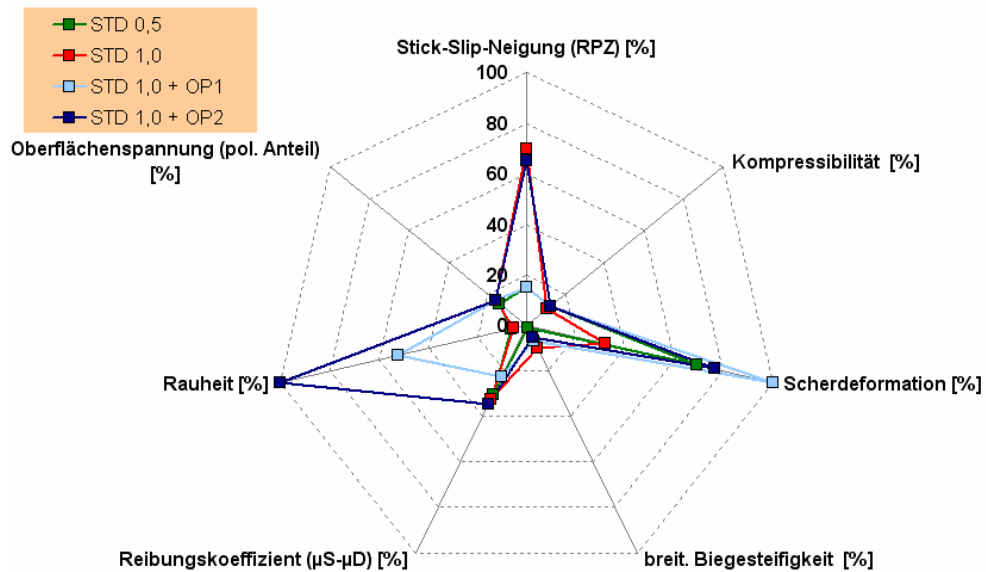


Abb. 5.38: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2

An der Abb. 5.39 a) und b) ist die Deformation beider geprägten Varianten sowohl am UST[®] als auch am Rheometer zu sehen. Mit Bezug auf das Deformationsvermögen der STD 1,0 zeigen beide Profile wesentlich höhere Werte bei beiden Messmethoden. Dieser Anstieg liegt offensichtlich daran, dass die Rauheitsspitzen und deren Umgebung deformierbarer als die flache Oberfläche der nicht geprägter STD 1,0 sind.

Aus dem Oberflächenprofil 1 (STD 1,0 + OP1), welches sich durch die kleinen gestreuten Rauheitsspitzen kennzeichnet, ist ein ähnliches Deformationsverhalten wie bei der STD 0,5 (Abschnitt 5.2.1.1) zu erwarten. Die Folie würde sich in kleinen punktuellen Bereichen auf der ganzen Oberfläche deformiert, nämlich die Unebenheiten und deren unmittelbaren Umgebung. Infolge der Größe, der Form und der Verteilung dieser Unebenheiten (siehe Abb. 4.26 und Abb. 4.27 im Abschnitt 4.2.7) wird zusätzlich angenommen, dass die gesamte Kontaktfläche dadurch abnimmt. Die Kombination dieser Faktoren sorgt für ein hohes gesamtes Verformungsvermögen und die Bildung von relativ geringen Haftkräften (Abb. 5.39), die für die geringe Stick-Slip-Neigung verantwortlich sein können.

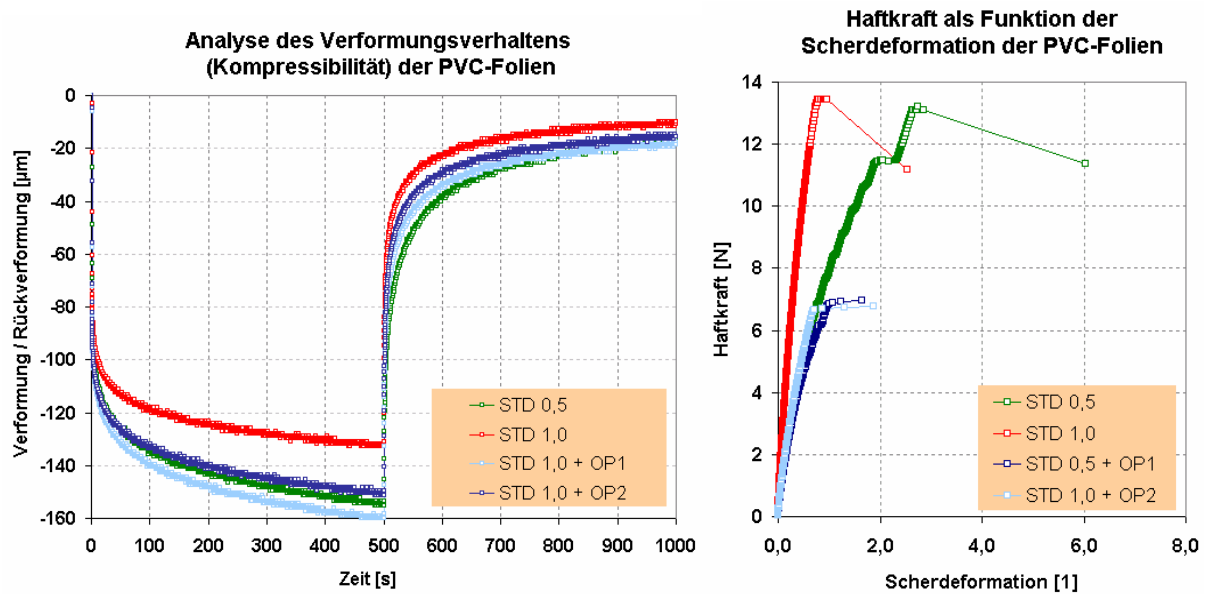


Abb. 5.39: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OP1 und STD 1,0 + OP2

Das Oberflächenprofil 2 (STD 1,0 + OP2) zeichnet sich durch ebene und dicht aneinander platzierte Erhebungen aus. Daraus resultiert eine höhere Kontaktfläche und ebenso eine Bildung höherer Haftkräfte als bei der STD 1,0 + OP1. Die Unebenheiten sind ständig im Kontakt und rufen Deformationen in größeren Bereichen auf der ganzen Oberfläche hervor. Durch die gröbere Erhebungen des Profils 2 (OP2) wurde eine allgemein hohes gesamtes Verformungsvermögen auch im Vergleich zu den Standardvarianten hervorgerufen. Trotzdem zeigt die Variante STD 1,0 + OP2 eine hohe Stick-Slip-Neigung, die den der reinen STD 1,0 sich annähert. Diese Feststellung spricht gegen die bisher angewendeten Modelle zur Interpretation der Stick-Slip-Neigung der weiteren PVC-Folie.

Durch die Gestalt der Unebenheiten wurden jeweils unterschiedliche Effekte hervorgerufen. Beim Oberflächenprofil 1 bestätigte sich, aufgrund der kleinen gestreuten Rauheitsspitzen, die bisher bekannte stick-slip-reduzierende Rolle eines hohen Verformungsvermögens. Durch die Prägung des Oberflächenprofils 2 wurde trotz der Erhöhung des gesamten Deformationsverhaltens und die bisher bei der STD 1,0 ermittelten Stick-Slip-Neigung beibehalten.

5.2.2.2 STANDARDFOLIE UND LACKIERTE FOLIE (STD 1,0 + OL1 UND STD 1,0 + OL2)

Analog zu den geprägten Oberflächenprofilen wurden zwei gegenläufige Stick-Slip-Verhalten nach der Lackierung der STD 1,0 nachgewiesen. Bei der Applikation des Gleitlackes (STD 1,0 + OL1) fand eine erhebliche Reduzierung der Stick-Slip-Neigung der STD 1,0 von 75 % auf 15 % statt. Die mit dem Kunstlederlack behandelte Variante (STD 1,0 + OL2) verursachte die Zunahme der Stick-Slip-Neigung auf 80 %.

Das Eigenschaftsprofil der Standardvarianten und der lackierten Varianten sind in der Abb. 5.40 zu sehen. Daraus ist zu entnehmen, dass die Kompressibilität der STD 1,0 von der Lackierung nicht beeinflusst wurde. Bei der Scherdeformation ist jedoch bei beiden Varianten eine eindeutige Zunahme zu verzeichnen. Unterschiedliche Effekte der Lackierung auf die breitenbezogene Biegesteifigkeit konnten festgestellt werden. Durch die Applikation des Gleitlackes (OL1) stieg sie an, während beim Kunstlederlack (OL2) eine Abnahme beobachtet werden konnte.

Anders als bei den bis jetzt untersuchten PVC-Varianten wurden die Rauheit und die Oberflächenspannung der Folien direkt dadurch beeinflusst. Der Effekt der Lackierung auf die Rauheit und den polaren Anteil der Oberflächenspannung ist ebenfalls in der Abb. 5.40 zu sehen.

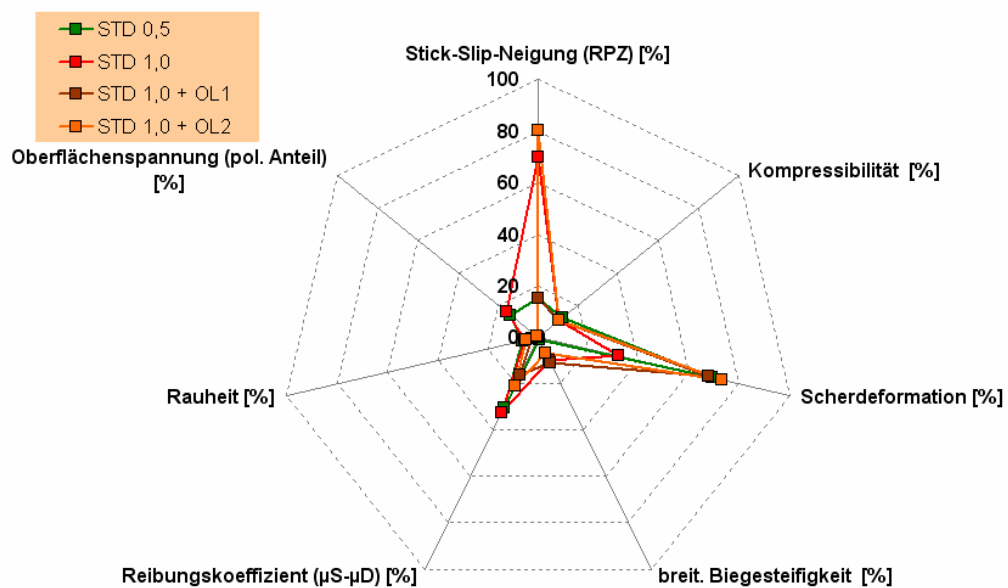


Abb. 5.40: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2

Ein detailliertes Bild des Verformungsvermögens der lackierten Varianten wird durch die Abb. 5.41 a) und b) geschaffen. Die Kompressibilität der beiden lackierten Varianten wurde im Vergleich zu der reinen STD 1,0 kaum verändert. Andererseits, wurde die Scherdeformation praktisch zwischen den der STD 0,5 und STD 1,0 verschoben. In der Abb. 5.41 b) ist der Anstieg der Scherdeformation bei beiden Varianten und die Bildung von höheren Haftkräften bei der STD 1,0 + OL2 (Kunstlederlack) zu erkennen.

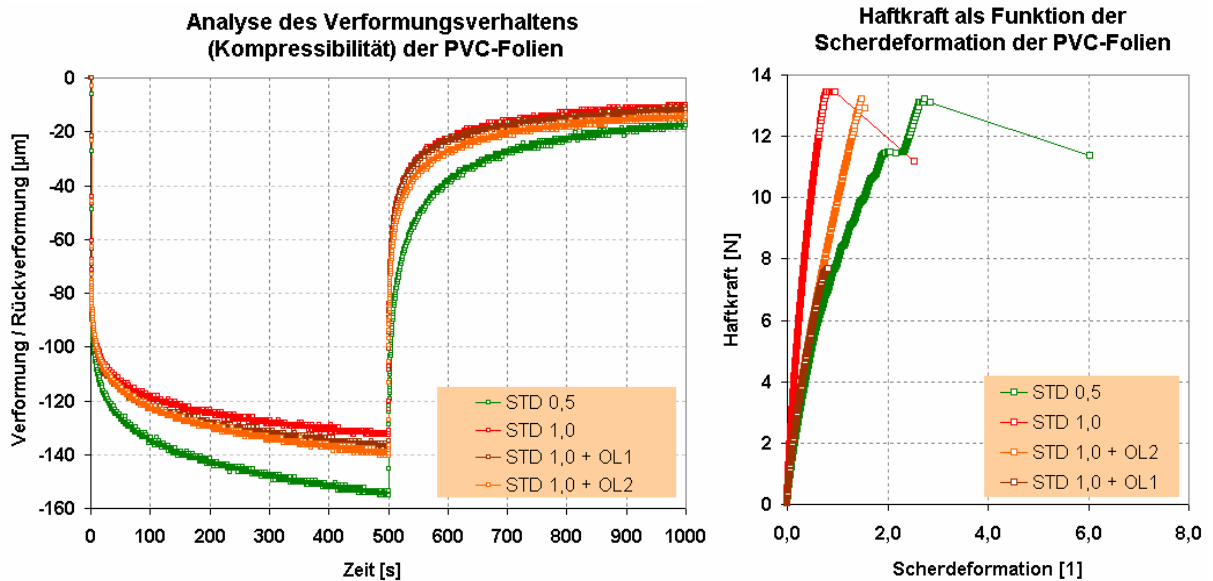


Abb. 5.41: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2

Das folgende Diagramm zeigt die FTIR-Spektren sowohl der reinen (STD 1,0) als auch der lackierten PVC-Folie (STD 1,0 + OL1 und STD 1,0 + OL2). Die wichtigsten funktionellen Gruppen wurden auf dem Diagramm kenntlich gemacht. Durch die Zuordnung der Schwingungsbanden konnten Lackkomponenten erkannt werden, die für die unterschiedlichen Reibungseigenschaften der lackierten Oberflächen verantwortlich sein können.

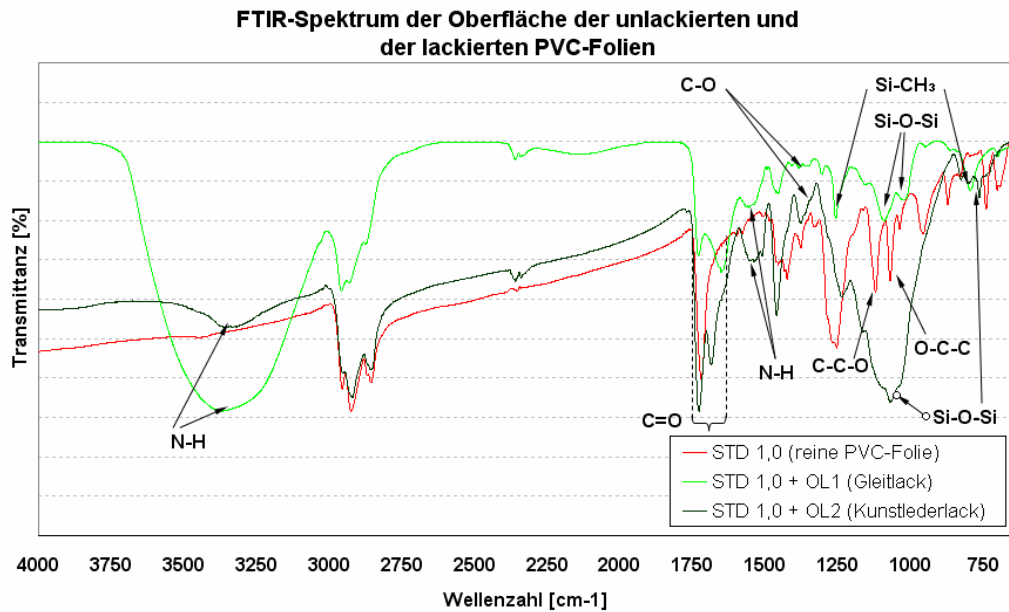


Abb. 5.42: FTIR-Spektren der PVC-Folien

Bei der nicht lackierten Standard-PVC-Folie (STD 1,0) konnten aromatische Ester-Gruppen nachgewiesen werden, welche auf den angewendeten Weichmacher zurückzuführen sind. Die Spektren von beiden lackierten Folien deuten durch die Carbonyl- und Amidgruppe zusätzlich darauf hin, dass beide Lacke Polyurethan enthalten. Die Lagen der Schwingungsbanden der funktionellen Gruppe können in den folgenden Tabellen betrachtet werden.

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Schwingung
1730-1715	C=O Stretch
1310-1250	C-C-O Stretch
1130-1000	O-C-C Stretch

Tabelle 5.3: Typische Infrarot-Banden von aromatischem Ester [Smi 1999]

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Schwingung
3326	N-H Stretch
1705	C=O Stretch
1531	N-H Bend
1222	C-O Stretch

Tabelle 5.4: Typische Infrarot-Banden von Polyurethan [Smi 1999]

Der Gleitlack enthält zusätzlich ein silikonhaltiges Schmiermittel, welches an den Banden bei 1095 cm⁻¹ und 1014 cm⁻¹ erkannt werden kann. Dieser Schmiereffekt ist wahrscheinlich für die geringe Haftkräfte am Rheometer und die geringe Stick-Slip-Neigung der STD 1,0 + OL1 verantwortlich. Die Banden 1083 cm⁻¹ und 802 cm⁻¹ bei der STD 1,0 + OL2 deuten auf oxidisch gebundenes Silizium hin. Es kann dadurch erklärt werden, dass neben Polyurethan-Silikatpartikel als Mattierungsmittel in Lacken häufig eingesetzt werden. Es erklärt ebenfalls die hohen Haftkräfte.

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Schwingung
3738	SiO-H (Silanol) Stretch
3350	Am Silanol verbundenes H und O-H vom adsorbierten Wasser
1085	Si-O-Si asymmetrisches Stretch
944	Si-O Stretch
802	Si-O-Si symmetrisches Stretch
464	Si-O-Si Bend

Tabelle 5.5: Typische Infrarot-Banden von anorganisch gebundenem Silizium [Smi 1999]

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Schwingung
1261	Si-CH ₃
1096,1021	Si-O-Si
800	Si-CH ₃

Tabelle 5.6: Typische Infrarot-Banden von Polydimethylsiloxane [Smi 1999]

Die Partikel des Mattierungsmittels sorgen bei dem Kunstlederlack (siehe Abschnitt 4.2.5) für eine rauere Oberfläche, während bei dem Gleitlack eine glatte Oberfläche erzeugt wurde. Es ist zu vermuten, dass das Verkeilen bzw. Verhakung der Oberflächenspitzen für die hohe Stick-Slip-Neigung der STD 1,0 + OL2 verantwortlich sind. Anhand des FTIR-Spektrums konnte keine Art Schmiermittel im Kunstlederlack festgestellt werden. An den Abb. 5.43 a) und b) sind die Unterschiede zwischen den Oberflächenbeschaffenheiten beider lackierten PVC-Folien zu erkennen.

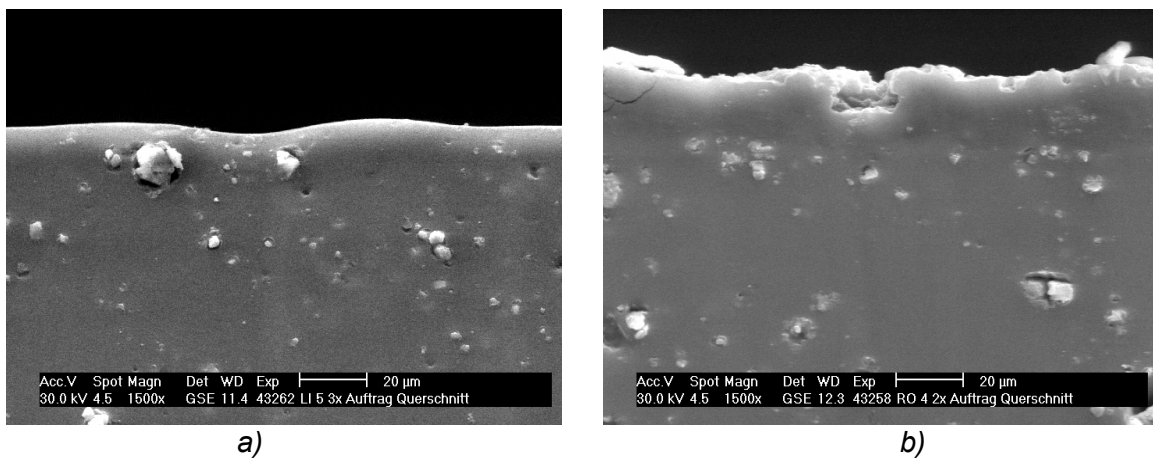


Abb. 5.43: Querschnitt der lackierten PVC-Folien: a) STD 1,0 + OL1 und b) STD 1,0 + OL2

Durch die Applikation ausgewählter Oberflächenprofile und Lackschichten wurde die Stick-Slip-Neigung der Standardfolie (STD 1,0) stark beeinflusst bzw. neudefiniert. Dadurch wurde das gesamte Verformungsvermögen, d. h. Kompressibilität, Scherdeformation und Flexibilität, bzw. auch die Oberflächeneigenschaften der STD 1,0 beeinflusst. Bei den geprägten Folie könnte die bisher angewendete Erklärung der Stick-Slip-Neigung durch das gesamte Verformungsvermögen der Folie mit Beschränkung angewendet werden. Bei den lackierten Varianten setzten sich die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Lacke als verantwortlich für die ermittelten RPZ-Werte durch.

5.2.3 ÄNDERUNG DER STRUKTUR UND DER OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN

Mit dem Schäumungsprozess und die damit verbundene Erhöhung der Rauheit bilden die geschäumten PVC-Folien (SCH 1,0, SCH 4,0, SCH 6,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + 6,0) eine einzelne Gruppe. Die daraus resultierenden Eigenschaftsprofile spiegeln sich in den Reibungseigenschaften wider, wie bisher bei den restlichen PVC-Varianten beobachtet wurde. Diese weichen allerdings von dem der Standardvariante (STD 1,0) sehr stark ab.

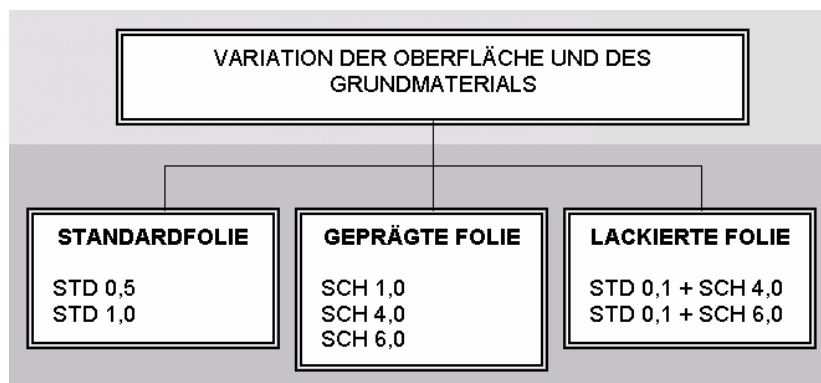


Abb. 5.44: Varianten der PVC-Folien mit unterschiedlichen Oberfläche und Grundmaterial

Trotz der Dicken-, Struktur- und Rauheitsunterschiede innerhalb der Gruppe wurden alle Schäume mit RPZ-Werten zwischen 60 % und 80 %, gleichermaßen als stick-slip-behaftet klassifiziert. Die Stick-Slip-Neigung ($\mu_s - \mu_D$) dieser Variante drückt allgemein die gleiche Tendenz aus, wie der RPZ-Werte ermittelt am Stick-Slip-Prüfstand.

5.2.3.1 STANDARDFOLIE UND GESCHÄUMTE FOLIE I (SCH 1,0)

Die sehr hohe Kompressibilität und Scherdeformation und die niedrige breitenbezogene Biegesteifigkeit charakterisieren das hohe gesamte Verformungsvermögen der SCH 1,0. Außerdem sind eine höhere Rauheit infolge der oberflächlichen Poren und ein höherer polarer Anteil der Oberflächenspannung zu verzeichnen. Die Abb. 5.45 zeigt das Eigenschaftsspektrum der Standardvarianten (STD 0,5, STD 1,0) und der SCH 1,0.

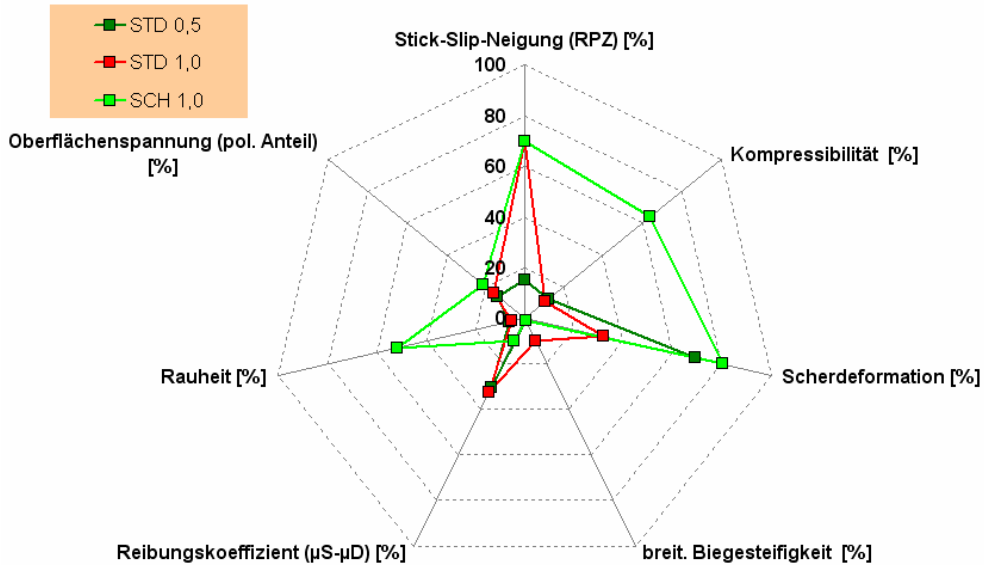


Abb. 5.45: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0 und SCH 1,0

Unter Normalbelastung deformiert sich der 1,0 mm dicken Schaum (SCH 1,0) mehrfach im Vergleich zu der Standardfolie mit gleicher Dicke (STD 1,0). Der Taster zerstört während der Belastung die Schaumstruktur und daher resultiert nach der Rückstellung eine wesentlich höhere bleibende Verformung. Zusätzlich kommt die Bildung einer höheren Kontaktfläche als bei den Standardvarianten zustande. Die Abb. 5.46. stellt den Deformationsvorgang dar.

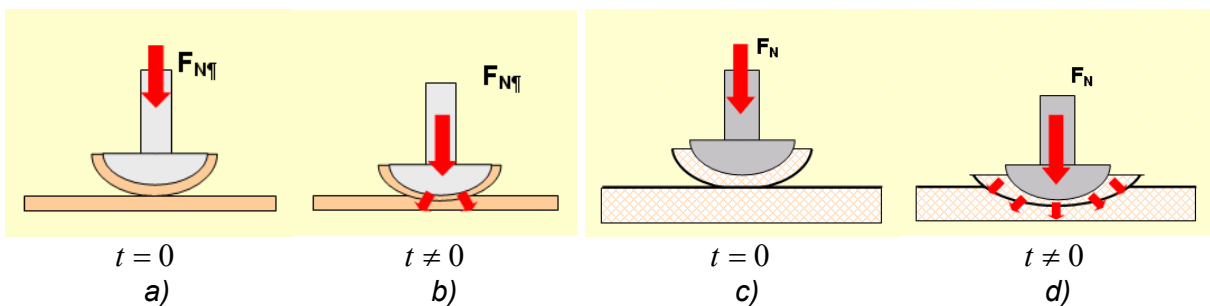


Abb. 5.46: Vergleich des Verformungsvorganges unter Normalbelastung zwischen a) der Standardfolie (STD 1,0) und einer b) und c) geschäumten Folie

Die Abb. 5.47 a) und b) gibt einen detaillierten Überblick über das Verformungsverhalten der STD 0,5, STD 1,0 und der SCH 1,0 am UST® und das Reibungsverhalten am Rheometer.

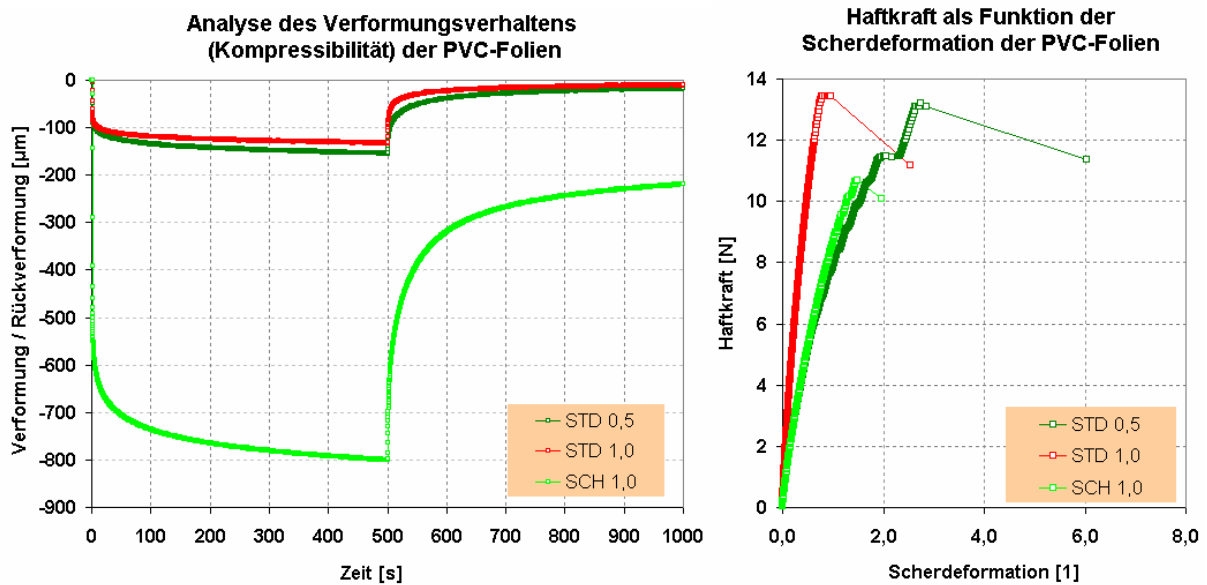


Abb. 5.47: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 1,0 und SCH 1,0

Während der Ermittlung des Reibungsverhaltens am Rheometer wird die Schaumstruktur zusammengepresst und in eine Drehrichtung schierend belastet. Höhere Scherdeformationen als bei der STD 1,0 entstehen. Laut Abb. 5.47 b) zeigt der Schaum ein Reibungsverhalten ähnlich mit dem der STD 0,5 (siehe Abb. 5.27), bei der einen schwach ausgeprägten Stick-Slip-Effekt vor der Gleitphase auftritt. Aus diesem Grund kann das bisher angewendete Modell zum gesamten Verformungsvermögen für die Erklärung der Stick-Slip-Neigung eventuell bei den gesamten geschäumten Varianten nicht angewendet werden.

Basierend auf den Beobachtungen der vorherigen Ergebnisse und der Kenntnis des Aufbaus der Schaumstruktur kann die hohe Stick-Slip-Neigung dieser Varianten am Stick-Slip-Prüfstand folgendermaßen erklärt werden: beim erstmaligen Überfahren der Probe wird die Schaumstruktur zusammengepresst und stellt ein Hindernis zur Bewegung des Schlittens dar. Dadurch steigt die Haftkraft an, die Blattfeder wird aus gelenkt, die Schaumstruktur zerstört und findet anschließend eine beschleunigte Gleitphase statt. Infolge der Zerstörung der Schaumstruktur ist während des darauffolgenden Überfahrens der gleichen Stelle ist mit wenigem Widerstand durch die bleibende Verformung zu rechnen. Es kommt zu einer Stauung des Materials vor der Feder und ebenso zum Anstieg der Reib- bzw. Haftkräfte. Das Überwinden der entstandenen Wulst und deren Neubildung während des ganzen Messvorgangs können für den Stick-Slip-Effekt verantwortlich sein. Die Abb. 5.48 illustriert diesen Effekt.

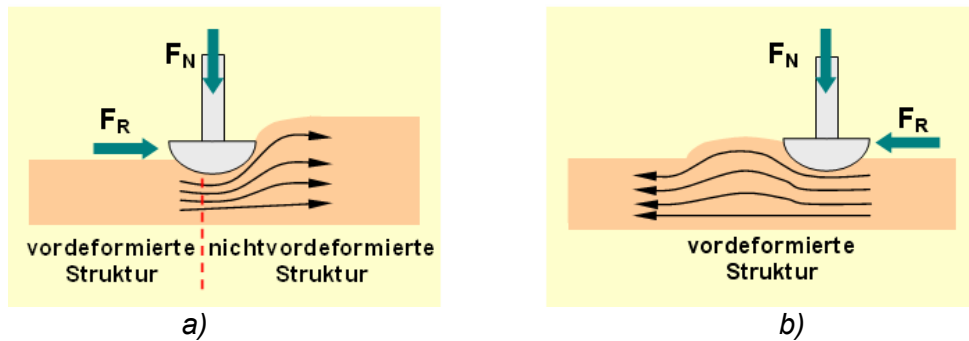


Abb. 5.48: Illustration des möglichen Verformungsvorganges der geschäumten PVC-Varianten am Stick-Slip-Prüfstand (F_N = Normalkraft, F_R = Reibkraft)

5.2.3.2 STANDARDFOLIE UND GESCHÄUMTE FOLIEN II (SCH 4,0 UND SCH 6,0)

Die Abb. 5.49 zeigt das Eigenschaftsprofil der Standardfolie (STD 0,5 und STD 1,0) und der 4,0 mm und 6,0 mm dicken Schäume (SCH 4,0 und SCH 6,0). Der starke Anstieg der Kompressibilität und der breitenbezogenen Biegesteifigkeit und die Abnahme der Scherdeformation sind auf die hohen Dicken der beiden Schäume zurückzuführen. Die Rauheit und der polare Anteil der Oberflächenspannung gleichen sich die der SCH 1,0 an.

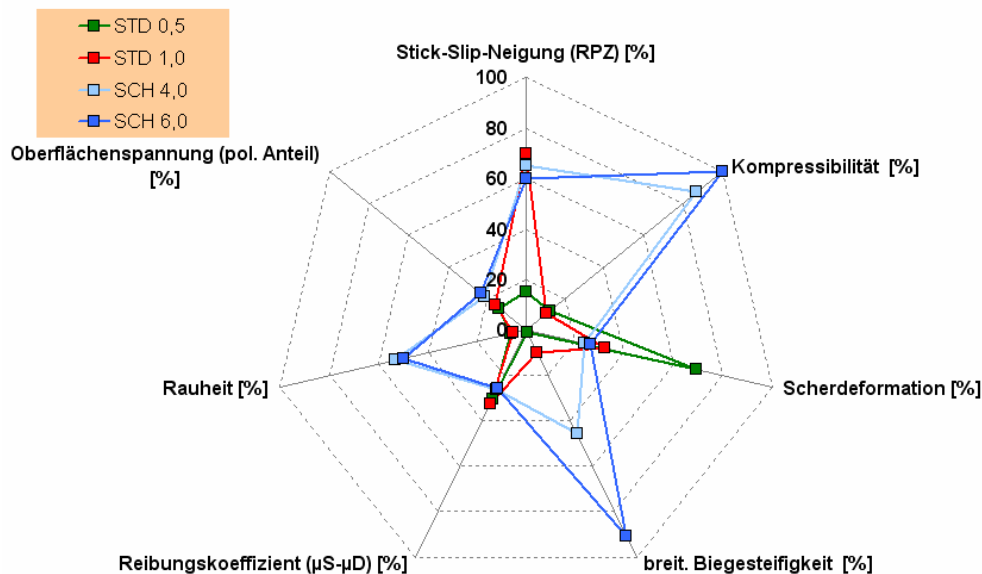


Abb. 5.49: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, SCH 4,0 und SCH 6,0

In Abb. 5.50 a) und b) sind das Deformations- und Reibungsverhalten der SCH 4,0 und der SCH 6,0 am UST[®] und am Rheometer zu betrachten. Daran ist der Einfluss der Dicke der Schäume auf deren Eigenschaften zu erkennen. Die dünnere Schaum-Folie SCH 4,0 tendiert zu einem geringeren elastischen Verhalten im Vergleich zu SCH 6,0, wobei der viskose Deformationsanteil praktisch das Gleiche für beide Variante blieb. In Abb. 5.50 b) ist der steile Anstieg der Haftkraft bei geringeren Verformungen zu erkennen. Die

daraufliegende ebenso plötzliche Abnahme der Reibkräfte beim Übergehen in die Gleitphase deutet auf eine typische Stick-Slip-Bewegung hin.

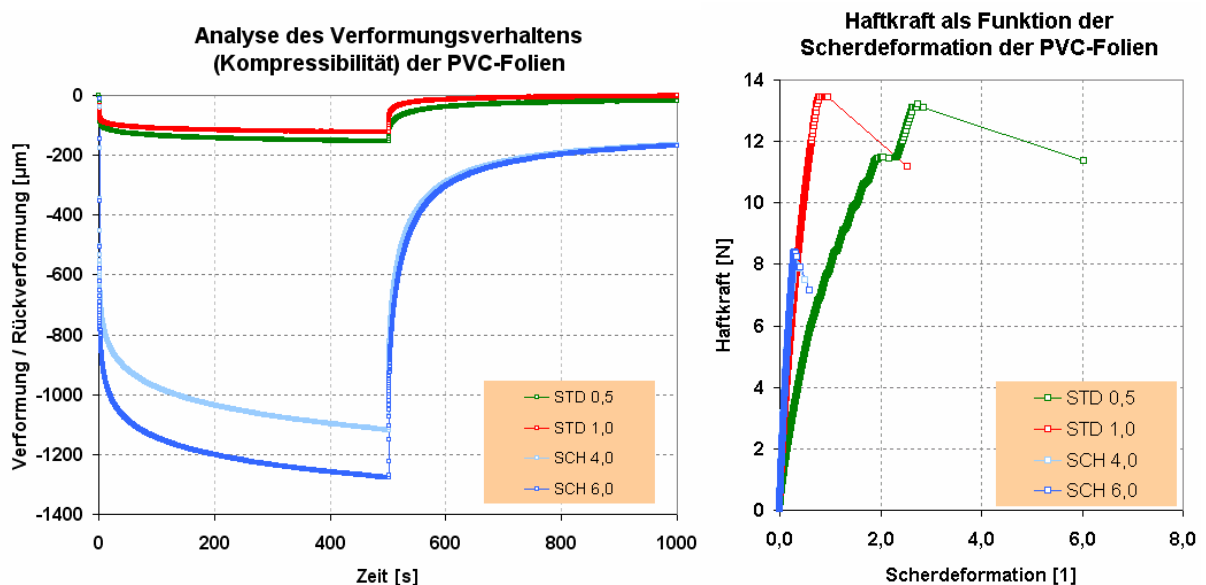


Abb. 5.50: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 0,5, STD 1,0, SCH 4,0 und SCH 6,0

Das Modell zur Erklärung des Stick-Slip-Effektes bei der SCH 1,0 kann hierbei ebenfalls angewendet werden.

5.2.3.3 STANDARDFOLIE UND HINTERSCHÄUMTE FOLIEN (STD 0,1 + SCH 4,0 UND STD 0,1 + SCH 6,0)

Infolge des Zusammensetzens der reinen Schäume (SCH 4,0 und SCH 6,0) mit der 0,10 mm dicken Standardfolie (STD 0,1) nahm deren gesamtes Deformationsverhalten eindeutig ab. Die Ergebnisse der Kompressibilität, Scherdeformation und breitenbezogenen Biegesteifigkeit in der Abb. 5.51 bestätigen diesen Effekt. Die Zunahme der Rauheit und die damit verbundene Reduzierung der polaren Anteile der Oberflächenspannung sind ebenso daran zu erkennen.

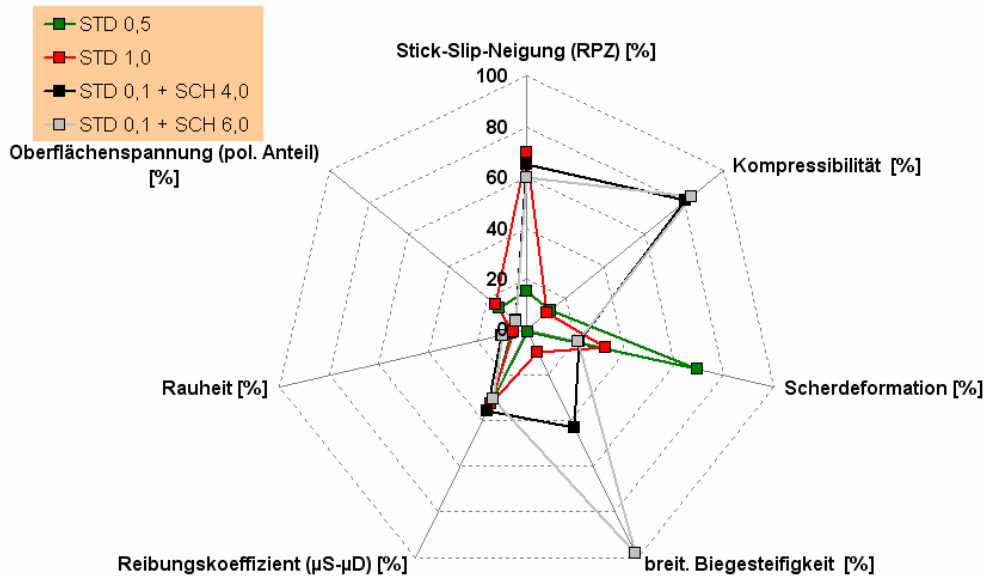


Abb. 5.51: Eigenschaftsprofil von STD 0,5, STD 1,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0

Die durch die zusätzliche 0,10 mm PVC-Folie hervorgerufene Änderung des Verformungsverhaltens bei den STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0 sind in der Abb. 5.52 a) und b) detaillierter zu sehen. Im Vergleich zu den reinen Schäumen mit gleichen Dicken (SCH 4,0 und SCH 6,0) entwickelten sich vergleichbare Haftkräfte bei geringeren Scherdeformationen. Dadurch nehmen die Reibkräfte beim Übergehen in die Gleitphase noch schneller ab als bei den reinen Schäumen (SCH 4,0 und SCH 6,0) und das Stick-Slip-Risiko wird erhöht.

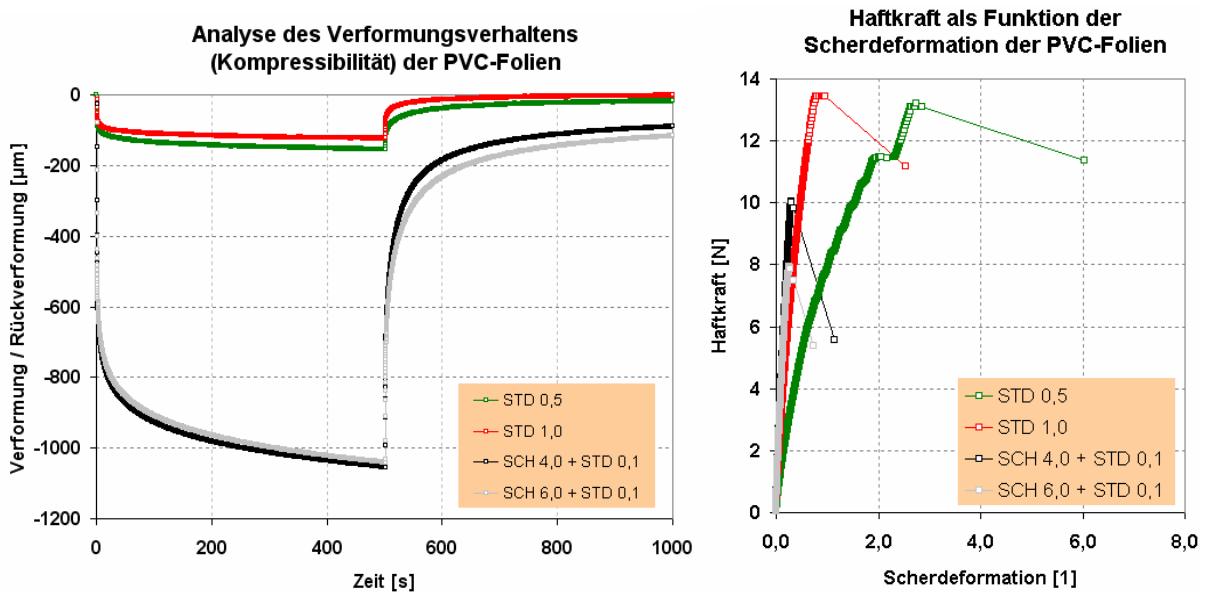


Abb. 5.52: Verformungs- (a) und Reibungsverhalten (b) von STD 1,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0

Im Endeffekt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Rolle der Rauheit und der Oberflächenspannung durch die starken Verformungen der Schäume übertroffen werden. Die entstandenen Kontaktflächen und damit verbundenen Reibkräfte, während der Ermittlung der Stick-Slip-Neigung, beziehen sich direkt auf diese Merkmale.

Die Entstehung des Stick-Slip-Effektes bei den gesamten Schaum-Folien (SCH 1,0, SCH 4,0, SCH 6,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) kann durch das gleiche Modell wie bei der SCH 1,0 erklärt werden. Ähnlich wie bei den SCH 4,0 und SCH 6,0 muss wegen der applizierten der 0,10 mm Folie auf spezifische Aspekte geachtet werden. Diese Betrachtung entspricht den ermittelten Eigenschaften, Beobachtungen und der Vorgeschichte der PVC-Varianten.

Basierend auf die erste Betrachtungsweise kann die Stick-Slip-Neigung der PVC-Folie in Bezug zu deren Deformationsverhalten gebracht werden. Durch die Analyse der Eigenschaftsprofile und der Verhältnisse zwischen Deformationsvermögen und Reibungsverhalten sind unterschiedlichen Deformationsvorgänge den stick-slip-freien und stick-slip-behafteten PVC-Folien zuzuordnen. Die durchgeführten Modifizierungen des Grundmaterials rufen charakteristische Effekt auf die jeweilige Variante hervor, trotzdem ist die Erkennung der Zusammenhangs zwischen Scherdeformation, Kompressibilität und breitenbezogenen Biegesteifigkeit und Stick-Slip-Verhalten bei der Mehrheit der untersuchten Proben möglich.

Die applizierten Oberflächenprofile verursachten starke Änderung der Verformungseigenschaften in Bezug auf die Standardfolie. Trotzdem konnte das Stick-Slip-Verhalten der geprägten PVC-Folie in Bezug zu deren Deformationsvermögen gebracht werden. Es kann durch die Deformation der Rauheitsspitzen und die damit verbundenen Änderung der Kontaktfläche erklärt werden. Bei den lackierten Folien spielten die Zusammensetzung und die Mattierungspartikeln die entscheidende Rolle bei der Bestimmung des Stick-Slip-Verhaltens. Diese Einflussgrößen spiegelten sich wiederum in der Rauheit und in der Polarität (Schmiermittel) der Folienoberflächen wider.

Die extrem hohe Kompressibilität und die durch den Schäumungsprozess bestimmte Rauheit definieren das Stick-Slip-Verhalten der geschäumten Folie. Beim Zusammenpressen der relativ unflexibleren Schaumstruktur entsteht eine hohe Kontaktfläche, die für das Auswechseln zwischen Haften und Gleiten verantwortlich sind. Der Einfluss des Deformationsvermögens zu hohem Stick-Slip-Verhalten lässt sich an die Entstehung von Materialstauung erkennen.

6 KAPITEL

6.1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Stick-Slip-Verhalten von Erzeugnissen für die Anwendung im Automobilinnenraum untersucht und dieses mit deren Deformations- und Oberflächeneigenschaften in Verbindung gebracht. Das physikalische Phänomen Stick-Slip ist die Hauptursache für die Entwicklung von Störgeräuschen im Fahrzeuginnenraum. Die Forschungsarbeiten zum oben genannten Thema erfolgten in zwei Phasen: in der ersten Phase wurde ausschließlich Leder untersucht, während in zweiten Phase sich auf PVC-Folie konzentriert wurde. Bei der Untersuchung von PVC-Folien wurde von Anfang an auf eine systematische Arbeit geachtet, besonders hinsichtlich der Auswahl von Rohmaterialien, Verarbeitungsverfahren und Modifikationen der zu untersuchenden Proben. Im Hinblick auf die möglichen Anwendungen im Fahrzeuginnenraum wurden spezifische Modifizierungen bzw. Behandlungen der PVC-Bahnen durchgeführt.

Die untersuchten Oberflächen- und Deformationseigenschaften wurden in Verbindung zu der Stick-Slip-Neigung (Risikoprioritätszahl) und zu der Differenz ($\mu_S - \mu_D$) gebracht. Beide Zielgrößen drücken die Tendenz der gemessenen Materialien den Stick-Slip-Effekt zu entwickeln. Damit wird beabsichtigt die im Abschnitt 4.1.4 aufgestellten Hypothese zu beweisen.

Im Folgenden werden die wichtigsten erhaltenen Erkenntnisse und Thesen der vorliegenden Arbeit zur Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Stick-Slip-Effekt und den Eigenschaften von Materialien für die Anwendung im Fahrzeuginnenraum aufgeführt:

- Bei Leder wurde ein Bezug der Scherdeformation zur Risikoprioritätszahl sowie zu der Differenz zwischen Haft- und Gleitreibungskoeffizient ($\mu_S - \mu_D$) erkannt.
- Die Beobachtung der Struktur der Lederproben zeigte, dass die deformativen und adhäsiven Vorgänge hauptsächlich an der Zurichtung entscheidend für die Entwicklung vom Stick-Slip-Effekt verantwortlich sind.
- Der natürliche Charakter des Leder und der damit verbundene zufällige Einfluss dessen Struktur und Zusammensetzung erschwerten die Durchführung einer systematische Analyse der Stick-Slip-Neigung. Die ermittelten Deformations- und

Oberflächeneigenschaften erwiesen sich als unzureichend um das Phänomen an diesen Materialien zu beschreiben. Es diene jedenfalls als Ausgangspunkt zu einer systematischen Analyse an einem synthetischen Material (PVC).

Zur Analyse des Stick-Slip-Verhaltens der PVC-Folien wurden spezifische Reibungs-, Oberflächen- und Deformationsmerkmalen ermittelt. Die Beurteilung des Stick-Slip-Effekts an den geprüften Materialien fand anhand der Risikoprioritätszahl (RPZ) statt. Dazu wurden Scherdeformation, Kompressibilität, breitenbezogene Biegesteifigkeit, Rauheit sowie die Differenz zwischen den Haft- und Gleitreibungskoeffizienten ($\mu_S - \mu_D$) in Bezug zur RPZ gestellt. Das Ziel besteht darin, einen Zusammenhang zwischen der Stick-Slip-Neigung und den ermittelten Eigenschaften der PVC-Folien zu finden.

- Die bei der Herstellung der PVC-Folien durchgeführten Modifizierungen und Behandlungen (unterschiedliche Dicken, Schäumung bzw. Hinterschäumung, Verstärkung mit Kohlenstofffaser, Kaschierung, Prägung und Lackierung) haben einen Einfluss auf die Entwicklung bzw. die Intensität des Stick-Slip-Effektes dieser Materialien.
- Die ermittelten RPZ-Werte der gesamten PVC-Folien ermöglichten deren Einteilung in zwei Gruppen: stick-slip-frei und stick-slip-behaftet.
- Die Werte der Differenz ($\mu_S - \mu_D$), der Scherdeformation, der Kompressibilität, der breitenbezogenen Biegesteifigkeit und der Rauheit zeigten allgemeine Tendenzen, die die Einteilung der gesamten PVC-Folien in die zwei Gruppen widerspiegeln.
- An den Werten der Oberflächenspannung konnte keine akzeptable Tendenz erkannt werden, die die Einteilung der gesamten PVC-Folien in die zwei Gruppen widerspiegelt

Die erkannte Verhältnismäßigkeit der einzelnen Kenngrößen der Deformation und der Rauheit zur Stick-Slip-Neigung konnte in ein geometrisches Mittel - *der Stick-Slip-Faktor* - zusammengestellt werden. Dieser Faktor dient als Interpretationsgröße zu der gemeinsamen Abhängigkeit der Eigenschaft der PVC-Folie zur Stick-Slip-Neigung. Die folgende Formel drückt die daraus resultierende Verhältnismäßigkeit aus:

$$F_{SSE} = \ln \left[\frac{d_{[\mu m]} \cdot R_{a[\mu m]} \cdot S_{[N \cdot mm]} \cdot (\mu_S - \mu_D)_{[-]}}{10 \cdot \gamma_{[-]}} \right]$$

Die eigenschaftsbezogene Analyse der gesamten PVC-Varianten spiegelte die entscheidende Rolle des Deformationsverhaltens bei der Entstehung von stick-slip-bedingten Schwingungen wider.

- Zwischen den Standardfolien STD 0,5 und STD 1,0 besteht die Dicke als einziger Unterschied. Beide Varianten wurden nach der RPZ unterschiedlich klassifiziert: die STD 0,5 als stick-slip-frei und die STD 1,0 als stick-slip-behaftet. Beide Standardvarianten wurden als Vergleichsvariante angenommen.
- Das stark ausgeprägte Stick-Slip-Verhalten der geschäumten PVC-Varianten (SCH 1,0, SCH 4,0, SCH 6,0, STD 0,1 + SCH 4,0 und STD 0,1 + SCH 6,0) ist ebenfalls auf die Deformationseigenschaften und die dadurch entstandenen Kontaktvorgängen zurückzuführen. Diese Einflussgrößen wurden durch die irreversible Zerstörung der Schaumstruktur und die viskoelastische Rückstellung der Polymerketten verstärkt. Die Materialdicke und Rauheit zeigten sich als zweitrangig bei der Bestimmung der Reibeigenschaften dieser PVC-Variante.
- Die durch die Einlagerung der Kohlenstofffasern erhöhte Flexibilität und Scherdeformation der Folien (STD 0,5 + 05CF, STD 0,5 + 10CF, STD 1,0 + 05CF und STD 1,0 + 10CF) wird als Hauptursache für deren Klassifizierung als stick-slip-frei eingeschätzt. Die an der Oberflächen befindlichen Fasern trugen ebenfalls zu diesem Effekt bei, indem sie aufgrund ihres unpolaren Charakters als festes Schmiermittel funktionieren.
- Die Schichtstruktur der kaschierten PVC-Folie (STD 0,5 + TL und STD 1,0 + TL) sorgte für ein starkes Stick-Slip-Verhalten sowohl bei der 0,5 mm als auch bei der 1,0 mm dicken Folie. Dieser Effekt ist ebenso auf die Änderung des Deformationsverhaltens zurückzuführen. Die Flexibilität der PVC-Folien wurde durch das Einbetten der Textilfasern stark beeinträchtigt und förderte gleichzeitig die Scherdeformation.
- Die Einteilung der geprägten Folie STD 1,0 + OP1 als stick-slip-frei und der STD 1,0 + OP2 als stick-slip-behaftet resultierte aus unterschiedlichen Deformation- bzw. Kontaktvorgängen. Das Oberflächeprofil 1 mit kleinen und gestreuten

Rauheitsspitzen erzeugte relativ kleine Kontaktflächen und höhere Flexibilität. Diese beschränkte die Deformationsprozesse an der Oberfläche auf die Deformation der Unebenheiten und deren unmittelbaren Umgebung. Mit wesentlich größeren Kontaktflächen und geringerer Flexibilität sorgten die großen Erhebungen des Oberflächenprofils 2 für relativ weiträumige Deformationsvorgänge. Diese verursachten die starken Stick-Slip-Schwingungen bei der STD 1,0 + OP2.

- Das Stick-Slip-Verhalten wurde bei dem verwendeten Gleitlack (STD 1,0 + OL1) besonders durch das silikonhaltige Schmiermittel reduziert. Dies verursachte die Verringerung der Kontaktkräfte und folglich der Differenz $(\mu_S - \mu_D)$. Der Einfluss des Deformationsverhaltens nahm durch das Schmiermittel eine sekundäre Stellung bei der Bestimmung der Reibeigenschaften ein. Das Stick-Slip-Verhalten der mit dem Kunstlederlack behandelten Folie (STD 1,0 + OL2) wurde überwiegend durch die Partikel des Mattierungsmittels bestimmt. Diese Silikatpartikel riefen eine Erhöhung der Rauheit und Haftkräfte hervor, welche für das starke Stick-Slip-Verhalten verantwortlich ist.

Die ermittelten Resultate stellen einen wichtigen Schritt zu der Charakterisierung des Stick-Slip-Phänomens an bereits im niedrigen Kraftbereich deformierbaren Materialien und eine neu zusammengesetzte Betrachtungsweise deren Einflussgrößen dar. Der sogenannte *Stick-Slip-Faktor* gibt den eindeutigen Hinweis über den Zusammenhang zwischen den Deformation-, den Oberflächen- und den Reibungseigenschaften. Ebenso wird die Art der Verhältnismäßigkeit der einzelnen Einflussparameter deutlich.

7 KAPITEL

7.1 AUSSICHTEN UND VORSCHLÄGE FÜR WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

Über die Charakterisierung des Stick-Slip-Effektes an Polymerbahnen sind noch viele offene Fragen vorhanden. Bezüglich das Ziel dieser Arbeit bleibt allerdings der Vorschlag, die tatsächliche mathematische Abhängigkeit der einzelnen Einflussgrößen zu ermitteln. Ebenso ist die Übertragung der angewendete Analyse auf weitere Polymere zu prüfen. Damit kann eine Bestätigung bzw. eine materialspezifische Weiterentwicklung der Vorgehensweise erreicht werden.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [Ber 1996] **Berman, A.D.; Ducker, W.A.; Israelachvili, J.N. (1996):** *Origin and characterization of different stick-slip friction mechanisms.* American Chemical Society Publications. S. 4559-4563.
- [Bow 1973] **Bowden, F. P., Tabor, D. (1973):** *Friction – An introduction to tribology.* Anchor Press/Doubleday, New York.
- [Cou 2005] Course Deformation of Solids (2005): *The causes of friction. Surface deformation: friction and wear.* <http://www.msm.cam.ac.uk/wjc/coursef/Lecture6.htm>. University of Cambridge.
- [Cro 2005] **Cross, R. (2005):** *Increase of friction force with sliding speed.* American Journal of Physics 73, 812 – 816.
- [Czi 1992] **Czichos, H., Habig, K.-H. (1992):** *Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß: Systemanalyse, Prüftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselemente.* Friedr. Vieweg Sohn Verlagsgesell. mbH. Braunschweig, Wiesbaden.
- [Dav 1958] **Davison, C. St. C. (1958):** *Wear prevention between 25 b.C. and 1700 a.D.* Wear 2, S. 59-63.
- [Dup 1993] **Dupont, P. E., Dunlap, E. P. (1993):** *Friction modeling in boundary lubrication.* Proceedings of the 1993 American Control Conference. S. 1910 – 1914.
- [Erh 1980] **Erhard, G., (1980):** *Zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Polymerwerkstoffe.* Dissertation. Universität (TH) Karlsruhe. Karlsruhe.
- [Ehr 2003] **Ehrenstein, G. W. 2003:** *Oberflächenspannungen von Kunststoffen – Messmethoden am LKT,* Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen Nürnberg.
- [Eis 1998] **Eiss, N. S., Hanchi, J. (1998):** *Stick-Slip friction in dissimilar polymer pairs used in automobile interiors,* Tribology International, Volume 31, Number 11, S. 653 – 659.
- [Eri 2007] **Erichsen GmbH & Co. KG (2007):** *Produktbeschreibung: Filmziehgerät.* <http://www.erichsen.de/pdf/prod/de/864.pdf> (Stand 22.01.2007). ERICHSEN GmbH & Co. KG.
- [Fee 1998] **Feeny, B., Guran, A., Hinrichs, N., Popp, K. (1998):** *A historical review on dry friction and stick-slip phenomena.* Applied Mechanics Reviews 51, S. 321 – 341, New York.
- [Fra 2005] **Franck, A., Knoblauch, M., Sandoz, B. (2005):** *Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid (PVC).* Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
- [Gao 1993] **Gao, C., Kuhlmann-Wilsdofr, D., Makel, D. D. (1993):** *Fundamental of stick-slip.* Department of Materials Science and Engineering, University of Virginia. Wear, S. 1139-1149.

- [Gem 1999] **Géminard, J.-C., Losert, W., Gollub, J. P. (1999):** *Frictional mechanics of wet granular material.* Physical Review Letters, Volume 59, Nr. 5, S. 5881 – 5890.
- [Gle 2004] **Gleich, H. (2004):** *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- [Göp 1994] **Göpel, W., Ziegler, C. (1994):** *Struktur der Materie: Grundlage, Mikroskopie und Spektroskopie.* B. G. Teugner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig.
- [Gru 1992] **Grundke, K., Jacobasch, H.-J. (1992):** *Zum Mechanismus der Lackhaftung an Kunststoffoberflächen.* Farbe + Lack, Jhrg. 98, Dez 1992, S. 934 – 942.
- [Güb 1989] **Gübitz, F., Christ, P. (1989):** *Akustische Untersuchungen an Kfz-Innenraumverkleidungsteilen.* Kunststoffe, Werkstofftechnik, 79, S. 233-239, Carl Hanser Verlag, München.
- [Hal 1988] **Haldenwanger, H.-G., Möhler, H., Wachter, W., Weber, M. (1988):** *Messmethode für die Geräuschminimierung von Kunststoffpaarungen an Fügstellen.* Kunststofftechnik, Kunststoff im Fahrzeugbau – Technik und Wirtschaftlichkeit. S. 133 – 173. VDI Verlag. Düsseldorf.
- [Har 1983] **Harli, C. K. (1983):** *Reibungsschwingungen von Schwingern mit oszillierendem Antrieb.* Dissertation, Rheinisch-westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen.
- [Hei 1981] **Heilmann, P., and Rigney, D. A. (1981):** *An energy-based model of friction and its application to coated systems.* Wear, Vol. 72, pp. 195-217.
- [Hoe 2001] **Hoehn, A. (2001):** *Die Verwendung von Winkelhebeln beim Bau der grossen Pyramiden.* www.pyramidenbau.ch/WinkelhebelTextneu.pdf.
- [Hun 2001] **Hunt, K., Rediers, B., Brines, R., McCormick, R., Leis, T., Artale, T. (2001):** *Towards a standard for material friction pair testing to reduce automotive squeaks.* Society of Automotive Engineers.
- [Isr 2003] **Israelachvili, J. (2003):** *Molecular properties of surfaces and films.* Progress Report. Department of Chemical Engineering. University of California Santa Barbara.
- [Jac 1993] **Jacobasch, H.-J., Grundke, K., Schneider, S., Janke, A. (1993):** *Zum Mechanismus der Lackhaftung auf Kunststoffoberflächen.* Farbe + Lack, 99, Jhrg. 7, Sept 93, S. 602 – 607.
- [Jaf 2001] **Jaffer, F. (2001):** *Experimental evaluation of sliding friction coefficients for aerospace applications.* Dissertation. Department of Aerospace Studies, University of Toronto.
- [Kav 2001] **Kavarana, F., Rediers, B. (2001):** *Squeak and rattle – state of the art and beyond.* Sound and Vibration.
- [Kel 1984] **Kellert, H.-J. (1984):** *Vorhersage haptischer Empfindungen bei der Beurteilung von Leder und Synthetics.* Dissertation, Fakultät für

Maschineingenieurwesen, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt (heute TU Chemnitz).

- [Klo 2002] **Klotzbach, S., Henrichfreise, H. (2002):** *Ein nichtlineares Modell für die numerische Simulation reibungsbehafteter mechatronischer System.* ASIM 2002: Symposium Simulationstechnik, Rostock.
- [Kra 1968] **Kragelski, I. W. (1968):** *Reibung und Verschleiß.* VEB Technik Verlag Berlin 1971
- [Kri 2002] **Krim, J (2002):** *Friction at macroscopic and microscopic length scales.* American Journal of Physics 70, Spet 2002, 890 – 897.
- [Kry 2006] **Krylov, S. Y., Dijksman, J. A., Loo, W. A. van, Frenken, J. W. M. (2006):** *Stick-slip motion in spite of a slippery contact: Do we get what we see in atomic friction?* Physical Review Letters 97, S. 166103.1-4
- [Krü 1997] **Krüß – Benutzer Handbuch (1997):** *Drop Shape Analysis.* Krüss GmbH, Hamburg.
- [Lib 2005] **Liberto, F. di, Balzano, E., Serpico, M., Peruggi, F. (2005):** *Dinamica stick-slip: oscillazioni con attrito.* Università “Federico II”. Napoli.
- [Loh 2004] **Lohse C. (2004):** *Einfluss von Oberflächenstrukturen polymerer Werkstoffe auf das Stick-Slip-Verhalten.* Diplomarbeit, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen.
- [Lub 1997] **Lubkin, G. B. (1997):** *Experiments find hysteresis and precursors in the stick-slip friction of a granular system.* Physics Today, Sept 1997, S. 17 – 19.
- [Mäd 2003] **Mädler, A., Stoll, M. (2003):** *Lösungskonzepte Leder und Kunststoffbahnen.* 1. Passauer Störgeräuschforum.
- [Mcm 1997] **McMillan, A. J. (1997):** *A non-linear friction model for self-excited vibrations.* Journal of Sound and Vibrations 205, S. 323 – 335.
- [Mey] **Meyer, E.:** *Atomare Reibung.* Skript zur Vorlesung. Institut für Physik. Universität Basel. <http://www.nano-world.org/Lab/demo/frictionmodule/textbook/textbook.pdf>.
- [Mez 2000] **Mezger, T. (2000):** *Das Rheologie-Handbuch: für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern.* Curt R. Vincentz Verlag.
- [Mic 1992] **Michaeli, W. (1992):** *Einführung in die Kunststoffverarbeitung.* 5. Auflage. Hanser Verlag
- [Mic 2002] **Michaeli, W. (2002):** *Innovationspotential Kunststoff im Automobilbau.* Kunststoff im Automobilbau: Tagung Mannheim. VDI Verlag GmbH. Düsseldorf.
- [Nak 2005] **Nakano, K., Kikuchi, Y. (2005):** *Limitations on the generation of stick-slip vibration.* Yokohama National University.
- [Nem 2003] **Németh, E. (2003):** *Triboelektrische Aufladung von Kunststoffen.* Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg.

- [Ode 1985] **Odens, J.T.; Martins, J.A.C (1985):** *Models and Computational Methods for Dynamic Friction Phenomena*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Elsevier Science Publishers. Holland, S. 527-634.
- [Oha 1978] **Ohara, K. (1978):** *Stick-Slip-Motion and surface deformation*. Faculty of Textile Sciences and Technology. Shinshu University. Tokida, Japan.
- [Ols 1997] **Olsson, H., Åström, K. J., Canudas de Wit, C., Gäfvert, M. Lischinsky, P. (1997):** *Friction models and friction compensation*. Lund Institute of Technology. Lund University. Sweden
- [Per 1998] **Persson, B. N. J. (1998):** *Sliding Friction, Physical principles and applications*. Springer Verlag, Berlin.
- [Per 2005] **PerkinElmer, Technical Note (2005):** *FT-IR Spectroscopy: Attenuated Total Reflectance (ATR)*. PerkinElmer Life an Analytical Sciences, CT, USA.
- [Pic 2001] Pickwell, I. (2001): Break disc modeling. University of Bath.
- [Pri 2005] **Přistavok, R. (2005):** *Analyse und Modellierung der Haftungsmechanismen bei der Beschichtung und Verklebung von Papierwerkstoffen*. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik. Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- [Pvc 2003] **PVC, Produktinformationen Nr. 2 (2003):** PVC-Produkte liefern optimalen Lösungen im Automobil. PVCPlus Kommunikation GmbH, Bonn. http://www.agpu.de/fileadmin/user_upload/3_4_1_Prodinfo_Auto.pdf.
- [Pvc 2005] **PVC, Produktinformationen Nr. 1 (2005):** *Wissenswertes über PVC*. PVCPlus Kommunikation GmbH, Bonn. http://www.agpu.de/fileadmin/user_upload/produktinfo1.pdf.
- [Rab 1956] **Rabinowicz, E. (1956):** *Stick and Slip*. Scientific American, 194, S. 109 – 118, New York.
- [Rab 1957] **Rabinowicz, E. (1957):** *The intrinsic variables affecting the stick-slip process*. Proceedings of the Physical Society of London 71, Nr. 4, S. 668 – 675.
- [Reh 2002] **Rehm, T. (2002):** *Polyvinylchlorid (PVC)*. Kunststoffe, Jahrg. 92, 10, S. 64 – 70, Carl Hanser Verlag. München.
- [Roz 1999] **Rozman, M. G., Urbakh, M. Klafter, J. (1999):** *Atomic scale friction: from basic characteristics to control*. Physica A 266, S. 272 – 279.
- [Sch 1983] **Schlichting, H. J., Rodewald, B. (1983):** *Über die konstruktive Rolle der Reibung*. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG, Gießen.
- [Sch 2000] **Schramm, G. (2000):** *Einführung in Rheologie und Rheometrie. Thermo HAAKE Rheologie*. 2. Auflage. Gebrüder HAAKE GmbH, Karlsruhe.
- [Ser 2004] **Serafin, S. (2004):** *The sound of friction: Real-time models, playability and musical applications*. Dissertation. Department of Music, Stanford University.
- [Skr 2005] **Skript zum Praktikum Makromolekulare Chemie (2005):** *Polymere Grenzflächen*. Abteilung Organische Chemie, Universität Ulm.

- [Smi 1999] **Smith, B. (1999):** *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*. CRC Press LLC.
- [Str 2006] **Strangfeld, M. (2006):** *Statistischen Analysenmethoden für den Vergleich von Prüfverfahren zur Ermittlung von Reibeigenschaften*. Diplomarbeit. Fachhochschule Mittweida, Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen.
- [Tad 2003] **Tadmor, R., Janik, J., Klein, J. (2003):** *Sliding friction with polymer brushes*. Physical Review Letters, Volume 91, Nr. 11, S. 115503.1 – 4.
- [The 2003] **Theumert, M. (2003):** *Dokumentation zur Notenskalierung am SSP: Version 2.0 (interne Version)*. Zins Ziegler-Instruments GmbH.
- [Urb 2004] **Urbakh, M., Klafter, J., Gourdon, D., Israelachivili, J. (2004):** *The nonlinear nature of friction*. Nature, Vol. 430, S. 525-528.
- [Weh 2007] **Wehner, J. (2007):** Heutige und künftige Kunststoffanwendungen im Automobilbau. Innovationsforum 2007, München.
- [Wei 1989] **Weingraber, H. von, Abou-Ali, M. (1989):** *Handbuch Technischer Oberfläche*. Vieweg & Sohn Verlags GmbH, Braunschweig.
- [Wil 2005] **Wilkes, E. C., Summers, J. W., Daniels, C. (2005):** *PVC Handbook*. Carl Hanser Verlag, München.
- [Yos 1993] **Yoshizawa, H., Chen, Y.-L., Israelachivili, J. (1993):** *Fundamental mechanisms of interfacial friction. 1. Relation between adhesion and friction*. Journal of Physical Chemistry, 97, S. 4128-4140.
- [Zim 2003] **Zimmer, S. (2003):** *Geigen gegen Störgeräusche: Ein Verfahren zur Bewertung von Materialpaarungen bezüglich ihrer Knarzneigung*. ZINS Ziegler-Instruments GmbH.
- [Zsc 2004] **Zschau, A., Becker, K., Bourdon, R. (2004):** *Geräusentwicklung in Fahrzeugen verringern*. Kunststoffe, Automobilbau, 94, S. 112 – 116, Carl Hanser Verlag, München.
- [Zun] **Zunhammer, M. ():** *Chemische Grundlage der Lederherstellung*. <http://www-oc.chemie.uni-regensburg.de/Reiser/ChemieAlltag/Leder.pdf>

9 GLOSSAR

A

Appretur: bezeichnet die veredelnde Behandlung Bahnenerzeugnisse, um ihnen ein besonderes Aussehen bzw. bestimmte Eigenschaften zu geben

B

Bahn

C

Charge:

chromfreies Leder:

Crustleder: Unzugerichtete Möbel- oder Autoleder, ungefärbt oder vorgefärbt, die sich besonders gut zum nachträglichen Einfärben oder Zurichten eignen

D

Dakota:

E

F

flammschützend: die Eigenschaft eines brennenden Stoffes bezeichnet, nach Entfernen der Zündquelle innerhalb kurzer Zeit selbständig zu verlöschen, d. h. nicht weiter zu brennen

fogging-arm: mit minimalen Ausdünstungen Folie

G

gellieren: im Zusammenhang mit dem Prozess des Aushärtens polymerer Systeme. Der Übergang von flüssig zu fest erfolgt nicht schlagartig, sondern innerhalb einer Zeitspanne (der Gellierphase). Man spricht von Gellierung.

Gleitlack: Lack der die Gleiteigenschaften verbessert. Die Hafteigenschaften von Gleitlacken können verbessert werden

Grindometer: ist ein Gerät zum Messen der Körnigkeit einer Paste oder von Lacken und besteht zumeist aus Edelstahl

H

I

J

K

kaschieren: das Verbinden mehrerer Lagen gleicher oder verschiedener Materialien (meistens Folien). Man redet von Kaschierung.

Kunstleder: In der Regel bezeichnet der Verbund von textilen Gewebe mit einer Beschichtung aus Kunststoff. Hierbei handelt es sich um Naturfasergewebe oder Kunstfasern, die mit einer weichen PVC-Schicht beschichtet sind

L

M

N

Narbung

Nasca:

Naturleder: Bezeichnung für gegerbte Tierhaut. In der Verarbeitung wird Leder meist gefettet und gefärbt. Leder besitzt charakteristische Eigenschaften. Es ist faserig-porös, luftdurchlässig und reversibel Wasserdampf adsorbierend

O

P

Plastisol: physikalische Mischung aus einem pulverförmigen thermoplastischen Polymer und Weichmacher sowie gegebenenfalls Füllstoffen, Treibmitteln und Additiven

prägen: ist nach DIN 8583 ein Verfahren des Druckumformens, bei dem Zeichen in eine Oberfläche eingedrückt werden. Das kann manuell geschehen, oder mit einer Prägemaschine. Dabei wird ein Muster oder eine Narbung in die Oberfläche eines Erzeugnisses eingeprägt oder eingesenkt. ein Veredelungsverfahren für Textilien, Papier und Leder.

Prägung: siehe prägen.

PVC-Paste: siehe PVC-Plastisol.

PVC-Rezeptur: Beschreibung der einzelnen Komponente und deren Anteile zur Herstellung behäutungsartiger Produkte.

Q

R

Rakel: ein messerartig geschliffenes Werkzeug, das im Flachdruck, Tiefdruck, Farbestreichen etc. zum Einsatz kommt.

Rührer: Verfahrenstechnische Apparatur zur Homogenisierung von fließfähigen Substanzen (rühren). Mit Rührern werden u.a. Prozesse, wie Mischen, Emulgieren, Lösen, Dispergieren.

S

Schäumung: der entweder physikalische oder chemische Prozess, wodurch Materialien (z. B. Kunststoff) eine poröse Struktur erhalten. Dabei werden viele Zellen (von Grundmaterial eingeschlossene Hohlräume, Poren) gebildet

Spiralrakel: Stäbe mit Edelstahlspiralen, die zur Herstellung gleichmäßiger und sehr dünner Schichten dienen.

Stick-Slip-Effekt/ -Verhalten/ Störgeräusche

T

Treibmittel: Fertigungstechnik: ein Hilfsmittel zur Herstellung von Schaumstoffen

U

Umkehrbeschichtung: die Beschichtung findet zunächst auf ein Umkehrpapier statt. Es wird ausgehärtet und in einem zweiten Schritt auf das textile Trägermaterial kaschiert. Anschließend kann nach Trocknung und festem Verbund der Beschichtung zum Textil das Trennpapier abgezogen und mehrfach wieder verwendet werden.

Umkehrpapier:

V

Verbundwerkstoff: ein Werkstoff aus zwei oder mehr verbundenen Materialien. Der Verbundwerkstoff besitzt andere Werkstoffeigenschaften als seine einzelnen Komponenten. Für die

Eigenschaften der Verbundwerkstoffe sind stoffliche Eigenschaften und Geometrie der Komponenten von Bedeutung

Walknappa:

Weichmacher: oder Weichmachungsmittel, sind Stoffe, die spröden Harzen (Duroplaste) und Plasten (Thermoplaste) zugesetzt werden, um diese geschmeidiger und elastischer im Gebrauch oder der weiteren Verarbeitung zu machen.

X

Y

Z

V e r s i c h e r u n g

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Herr Prof. Dr. rer. nat. habil. Eberhard Müller
Herr Prof. Dr. rer. nat. Michael Stoll
Frau Dr.-Ing. Andrea Mädler
Frau Dipl.-Ing. Carina Petzold
Herr Dipl. - Math (FH). Martin Strangfeld
Frau Gabrielle Bieneck

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Datum, Unterschrift