

Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik
der Technischen Universität München

**Scuffing -
Entstehung und Einfluss auf die Qualitätseigenschaften
von Mehrweg-Glasflaschen**

Sabine Jirikovsky

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für
Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung
des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Weisser
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff
3. Priv.-Doz. Dr.-Ing., Dr.-Ing habil. Heinrich Vogelpohl

Die Dissertation wurde am 18.12.2000 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung
und Umwelt am 01.02.2001 angenommen.

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand hauptsächlich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik der Technischen Universität München in Freising-Weihenstephan in den Jahren 1994-1999. Deshalb gilt mein besonderer Dank dem Ordinarius des Lehrstuhls, meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Weisser, der mich stets förderte und diese Arbeit ermöglichte.

Danken möchte ich auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer für die Übernahme des Vorsitzes sowie für die zügige Abwicklung.

Darüber hinaus möchte ich an dieser Stelle meinen Kollegen/innen am Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik herzlich danken, für ihre fachliche Unterstützung, ihre Anregungen und Ratschläge. Vor allem das freundschaftliche Arbeitsklima werde ich sicher sehr vermissen. Herausheben möchte ich meinen Drittprüfer Herrn Priv. Doz. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. Heinrich Vogelpohl, der mich durch seine anregenden und zielgebenden Diskussionen und durch seine Ausdauer beim Korrekturlesen der Arbeit sehr unterstützte.

Nicht zuletzt möchte ich auch den zahlreichen Diplomanden (Axel Palm, Agnes Deszö), Semesterarbeitern (Peter Dietrich, Bernhard Seidl, Steffen Koch) und Studenten herzlich danken, ohne deren Messungen und tatkräftige Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Dankbar bin ich auch für die großzügige materielle Unterstützung der Firmen Heuft Systemtechnik GmbH, Burgbrohl, und Krones AG, Neutraubling, die jeweils ein Kamerasystem zum Beurteilen des Zerkratzungsgrades zur Verfügung gestellt haben. Der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft danke ich für die finanziellen Mittel für einen großen Teil dieser Arbeit.

Vor allem für den Teil Entstehung von Scuffing der Arbeit war eine Vielzahl von Versuchen in der Praxis von Nöten, daher möchte ich mich noch einmal bei allen mitwirkenden Abfüllbetrieben bedanken. Hier sollen auch die helfenden Hände der zahlreichen Mitarbeiter in den verschiedenen Abfüllbetrieben nicht unerwähnt bleiben.

Lenggries, im Dezember 2000

Sabine Jirikovsky

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Eigenschaften und Kennwerte von Flaschenglas	5
2.1	Struktur und Herstellung.....	5
2.2	Allgemeine Eigenschaften	8
2.2.1	Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung	8
2.2.2	Thermische Eigenschaften (spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit)	8
2.3	Mechanische Eigenschaften.....	8
2.3.1	Elastizität	8
2.3.2	Oberflächenhärte	9
2.4	Entstehung von Scuffing durch Materialbeanspruchung.....	9
2.4.1	Tribologische und mechanische Beanspruchung	11
2.4.1.1	Bedeutung der Reibungskoeffizienten.....	11
2.4.1.2	Tribologische Beanspruchung auf den Förderketten - Staudruck	12
2.4.1.3	Schlagbeanspruchung	15
2.4.2	Chemische Beanspruchung	16
2.4.2.1	Chemische Beanspruchung in der Flaschenreinigungsmaschine	16
	Vorweichzone.....	17
	Laugenzonen.....	17
	Spülzone	18
2.4.2.2	Glaskorrosion.....	18
	Partielle Hydratation.....	19
	Alkali-Auslaugung.....	19
	Netzwerkauflösung (= Laugenangriff)	20
	Korrosionskinetik	21
	pH-Wert Abhängigkeit der Korrosionsreaktion	23
2.4.3	Zeitlicher Ablauf der Beanspruchungen einer Mehrwegflasche	24
2.4.4	Biologische Beanspruchung	25
2.4.5	Materialschutz - speziell Verschleißschutz	26
2.4.5.1	Oberflächenvergütung	26
	Heiß- und Kaltendvergütung in der Glashütte.....	26
	Nachvergütung im Abfüllbetrieb.....	27
	Optisches Kaschieren der Zerkratzen	28
2.5	Theoretische und praktische Festigkeit von Flaschenglas	28
2.5.1	Bruchmechanik.....	30
2.5.2	Innendruckfestigkeit	33
2.5.3	Schlagfestigkeit	34
2.5.4	Temperaturwechselfestigkeit.....	34
2.6	Langzeitverhalten.....	35
2.6.1	Ermüdung und Wechselfestigkeit	35
2.6.2	Alterung.....	37

3	Material und Methoden.....	38
3.1	Kamerasystems zum Beurteilen des Scuffinggrades	38
3.1.1	Standardisierter Scuffinggrad.....	41
3.1.2	Beispiel für die Berechnung des standardisierten Scuffinggrades S	41
3.1.3	Kalibrieren mit Referenzflaschen.....	42
3.2	Versuchsdurchführung zum Bestimmen des Scuffinggrades	43
3.2.1	Einzelbetrieb.....	43
3.2.2	Online-Messungen.....	43
3.3	Bestimmen der Festigkeit von Glasflaschen.....	45
3.3.1	Innendruckfestigkeit	46
3.3.2	Schlagfestigkeit	46
3.4	Tribologische Systeme der Mehrwegflaschen	48
3.4.1	Bestimmen von Haftreibungskoeffizienten.....	48
3.4.2	Bestimmen von Gleitreibungskräften.....	49
3.4.3	Kratzversuche im Labormaßstab.....	49
3.4.4	Flaschenförderstrecke.....	50
3.5	Versuche zur mechanischen Beanspruchung in verschiedenen Abfüllanlagen.....	51
3.5.1	Entwickeln von Dummy-Flaschen	51
3.5.1.1	Beurteilen der Dummy-Flaschen.....	52
3.5.2	Stauzonen	54
3.6	Versuche zur chemischen Beanspruchung	55
3.6.1.1	Laborversuche zur Glaskorrosion.....	55
3.6.1.2	Praxisversuche - Temperaturverlauf in Flaschenreinigungsmaschinen	55
3.7	Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM).....	56
3.8	Verwendetes Probematerial – Versuchsflaschen.....	57
3.8.1	0,5-l-NRW-Flaschen	57
3.8.2	0,7-l-GDB-Flasche	58
3.8.3	0,5-l-Ale-Flasche	58
4	Entstehung von Scuffing.....	59
4.1	Zusammenwirken mechanischer und chemischer Beanspruchung.....	59
4.2	Mechanische Beanspruchung	62
4.2.1	Tribologische Untersuchung verschiedener Einflussgrößen	62
4.2.2	Einfluss der Reibungskoeffizienten.....	63
4.2.3	Mechanische Beanspruchung in den Einzelaggregaten	66
4.2.4	Mechanische Beanspruchung auf den Flaschenförderern	67
4.3	Online-Bestandsaufnahme des Zerkratzungszustandes in Abfüllbetrieben.....	71
4.4	Zeitliche Weiterentwicklung des Poolzustandes	73
4.5	Eigenflaschenanteil im Rücklaufleergut.....	76
4.6	Chemische Beanspruchung der Glasflaschen in Flaschenreinigungsmaschinen.....	77
5	Einfluss von Scuffing auf die Qualitätseigenschaften von Mehrweg-Glasflaschen ...	83
5.1	Festigkeit von Glasflaschen	83
5.1.1	Allgemeines.....	83
5.1.2	Innendruckfestigkeit.....	84
5.1.3	Schlagfestigkeit	87
5.1.4	Einfluss mechanischer und chemischer Beanspruchung auf die Festigkeit	90

5.1.5 Zusammenfassung Festigkeitsverhalten.....	92
5.2 REM-Aufnahmen unterschiedlich beanspruchter Glasoberflächen.....	92
6 Zusammenfassung.....	95
7 Literatur.....	99
8 Anhang.....	106

Häufig verwendete Abkürzungen und Formelzeichen**Abkürzungen**

A bis T	Bezeichnungen der untersuchten Abfüllanlagen
AGR	American Glass Research, Firma in Butler, USA
Ale	Bierflaschenform
AP	Auspackmaschine
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge Coupled Device
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EBI	Leerflaschen-Inspektionsmaschine (Empty Bottle Inspector)
EM	Flaschen-Ausstattungsmaschine
EP	Einpackmaschine
Fl	Flaschen
Fl/h	Flaschen pro Stunde
FM	Flaschenfüll- und Verschließmaschine (bei den meisten Flaschenabfüllanlagen mechanisch geblockt)
GDB	Genossenschaft Deutscher Brunnen
ges	gesamt
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
MOPS	Mega Operations per Second (Millionen Rechenoperationen pro Sekunde)
MW	Mittelwert
NRW-Flasche	Nord-Rhein-Westfalen-Flasche, Bezeichnung der 1989 vom Deutschen Brauer-Bund eingeführten 0,5-l-Bierflasche
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PS	Polystyrol
REM	Rasterelektronenmikroskop
RM	Flaschenreinigungsmaschine
RR _o	oberer Reibring
RR _u	unterer Reibring
STLB	Spezielle Technische Liefer- und Bezugsbedingungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m	Atomabstand
A	%	Gesamtausscheidungsrate in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine
A_S	%	Ausscheidungsrate für Scuffingflaschen in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine
B	-	Beschädigungsklassen der Dummy-Flaschen (0-5)
c_L	%	Laugenkonzentration
d	m	Dicke der Flaschenwand
D	m	beliebiger Flaschendurchmesser zwischen D_a und D_i
D_a	m	äußerer Flaschendurchmesser
D_i	m	innerer Flaschendurchmesser
E	N/m ²	Elastizitätsmodul
F_{GR}	N	Gleitreibungskraft
F_H	N	Hangabtriebskraft
F_{HR}	N	Haftreibungskraft
F_K	N	Anpresskraft des Kratzkörpers
F_N	N	Normalkraft senkrecht zur Unterlage
F_P	N	Staukraft im Flaschenpulk
F_S	-	Standardisierungsfaktor für die Berechnung des Zerkratzungsgrades
g	9,81 m/s ²	Konstante für die Erdbeschleunigung
G_p	bar	unterer Grenzwert für die Innendruckfestigkeiten
I	kg m/s	Schlagimpuls bzw. Schlagfestigkeit
ΔI	kg m/s	Erhöhung des Schlagimpulses
$I_{\%}$	%	prozentualer Anteil der Schlagfestigkeit bezogen auf hüttenneue Flaschen
I_0	kg m/s	Anfangsschlagimpuls
l_R	m	Risslänge
m_{FI}	kg	Masse der Flaschen
M_H	Pixel	Messwert (Heuft)
M_K	Pixel ²	Messwert (Krones)

Fortsetzung Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
MW	verschieden	arithmetischer Mittelwert
n	-	Stichprobenumfang (Anzahl der gemessenen Flaschen)
n_{FI}	-	Gesamtanzahl der Flaschen im Pulk
n_R	-	Anzahl der Flaschenreihen im Pulk
$p\%$	%	prozentualer Anteil der Innendruckfestigkeit (1-Minuten-Druckfestigkeit) bezogen auf hüttenneue Flaschen
p_{min}	bar Überdruck	minimaler Messwert der 1-Minuten-Druckfestigkeit
p_t	bar Überdruck	Berstdruck
P_2	%	prozentualer Anteil an Flaschen mit einer Reibringhöhe $RR > 2$ mm
P_3	%	prozentualer Anteil an Flaschen mit einer Reibringhöhe $RR > 3$ mm
p_{60}	bar Überdruck	1-Minuten-Druckfestigkeit
Q	mg/(g min) oder mg/(g $\sqrt{\text{min}}$)	Korrosionsrate
r_o bzw. r_u	mm	Radius am oberen bzw. unteren Reibringbereich von Flaschen
r_R	mm	Spitzenradius eines Oberflächenrisses
RR	mm	Reibringhöhe
s	verschieden	Standardabweichung der jeweiligen Prüfgröße
S	mm ²	standardisierter Scuffinggrad
SA/V	m ² /m ³	Verhältnis der korrodierenden Oberfläche zum Lösungsvolumen (Surface Area/Volumina)
St	-	Anzahl der Stauzonen
t_L	min	Verweilzeit in der Reinigungslauge
T_U	verschieden	untere Toleranzgrenze der jeweiligen Prüfgröße, nach STL B
VK	verschieden	Variationskoeffizient
w	verschieden	Spannweite: maximaler abzüglich minimaler Messwert

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	-	Signifikanzzahl für die statistische Sicherheit, zwischen 0 und 1
v_B	m/s	Geschwindigkeit der Flaschenförderkette
v_{Fl}	m/s	Geschwindigkeit einer Flasche
v_P	m/s	Geschwindigkeit des Flaschenpulses
v_R	m/s	Risswachstumsgeschwindigkeit
v_{Rmax}	m/s	maximale Risswachstumsgeschwindigkeit
Δv	m/s	Differenzgeschwindigkeit
$\Delta \vartheta_{max}$	K	Temperaturwechselfestigkeit
ϑ_L	°C	maximale Laugentemperatur in der Flaschenreinigungsmaschine
γ	°	Neigungswinkel der Transportbahn gegenüber der Horizontalen
γ	N/m	Oberflächenenergie
$\mu_{o, u}$	verschieden	obere bzw. untere Grenze eines Vertrauensbereiches
μ_{GR}	-	Gleitreibungskoeffizient
μ_{HR}	-	Haftreibungskoeffizient
ρ	kg/m ³	Dichte
σ_a	N/m ²	Tangentialspannung
σ_{Rmax}	N/m ²	maximale Spannung in der Rissspitze
σ_t	N/m ²	Axialspannung
σ_{theo}	N/m ²	theoretische Festigkeit
σ_0	N/m ²	angelegte Zugspannung

1 Einleitung

Glas hat schon seit mehreren tausend Jahren eine wichtige Bedeutung in der Menschheitsgeschichte. Bereits um 2000 v. Chr. war das Wissen um die Herstellung von Glas bekannt. Bis 1600 n. Chr. wurden Flaschen als universelle Gebrauchsgegenstände, um Dinge aufzubewahren, abzumessen, usw. verwendet. Erst danach wurde der Funktionsumfang der Flaschen auf das Verpacken von Lebensmitteln im heutigen Sinne, vor allem für Bier, erweitert und seither intensiv genutzt. Im neunzehnten Jahrhundert, vor allem durch den Siegeszug von Coca-Cola, wurde die Flasche, ihre Form und Etikettierung als Werbeträger und Vermarktungsinstrument entdeckt.

In den achtziger Jahren kam in der Getränkebranche ein neuer Trend in Richtung anderer, neuer Packstoffe, den Kunststoffflaschen, auf. Vor allem im Bereich der alkoholfreien Getränke wurde die Glasflasche zum Teil stark zurückgedrängt. Trotzdem ist Glas nach wie vor ein moderner Packstoff, der in die heutige Zeit passt. Durch die vielen Vorteile gegenüber der Konkurrenz Kunststoffflasche ist die Glasflasche in der Getränkeindustrie noch immer überlegen. Sowohl in der Werkstoffzusammensetzung, den Technologien zur Herstellung, als auch bei der Abfülltechnik sind bei den Kunststoffflaschen noch viele Verbesserungen notwendig. Auch besitzt die Glasflasche besonders in traditionsbewussten Zweigen der Getränkeindustrie, wie beispielsweise den Brauereien, einen unangetasteten hohen Stellenwert. Aus diesen Gründen wird sich die Glasflasche sicherlich auch weiterhin in der gesamten Getränkebranche behaupten und sich nie ganz verdrängen lassen.

Dabei sprechen die Zahlen für sich und verdeutlichen die Rolle von Glas als Packstoff in der Bundesrepublik Deutschland. 80 % aller Getränke wurden 1998 in Glas abgefüllt. 75 % der deutschen Biere, Mineralwässer, Erfrischungsgetränke, Fruchtsäfte und Weine werden in Mehr- oder Einwegflaschen aus Glas verkauft. Sekt, Spirituosen, Babykost und Parfums werden ausschließlich in Glas verpackt [36]. 1999 wurden etwa 17,4 Mrd. Glasverpackungen hergestellt, was in etwa 4,4 Mio. Tonnen Glas entspricht. Allein die Deutschen Mineralbrunnen setzen in ihrem Mehrwegpool insgesamt 2,4 Mrd. Verbandsflaschen, davon etwa 1,7 Mrd. 0,7-l-GDB-Flaschen, ein [14, 42, 73].

Auch geht die Entwicklung am Werkstoff Glas stetig weiter. Es werden immer bessere Verfahren und Maschinen zur Herstellung von Flaschen entwickelt. Mit deren Hilfe wird der Formprozess in der Weise optimiert, dass durch gleichmäßigere Wandstärkenverteilungen und somit kleinere mittlere Wandstärken Flaschen mit einem niedrigeren Gesamtgewicht hergestellt werden können. Dabei darf es natürlich nicht zu einer Festigkeitseinbuße kommen. So gehen diese Entwicklungen meist einher mit verbesserten, langlebigeren Oberflächenbeschichtungen. In den letzten Jahren wurde beispielsweise bei einer 0,33-l-Bierflasche ein Gewichtsersparnis von 63 %, bei Getränkeflaschen im Mittel etwa 40 % erzielt [14].

1.1 Problemstellung

Im Kreislauf eines Mehrwegsystems (Bild 1.1) können die Glasflaschen während ihrer Nutzungsdauer bis zu 50-mal umlaufen [73]. In dieser Zeit sind die Flaschen vielen Beanspruchungen ausgesetzt, die die Glasoberfläche angreifen oder sogar zu Beschädigungen, wie Absprünge, usw. führen.

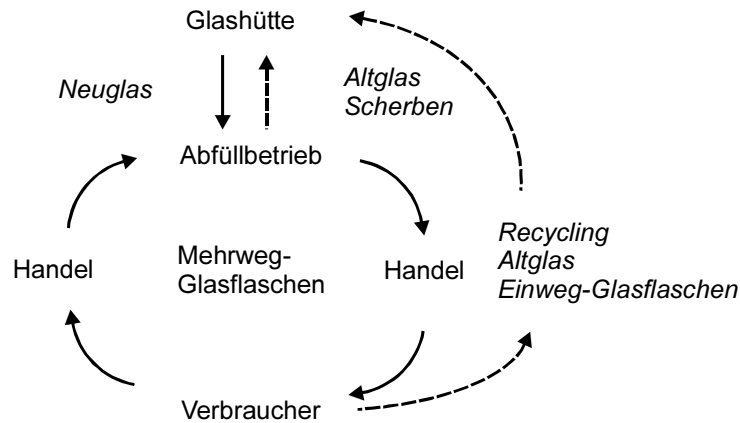


Bild 1.1. Kreislauf von Mehrweg- und Einweg-Glasflaschen

Dabei wird in Beschädigungen, wie beispielsweise Absprünge am Gewinde, an der Mündung oder am Flaschenboden, und Gebrauchsspuren unterschieden. Flaschen mit Beschädigungen werden an der Leerflaschen-Inspektionsmaschine im Flaschenabfüllbetrieb erkannt, von der Produktion ausgeschieden und recycelt. Gebrauchsspuren treten je nach Beanspruchung der Flaschen im Kreislauf nach mehr oder weniger zahlreichen Umläufen an jeder Mehrwegflasche auf. Sie stellen Oberflächenverletzungen im Flaschenmaterial dar, die an den Glasflaschen in trockenem Zustand weiß erscheinen. Die Gebrauchsspuren an Mehrwegflaschen werden mit dem Begriff Scuffing bezeichnet. Der Begriff Scuffing stammt vom englischen Verb to scuff, das mit schleifen oder auch in weitestem Sinne verschleifen übersetzt werden kann. Scuffing entsteht aus der Kombination mechanischer und chemischer Beanspruchung der Flaschen. Teilweise wird dabei auch von mechanischem und chemischem Scuffing gesprochen. Nach obiger Definition allerdings gibt es kein chemisches Scuffing, da in der Flaschenreinigungsmaschine die Glasoberfläche nur chemisch angegriffen wird und es zu keinem Abschleifen der Oberfläche kommen kann.

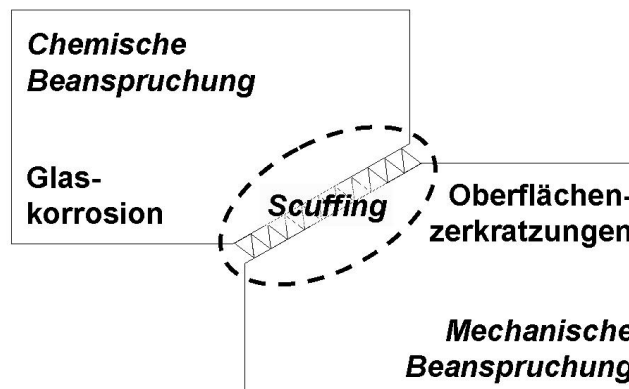


Bild 1.2. Definition der Begriffe Scuffing, Glaskorrosion und Oberflächenzerkratzen

In dieser Arbeit wird der Begriff Scuffing nur für Gebrauchsspuren verwendet, die aus einer Kombination mechanischer und chemischer Beanspruchung entstanden sind. Beim isolierten Betrachten einer der Beanspruchungsarten wird entweder von Oberflächenzerkratzen oder Glaskorrosion gesprochen (Bild 1.2).

Scuffing ist ein Phänomen, das ausschließlich an Mehrwegflaschen auftritt und bei Einweg- oder Zweiweglösungen nicht beachtet werden muss. Scuffing betrifft Glas- wie auch Kunststoffflaschen. Bei den meisten Mehrweg-Glasflaschen wird das Scuffing konstruktionsbedingt durch ausgebildete Wulste auf zwei Bereiche, die sogenannten Reibringbereiche, an der Flaschenschulter und am Flaschenfuß begrenzt. So bleibt das Etikett im Rumpfbereich der Flasche geschützt, weshalb bei dieser Konstruktion auch von einer eingezogenen Etikettenfläche gesprochen wird. Ältere Formen von Glasflaschen und auch die meisten Kunststoff-Mehrwegflaschen haben diese Bereiche nicht, so kann Scuffing bei diesen Flaschen über die komplette Seitenwand auftreten. Da sich die Mechanismen bei der Entstehung sowie die Auswirkungen des Scuffings auf die Glas- und Kunststoffflaschen erheblich unterscheiden, wurde diese Arbeit auf die Glasflaschen begrenzt.

Eine makellos aussehende Verpackung eines Produktes ist für das Marketing eines Lebensmittelbetriebes unerlässlich. Diese Devise wird von manchen Marketingstrategen aus der Getränkebranche auch auf die Mehrwegflaschen angewandt. Dies wird vor allem unter dem Aspekt gesehen, dass eine Mehrwegflasche ohne weitere Umverpackung verkauft wird und in der Regel beim Verbraucher zum Verzehr direkt auf den Tisch kommt. Hier dienen die Etiketten, bei den meisten Mehrweg-Glasflaschen beschränkt auf den Rumpf-, Brust- und Halsbereich, auch als Werbeträger für den jeweiligen Abfüllbetrieb. Diese können jedoch die an den Reibringbereichen entstehenden Zerkratzen nicht abdecken. So befürchten manche Betriebe, dass vor allem bei hochpreisigen Markenprodukten ein schlechter Flaschenzustand vom Verbraucher nicht akzeptiert wird.

Andere Abfüller hingegen argumentieren mit dem Scuffing als deutlich sichtbares Zeichen für den häufigen Umlauf der Mehrwegflasche. Sie beziehen damit in der Diskussion zum Thema "Einweg - Zweiweg - Mehrweg" deutlich Stellung. So wird das Scuffing eingereiht in die Vielzahl an Argumenten, die für Mehrweg sprechen, die hier aber nicht weiter erörtert werden sollen.

In der Poolvereinbarung^(♦) für NRW-Flaschen des Deutschen Brauer-Bundes wird eine Aus-sortierung und Vernichtung von Verbandsflaschen mit unansehnlichem Scuffing (ab 2 mm Reibringhöhe) vorgeschrieben. Diese Maßnahme, Mehrweg-Glasflaschen mit Scuffing bereits vorzeitig aus dem Kreislauf auszusortieren, verkürzt die Umlaufzahlen zu Ungunsten der Mehrweglösung und ist für die Getränkeabfüller ein nicht zu vernachlässigender Kostenfaktor.

^(♦) Vereinbarung über die Verwendung der 0,5-l-Verbandsflasche der deutschen Brauwirtschaft (NRW-Flasche) des Deutschen Brauer-Bundes e. V. vom 30. Januar 1991, kurz Poolvereinbarung genannt [25].

1.2 Ziele

In dieser Arbeit sollte geklärt werden, ob das Scuffing nur eine Frage des Erscheinungsbildes und des Marketings darstellt. Dazu wurden Untersuchungen zu den Auswirkungen des Scuffings auf die Qualitätseigenschaften von Glasflaschen durchgeführt. Hierbei stand zunächst vor allem die Festigkeit der Flaschen auch in Hinblick auf die deutsche Rechtsprechung (Produkthaftungsgesetz) im Vordergrund. Die Gefahren und Folgen einer möglichen Festigkeitseinbuße durch das Scuffing für den Abfüllbetrieb sowie die Verbraucher sollten abgeschätzt werden. Außerdem wurden andere Eigenschaften der Glasflaschen untersucht, die sich auf die Verarbeitbarkeit der Flaschen beziehen.

Um nicht nur die Folgen des Scuffings zu kennen, sondern auch seine Entstehung zu beeinflussen, wurden im nächsten Schritt die Ursachen bei der Entstehung von Scuffing untersucht. Das Hauptaugenmerk der Versuche wurde dabei auf die mechanische Beanspruchung gelegt. Um die logische Reihenfolge zu wahren werden im Folgenden zuerst die Entstehung (Kapitel 4) und dann die Auswirkungen (Kapitel 5) des Scuffings beschrieben.

Um Scuffing und Oberflächenzerkratzen an Mehrweg-Glasflaschen erkennen und messtechnisch erfassen zu können, wurde speziell für diese Arbeit eine transportable Messeinrichtung auf der Basis einer CCD-Kamera entwickelt. Im Vergleich zum zeitaufwändigen manuellen Bestimmen der Reibringhöhe konnten so in kurzer Zeit objektive und vergleichbare Ergebnisse gewonnen werden. Für die Versuche verwendeten Messgeräte und Methoden sind in Kapitel 3 zusammengestellt.

2 Eigenschaften und Kennwerte von Flaschenglas

In den folgenden Kapiteln werden die Eigenschaften und Kennwerte des Packstoffes Glas erläutert. Die wichtigsten Eigenschaften des Glases, bzw. der Glasschmelze, für die Herstellung von Flaschen sind die Viskosität und die thermische Ausdehnung. Für Flaschenglas verdienen die Festigkeit und die Beständigkeit gegenüber chemischem Angriff besondere Beachtung. Andere, den praktischen Einsatz nicht beeinflussende Eigenschaften, bleiben im Folgenden unerwähnt.

2.1 Struktur und Herstellung

Glas ist ein fester, in seiner überwiegenden Masse amorpher, anorganischer Werkstoff. Glas besitzt keinen definierten Schmelzpunkt. Beim Abkühlen der Glasschmelze steigt die Viskosität bis zu einem von der Glaszusammensetzung unabhängigen Wert von $\eta_G = 10^{12}$ Pa s an. Ab dieser Viskosität ist keine Strukturveränderung mehr möglich, die Schmelze ist unterkühlt und zum Festkörper erstarrt. Dieser Übergang erfolgt stetig in einem für jede Gemengezusammensetzung typischen Temperaturbereich, der sogenannten Transformations- oder Glasübergangstemperatur ϑ_G [94]. Für Flaschenglas liegt die Glasübergangstemperatur etwa bei $\vartheta_G = 520$ °C [88].

Die Glasstruktur wird hauptsächlich aus tetraedrisch von Sauerstoffatomen umgebenen Siliciumatomen gebildet. Die SiO_4 -Tetraeder (Bild 2.1) sind über die Sauerstoffatome in ihren Ecken räumlich miteinander verbunden. Während die Tetraeder in einem Quarzkristall regelmäßig angeordnet sind, bilden sie im Glas eine unregelmäßige Netzwerkstruktur. In das Netzwerk werden große Kationen, bei Gebrauchsglas meist Alkali- oder Erdalkalimetallionen, eingelagert (Bild 2.2). Jeder dieser eingelagerten Bestandteile bewirkt durch das Aufbrechen einer Si-O-Si-Brückenbindung eine zusätzliche Unterbrechung der tetraedrischen Struktur des Siliciumnetzwerkes.

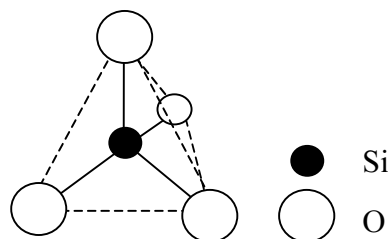


Bild 2.1. Tetraedrischer SiO_4 -Baustein des Glasnetzwerks

Die Hauptbestandteile des Glases werden eingeteilt in:

- die eigentlichen Glasbildner,
- die Netzwerkwandler (Flussmittel und Stabilisatoren) und
- die Zwischenoxide [39].

Die Glasbildner, wie Siliciumdioxid, bilden das eigentliche Netzwerk. Sie kristallisieren aus der Schmelze nicht aus, sondern verbleiben in amorphem Zustand in der unterkühlten, sich verfestigenden Flüssigkeit. Sie machen den Hauptbestandteil bei der Glasherstellung aus und werden meist in Form von Quarzsand zugegeben.

Zur Gruppe der Netzwerk wandler gehören die Flussmittel und die Stabilisatoren, die nach den Gleichungen 2.1 und 2.2 in das SiO_2 -Netzwerk eingebaut werden. Die Flussmittel bewirken eine Schmelzpunktniedrigung der Glasbildner, so dass Glasschmelzen bereits bei 1400-1500 °C, etwa 500 °C unterhalb der Schmelztemperatur von reinem SiO_2 , hergestellt werden können. Als Flussmittel dienen vor allem Carbonate von Alkalimetallen, wie beispielsweise Natriumcarbonat Na_2CO_3 und Natriumoxid Na_2O . Durch Stabilisatoren wie Erdalkalimetalle, meist in Form ihrer Carbonate, oder Oxide wie Kalk, Dolomit und Feldspat, wird das Glas härter, fester und beständiger gegen Chemikalien.

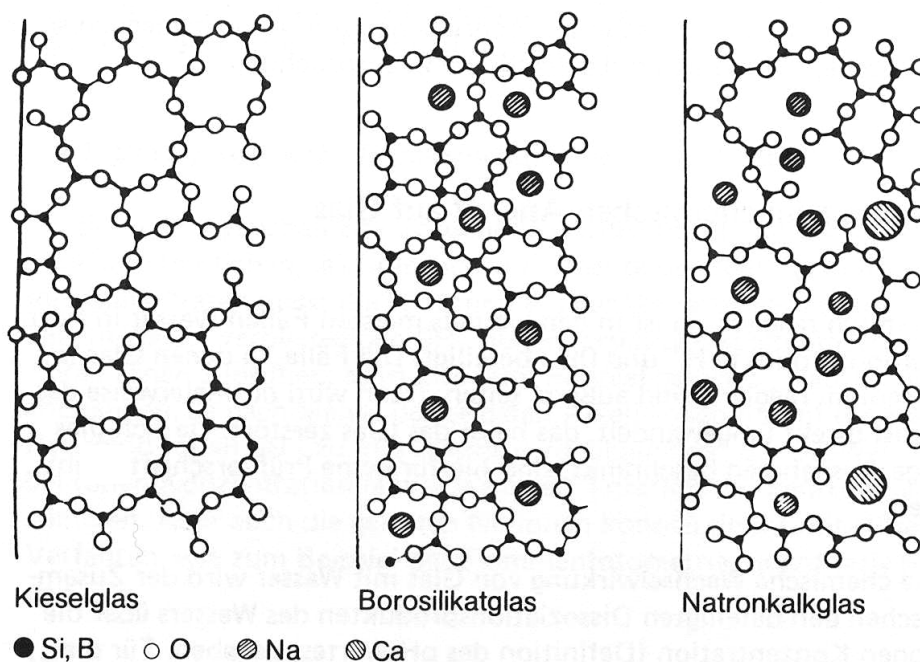
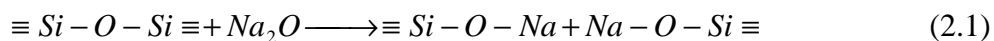


Bild 2.2. Ebene Darstellung der unregelmäßigen Netzstruktur von Glas [77]

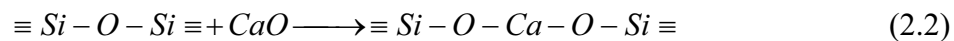
Verbindungen aus der Gruppe der Zwischenoxide, wie beispielsweise Al_2O_3 und MgO , können teilweise SiO_2 substituieren und die Funktion der Netzwerk bildner übernehmen. Sie wirken somit stabilisierend auf die Netzwerkstruktur. Bis zu 1 % Pottasche (K_2O) sorgt für erhöhten Glanz. Dem Gemenge können je nach Glasfarbe zwischen 15 und 90 % Altglascherben zugegeben werden [14]. SAHAR u. a. [92] untersuchten den Einfluss steigender Altglasanteile in der Schmelze auf die Qualität von Behälterglas. Durch vermehrtes Einlagern von OH und Wasser in die Glasstruktur mit steigendem Scherbenanteil (untersuchter Bereich 12 - 30 %) nahmen die Dichte, der Elastizitätsmodul und die Oberflächenshärte der Gläser ab.

Die Wirkungsweise der Netzwerk wandler, nach FRISCHAT [39]:

- Flussmittel (Alkalien)



- Stabilisatoren (Erdalkalien)



Das Gemenge wird in kontinuierlich arbeitenden Wannenöfen aufgeschmolzen. Beheizt werden die Wannen mittels offener Flammen, die oberhalb der Wanne aus den Brennerköpfen austreten und über den Glasschmelztiegel streichen. Auf der einen Seite der Wanne werden die im richtigen Verhältnis abgewogenen Grundbestandteile des Gemenges zugegeben und am anderen Ende kontinuierlich als Glasschmelze abgezogen. Die leicht abgekühlte Schmelze kann durch Gießen, Blasen, Pressen und Walzen verformt werden. Behälterglas wird im Press-Blas- oder Blas-Blas-Verfahren hergestellt. Durch unterschiedlich schnelles Abkühlen des Glases können innere Spannungen hervorgerufen werden. Diese müssen durch entsprechende Temperaturführung nach dem Formprozess minimiert werden.

Aufgrund ihrer Zusammensetzung werden die Gläser hauptsächlich in drei Gruppen eingeteilt: Natronkalk-, Borosilicat- und Bleisilicatglas. Tabelle 2.1 zeigt die chemische Zusammensetzung dieser Gläser in Massenprozent. Für Behälterglas und Gebrauchsgläser, wie Flaschen und Trinkgefäße sowie für Flachglas wird Natronkalkglas verwendet. Spezielle, chemisch und thermisch besonders beständige Gläser für den Laborbedarf, den chemischen Apparatebau und feuerfestes Geschirr werden aus Borosilicatglas hergestellt. Bleiglas, das sich durch eine hohe Lichtbrechung auszeichnet, wird vor allem als Kristallglas, für geschliffene Glaserzeugnisse und Wirtschaftsglas für Lampen, Bildröhren usw. eingesetzt.

Tabelle 2.1. Typische chemische Zusammensetzung verschiedener Gläser [14, 34, 74, 79, 98]

Glasart	Zusammensetzung, Anteile in Massenprozent							
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Sonstige
Natronkalkglas	70-74	11-13	10-11	1-2	0,5-1	1-4	-	Farbe 0,5-<3
Borosilicatglas	70-80	4-15	1-10	-	-	3	13	-
Bleisilicatglas	54-58	Σ etwa 14				-	-	PbO 20-30

Durch Zugabe bestimmter Oxide oder Kolloide wird Glas eingefärbt. Dabei können prinzipiell die Oxide aller Elemente der Nebengruppe in der vierten Reihe des Periodensystems eingesetzt werden. In der Behälterglasindustrie werden vor allem die Metalle Eisen Fe (III), Mangan Mn (III), Chrom Cr (III) und Nickel Ni (II) verwendet [14, 34, 107]. Abhängig von der jeweiligen Valenz dieser Metalle im Oxid absorbieren sie Licht in einem Wellenlängenbereich zwischen 400 und 800 nm, so dass teilweise Färbungen im sichtbaren Bereich auftreten. Häufig sind Eisenoxide bereits in den eingesetzten Rohstoffen enthalten. Besonders bei Weißglas darf der Eisengehalt einen Massenanteil von 0,05 % nicht übersteigen, da sonst eine unerwünschte grünbraune Färbung auftritt [107]. Durch Zugabe von Manganoxiden (Glasmacherseife), die in einer bestimmten Valenz die Komplementärfarbe der Eisenoxide absorbieren, kann die Eisenfärbung kompensiert werden. Die Farbanteile und entfärbenden Zusätze im Weiß-, Braun- und Grünglas liegen im Bereich von 0,1 bis <3,0 Massenprozent. Die Anteile sind so gering, dass sie die Eigenschaften der Gläser wie Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit nicht beeinflussen.

2.2 Allgemeine Eigenschaften

Zuerst werden einige allgemeine Eigenschaften von Flaschenglas wie Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung und thermische Eigenschaften beschrieben. Diese Eigenschaften werden nur durch die Glasszusammensetzung und nicht durch äußere Einflüsse wie beispielsweise Scuffing beeinflusst.

2.2.1 Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung

Die Dichte ist stark von der Glaszusammensetzung abhängig. Sie beträgt für Natronkalkglas etwa $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ (für Bleisilicatglas bis zu 6000 kg/m^3). Die Viskosität der Glasschmelze ist zwar für den Herstellungsprozess, jedoch nicht für die Eigenschaften der fertigestellten Packmittel von Bedeutung und wird hier nicht weiter behandelt. Die Oberflächenspannung ist wegen ihres Einflusses auf die Ausspülbarkeit besonders für Mehrwegbehälter von Bedeutung. Je kleiner die Oberflächenspannung, desto besser kann eine Reinigungslösung wieder abgespült werden. Die Oberflächenspannung für Glas im Vakuum beträgt 315 N/m [94].

2.2.2 Thermische Eigenschaften (spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit)

Glas besitzt aufgrund seiner relativ fest gebundenen Elektronen eine vergleichsweise kleine Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeiten von Glas liegen bei etwa $\lambda = 1 \text{ W/(m K)}$ [95].

Die Wärmedehnung ist für den spröden Werkstoff Glas aufgrund seines Einflusses auf die Temperaturwechselfestigkeit von Bedeutung. Sie wird gekennzeichnet durch den mittleren Längenausdehnungskoeffizienten α und den mittleren Volumenausdehnungskoeffizienten β , wobei gilt: $\beta \approx 3\alpha$. Diese Ausdehnungskoeffizienten beschreiben, um welchen Bruchteil der Ausgangslänge (bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$) sich der Werkstoff bei einer Temperaturerhöhung um 1 K ausdehnt. Gläser mit kleineren Wärmeausdehnungskoeffizienten sind folglich temperaturbeständiger. Für Natronkalkglas liegt er im Bereich von etwa $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, bei Laborgläsern bei etwa $\alpha = 3 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [28, 94].

2.3 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften kennzeichnen das Verhalten von Werkstoffen gegenüber äußeren Beanspruchungen. Bei der Verformung als Folge der Beanspruchung können bei Glas drei Arten unterschieden werden: reversible und irreversible Verformung sowie Bruch.

2.3.1 Elastizität

Glas ist ein sehr spröder Werkstoff. Nur kleine Kräfte können durch elastische Verformung abgefedert werden. Es gibt je nach Belastungsart verschiedene Module, die die Elastizität eines Werkstoffes beschreiben. Die Module sind definiert als das Verhältnis von angelegter Spannung σ zur dadurch bewirkten, relativen Längenänderung ε . Beim Elastizitätsmodul (E-Modul) E handelt es sich um eine Zugspannung. Der E-Modul, auch Dehnungsmodul genannt, ist definiert als:

$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.3)$$

wobei: F : wirkende Kraft, A : Querschnittsfläche, Δl : Längenänderung unter Krafteinwirkung, l : Ausgangslänge.

Je höher der E-Modul, desto höher die zu erwartende Festigkeit des Glases. Der E-Modul ist stark von der chemischen Glaszusammensetzung abhängig. Eingelagerte Alkalioxide vermindern den E-Modul, da die Zahl der nicht brückenbildenden Sauerstoffatome ansteigt. Der E-Modul lässt sich jedoch auch durch die Temperaturführung beim Abkühlen der geformten Gläser steuern [94]. Schnelleres Abkühlen führt zu einem kleineren E-Modul [10]. Bei Schlagbeanspruchungen wirkt sich ein höherer E-Modul festigkeitserhöhend aus. Der E-Modul von Glas liegt zwischen $E = 6,3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ (Borosilicatglas) und $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ (Natronkalkglas) [63].

2.3.2 Oberflächenhärte

Die Härte beschreibt den Widerstand eines Werkstoffes, besonders seiner Oberfläche, gegen Zerkratzen, Abrieb oder Eindringen eines anderen Körpers. Die Härtezahl eines Werkstoffes ist immer in Verbindung mit dem verwendeten Messverfahren anzugeben. Es gehen die Anpresskraft, die Geometrie der Kratzkörper und die Umgebungsparameter mit in das Ergebnis ein. Die Messwerte verschiedener statischer sowie dynamischer Härteprüfverfahren können nicht unmittelbar miteinander verglichen werden. Gängige Härteprüfverfahren für Glas stellen die Methoden nach KNOOP oder VICKERS dar, die jeweils mit einem pyramidenförmigen Eindringkörper aus Diamant arbeiten. Die ermittelte Härte wird in N/m^2 angegeben.

Das von Friedrich MOHS 1812 für die Mineralogie entwickelte Ritzhärteverfahren ist das älteste statische Härteprüfverfahren. Die MOHSSche Härteskala von 1-10 stellt eine relative Reihenfolge von getesteten Werkstoffen dar. Dabei können jeweils Werkstoffe mit niedrigerer Härtestufe von Werkstoffen einer höheren Härtestufe eingeritzt werden. Glas bzw. Quarz gilt mit dem Wert 7 in dieser Skala als hart [34, 52]. Der in Kapitel 3 beschriebene Kratzversuch zum Erzeugen von Oberflächenzerkratzen greift auf dieses MOHSSche Prinzip zurück. Die Härte von Glas ist abhängig von der Glaszusammensetzung: mit steigendem Gehalt an Alkaliionen und OH-Gruppen sinkt die Oberflächenhärte. Enthaltene Calcium-, Magnesium-, Bor- und Aluminiumoxide steigern die Härte [10].

2.4 Entstehung von Scuffing durch Materialbeanspruchung

Ein mehrwegfähiges Packmittel für Getränke muss bereits bei der Herstellung und vor allem im Laufe seiner meist mehrjährigen Nutzungsdauer verschiedenen Beanspruchungen standhalten. Bild 2.3 zeigt schematisch die für Mehrweggebinde in Frage kommenden Beanspruchungen und Einflüsse am Beispiel der Glasflasche.

Bild 2.3 zeigt die normgerechte Verwendung der verpackungstechnischen Begriffe: Packstoff und Packmittel nach DIN 55405 Teil 2 und 3 [24]. Es wird deutlich, dass bereits die verfahrens- und fertigungstechnischen Einflüsse bei der Herstellung der Packmittel bestimmte Materialeigenschaften des Packmittels (Flasche) prägen. Hierbei sind vor allem die durch die Formgebung und Rückkühlung bedingten Eigenspannungen und die bereits hier entstehenden Oberflächenbeschädigungen sowie die geometrischen Abmessungen zu nennen [32]. Außerdem werden auch fertigungsbedingte Oberflächenstrukturen unter Ausbilden von Reaktionsschichten mit einer teilweise vom Grundwerkstoff abweichenden chemischen Zusammensetzung und Mikrostruktur sowie Kerben und Rissen geschaffen.

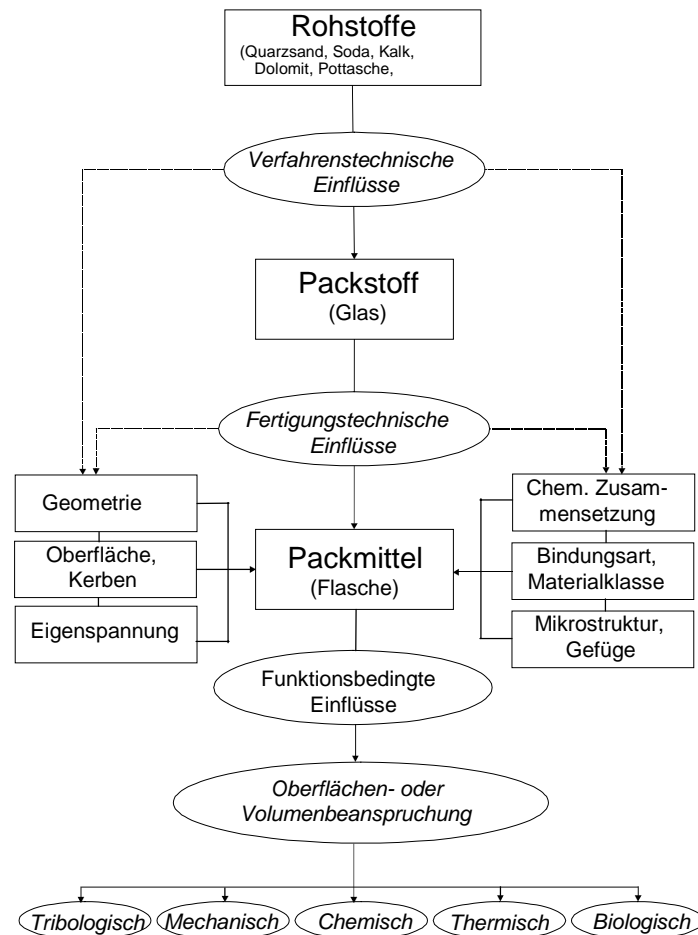


Bild 2.3. Herstellungs- und funktionsbedingte Einflüsse und Beanspruchungen auf Mehrweg-Glasflaschen [52]

Bei der Nutzung des Packmittels ist dieses verschiedenen funktions- und anlagebedingten Beanspruchungen ausgesetzt. Diese Beanspruchung führen entweder zu einer Oberflächenbeanspruchung oder einer Volumenbeanspruchung (Verformung). Im Folgenden werden die möglichen tribologischen, mechanischen, chemischen, thermischen und biologischen Beanspruchungen und deren Folgeerscheinungen für Glasflaschen kurz erläutert:

- Tribologische Beanspruchung durch Kontakt mit Gegenkörpern in Relativbewegung (andere Flaschen, Bauteile von Einzelaggregaten, usw.): Verschleiß, Kontaktdeformation.
- Mechanische Beanspruchung durch inneren Überdruck oder Schlag: Ermüdung, Bruch.
- Chemische Beanspruchung durch Kontakt mit Flüssigkeiten: Korrosion.
- Thermische Beanspruchung beim Reinigen, Heißabfüllen, Vorspannen mit Dampf und Pasteurisieren: Ermüdung, Bruch.
- Biologische Beanspruchung durch Mikroorganismen: Korrosion durch Stoffwechselprodukte.
- Beanspruchung durch Klima, Umwelteinflüsse: Altern, Verschmutzung, Verwitterung.

Mögliche Beanspruchungen durch Strahlung, elektrischen Strom und Strömungsbeanspruchung im Kontakt mit strömenden Medien spielen speziell bei Flaschenglas keine Rolle.

2.4.1 Tribologische und mechanische Beanspruchung

Die tribologische Beanspruchung ist eine Untergruppe der mechanischen Beanspruchung und in der Praxis treten oft beide Beanspruchungsarten gleichzeitig auf, so dass diese in einem gemeinsamen Kapitel behandelt werden. Tribologie ist die Wissenschaft, Lehre und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung, die durch Reibung zum Verschleiß führt [52]. Durch tribologische Beanspruchung kann es zur Oberflächenzerrüttung und Abrasion mit Mikrostrukturänderungen bis hin zur Rissbildung kommen. Zu weiteren für Flaschenglas relevanten mechanischen Beanspruchungsarten sind die Schlag-, Zug-, Biege-, beanspruchungen zu zählen.

Ritzspuren in der Glasoberfläche, beispielsweise erzeugt durch eine Nadel, zeigen kreisbogenförmige, gleichmäßig angeordnete Mikrorisse entlang der Kratzspur auf [4, 115]. Diese Mikrorisse werden durch leichtes Abätzen der Glasoberfläche mit HF-Säure im Mikroskop sichtbar. AUGUSTSSON [4] zeigte, dass an den Mikrorissen Spannungsspitzen auftreten, die Ausgangspunkt für Glasbruch sein können. Außerdem konnte er mit kleiner werdendem Reibungskoeffizienten zwischen der Glasoberfläche und dem Kratzkörper kleinere Mikrorisse beobachten. ZAGAR [115] beschreibt, dass durch die Form der Mikrorisse Rückschlüsse auf den Kratzkörper gezogen werden können. Die Radien der Mikroriss-Kreisbögen entsprechen etwa dem Radius des Kratzkörpers. Die konvexe Seite des Kreisbogens zeigt dabei in die Richtung des sich weiterbewegenden Kratzkörpers. Bei Kratzspuren durch rollende Körnchen sind die Kreisbögen genau entgegengesetzt angeordnet.

Berechnungen zu den wirkenden Kräften und zum Bewegungsverhalten auf Stetigförderern, wie sie Flaschenförderketten darstellen, sind vergleichsweise kompliziert, da die Einzellasten (Flaschen) nicht fest auf dem Flaschenförderer stehen und Relativbewegung dazu ausführen [71]. Zu Relativbewegungen kommt es beispielsweise:

- beim Überschieben von Flaschen auf andere Flaschenförderketten (paralleler Überschub, 90°-, 180°-Umlenkung, Überschubblech, Flaschenverteilungen),
- in der Stauzone beim Auffüllen eines Flaschenpuffers,
- beim Abweisivorgang an einem Flaschenführungsgeländer,
- bei Flaschenstau mit weiter laufenden Flaschenförderketten.

Für die Zerkratzung von Glasflaschen sind vor allem die Relativbewegungen von Flaschen untereinander von Bedeutung.

2.4.1.1 Bedeutung der Reibungskoeffizienten

Aus theoretischen Berechnungen zur Beanspruchung von Flaschen auf Förderketten, wie sie von GABRIEL [40] und MÜLLER [71] durchgeführt wurden, geht hervor, dass die Haft- und Gleitreibung der Flaschen auf den Scharnierbandketten, der Flaschen untereinander sowie der Flaschen an den Geländerführungen maßgeblich sind. Eine einzelne Flasche auf einer Scharnierbandkette kann lediglich eine Kraft in Höhe der Haft- bzw. Gleitreibungskraft weitergeben. Bei mehreren Flaschen können sich diese Kräfte auch summieren [40], sie sind jedoch immer von den Reibungskoeffizienten zwischen

- Flaschen und Förderkette,
- Flasche und Flasche,
- Flasche Geländerführung
- sowie Flasche und Bauteil eines Einzelaggregates (Einteilschnecke, Drehstern, Führungselement) abhängig.

Die Haft- bzw. Gleitreibungskräfte F_{HR} bzw. F_{GR} berechnen sich nach folgenden Formeln:

$$\begin{aligned} F_{HR} &= \mu_{HR} \cdot F_N \\ F_{GR} &= \mu_{GR} \cdot F_N \end{aligned} \quad (2.4)$$

Die Normalkraft F_N , die senkrecht zur Förderkette wirkt, berechnet sich im ebenen Fall aus dem Produkt der Masse einer Glasflasche m_{Fl} in kg und der Erbeschleunigung g mit $9,81 \text{ m/s}^2$:

$$F_N = m_{Fl} \cdot g \quad (2.5)$$

Im Fall eines Transportes der Flaschen auf einem geneigten Förderer mit einem Neigungswinkel γ gegenüber der Horizontalen, ergibt sich eine andere Normalkraft F_N :

$$F_N = m_{Fl} \cdot g \cdot \cos \gamma \quad (2.6)$$

Außerdem muss noch die Hangabtriebskraft F_H berücksichtigt werden. Beim Fördern der Flaschen abwärts ergibt sich die übertragbare Kraft im Falle eines Aufeinandertreffens zweier Flaschen aus der Summe der Hangabtriebskraft F_H und der Haftreibungskraft F_{HR} . Ein Erhöhen des Neigungswinkels γ , beispielsweise um 6° , führt bei abwärts gerichtetem Fördern zum Verdoppeln der Beanspruchung auf die Flaschen. Beim Fördern aufwärts wirkt die Hangabtriebskraft der Reibungskraft entgegen und muss abgezogen werden:

$$F_H = m_{Fl} \cdot g \cdot \sin \gamma \quad (2.7)$$

Bei zu großen Neigungswinkeln γ kann die Hangabtriebskraft F_H größer sein als die Reibungskraft: $F_H > F_{HR}$. Dieser Fall tritt für $\mu_{HR} < \tan \gamma$ auf. Anschaulich bedeutet dies, dass die Flaschen auf der Förderkette abwärts rutschen.

Berühren die Flaschen eine Geländerführung, so ist der Reibungskoeffizient zwischen Glasflasche und dem Werkstoff der Geländerführung maßgebend für den Reibwiderstand. Die Haftreibungskoeffizienten μ_{HR} und die Gleitreibungskoeffizienten μ_{GR} können für alle möglichen Reibpaare beim Transport der Flaschen in den Abfüllanlagen experimentell bestimmt werden. Dabei vorkommende Reibpaare: Glas/Glas, Glas/Metall, Glas/Kunststoff. Dabei sind die Haftreibungskoeffizienten immer größer als die Gleitreibungskoeffizienten. Einige ausgewählte Reibpaare bei unterschiedlichen Bedingungen wurden in dieser Arbeit bestimmt (siehe Kapitel 4).

Der Reibungskoeffizient zwischen Flasche und Förderketten kann durch den Einsatz geeigneter Kettenschmiermittel optimiert werden. Hier sind Gleitreibungskoeffizienten zwischen 0,10 und 0,15 zu erreichen [37]. Die Gleitreibungskoeffizienten sollten zwar theoretisch unabhängig von der Relativgeschwindigkeit sein, Messungen von GABRIEL zeigten bis zu einer Differenzgeschwindigkeit von 0,25 m/s größere Gleitreibungskoeffizienten mit steigender Relativgeschwindigkeit zwischen Flasche und Förderkette [40].

2.4.1.2 Tribologische Beanspruchung auf den Förderketten - Staudruck

Infolge eines gestoppten oder langsam laufenden Einzelaggregates in einer Flaschenabfüllanlage werden auf den vorgeschalteten Transportstrecken Flaschen auf Flaschenförderketten mit mehreren parallelen Förderketten, die als Flaschenpuffer fungieren, aufgestaut. Hier laufen die Flaschenförderketten mit höherer Geschwindigkeit als der darauf befindliche Flaschenpulk, $v_B > v_P$. Es bildet sich ein geschlossenes, deterministisches Haufwerk (Bild 2.5) dicht gepackter Flaschen.

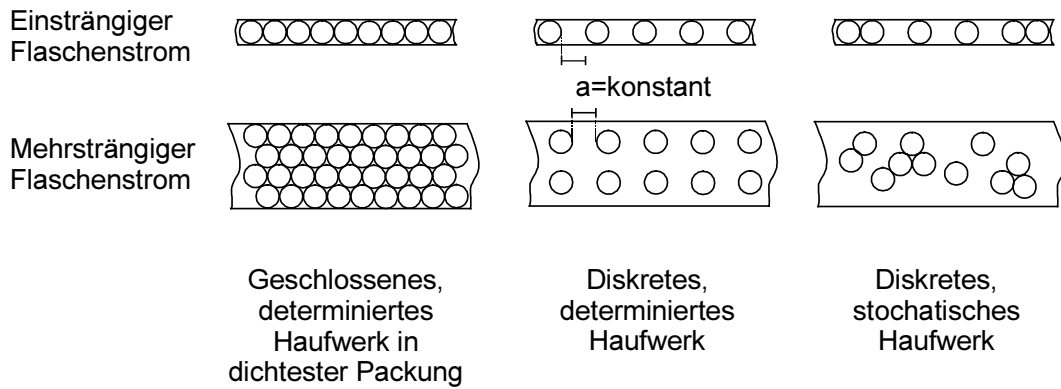


Bild 2.4. Beispiele realer Flaschenformationen im ein- und mehrsträngigen Flaschenstrom [40]

Beim Stau im einsträngigen Flaschenstrom wirkt auf die vorderste Flasche eine Staukraft F_P , die sich aus der Summe der Gleitreibungskräfte zwischen den Flaschen und der Förderkette berechnet. Als Vereinfachung wird die Reaktion der Flaschen mit der Geländerführung nicht berücksichtigt:

$$F_P = \mu_{GR} \cdot m_{Fl} \cdot g \cdot n_{Fl} \quad (2.8)$$

wobei n_F Anzahl der Flaschen in einer Flaschenreihe (einsträngiger Flaschenstrom) bzw. Anzahl der Flaschen im gestauten Pulk (mehrsträngiger Flaschenstrom).

Im mehrsträngigen Pulk geht in die Berechnung noch die Anzahl der Flaschenreihen n_R ein:

$$F_P = \frac{\mu_{GR} \cdot m_{Fl} \cdot g \cdot n_{Fl}}{n_R} \quad (2.9)$$

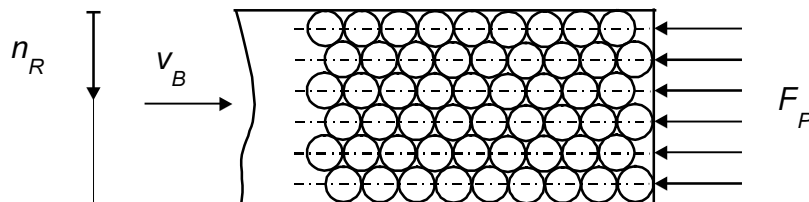


Bild 2.5. Modell eines Kraftfeldes am gestauten Flaschenpulk

Die Flaschen im Pulk werden durch den sich aufbauenden Staudruck aneinander gepresst. Durch Verrutschen, leichtes Drehen bzw. Bewegungen der Flaschen relativ zueinander wirkt diese Staukraft zwischen den Flaschen, was je nach Größe der wirkenden Staukraft durchaus zu Beschädigungen der Glasoberflächen führen kann. Die berechnete Staukraft F_P gilt nur für die Flaschen in der vordersten Reihe. Bild 2.5 zeigt schematisch den Spannungsverlauf im Pulk. Die Staukraft F_P kann durch Anpassen der Flaschenanzahl n_{Fl} theoretisch für jede Flasche im Pulk berechnet werden. Dabei dürfen nur Flaschen, die in Flaschentransportrichtung gesehen hinter der betrachteten Flasche stehen, gezählt werden.

Tabelle 2.2. Beispielhafte Werte der Einflussgrößen auf die Staukraft F_P

Gleitreibungskoeffizient		Gewicht NRW-Flaschen			
μ_{GR}	0,15	m_{Fl} voll	0,89 kg	m_{Fl} leer	0,39 kg

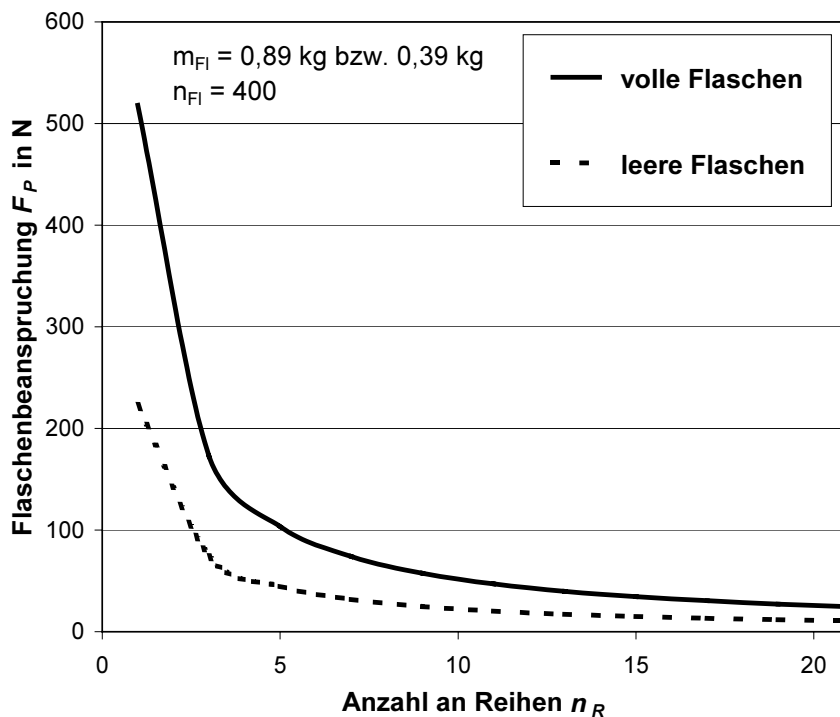
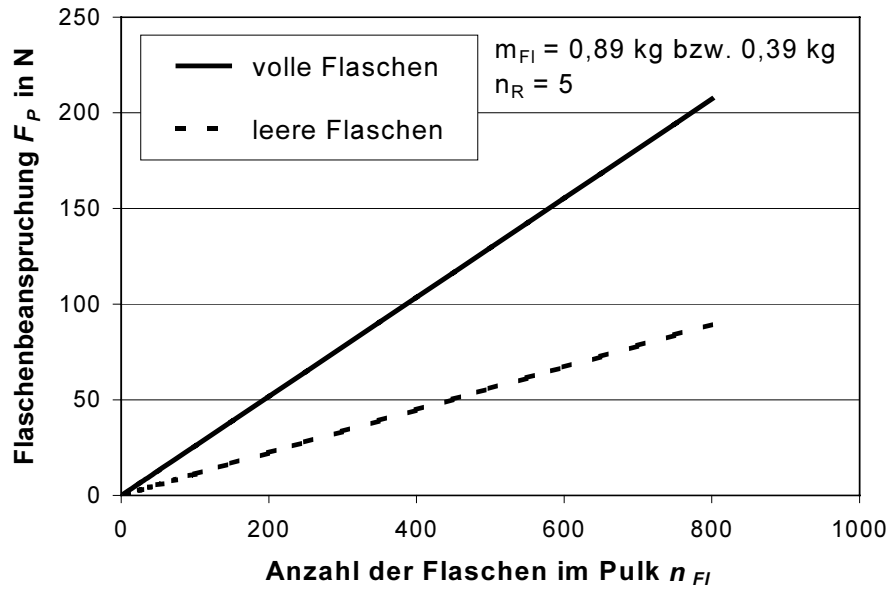


Bild 2.6.1./2. Beanspruchung der Flaschen durch die Staukraft im Pulk bei fünf Flaschenreihen bzw. 400 Flaschen im Speicher

Bild 2.6 zeigt welche Flaschenbeanspruchung in einem Flaschenförderer mit fünf ausgebildeten Flaschenreihen im Pulk in Abhängigkeit der Anzahl an aufgestauten Flaschen entstehen kann. Dabei wurden typische Werte für die Größen μ_{GR} und m_{FI} für volle und leere NRW-Flaschen (Tabelle 2.2) verwendet.

Der Staudruck F_P steigt proportional mit der Anzahl der Flaschen im Pulk n_{FI} bzw. dem Verhältnis n_{FI}/n_R an. In Bild 2.6.2 ist deutlich der flaschenschonende Effekt von breiten,

kurzen Flaschenspeichern gegenüber langen, schmalen durch einen geringeren Staudruck zu sehen. Zwar ergeben sich bei breiteren Flaschenspeichern bis zum Auffüllen des Speichers eine höhere Anzahl von Stoßprozessen, der übertragene Schlagimpuls ist jedoch aufgrund der kleineren Kettengeschwindigkeiten eines breiteren Speichers kleiner. Von PROBST [83] hingegen wird als Maßnahme zur Lärminderung der Einsatz von langen, schmalen Speichern empfohlen. Auch in anderen Bereichen der Abfüllanlagen wird deutlich, dass der viel zitierte Zusammenhang, "an besonders lärmintensiven Abschnitten einer Flaschenabfüllanlage werden die Flaschen auch besonders stark beansprucht", nicht allgemein angewandt werden kann. Die Lärmemission ist abhängig von der Relativgeschwindigkeit beim Zusammenstoß, so dass sich diese Aussage lediglich auf die Schlagbeanspruchung der Flaschen bezieht.

2.4.1.3 Schlagbeanspruchung

Die Schlagbeanspruchung kann zu Mikrorissen und Absprünge im Flaschenglas sowie zum Bruch der Flaschen führen. Da die Flaschen nach dem Aufprall durch die Flaschenförderketten aufeinander gepresst werden, können durch das anschließende Aneinanderreiben der Flaschen Zerkratzen an den Reibringbereichen entstehen.

Das Aufeinanderprallen von Einzelflaschen auf eine oder mehrere stehende Flaschen im Pulk führt zu Schlagbeanspruchungen. Physikalisch gesehen handelt es sich bei den Glasflaschen um einen teilelastischen Stoß. Ein kleiner Teil der durch den Stoß übertragenen Energie geht durch Reibungsvorgänge im Innern der Flasche (Verformungsarbeit) verloren. Beim teilelastischen Stoß gilt für den Zusammenhang der Geschwindigkeiten der Flaschen 1 und 2 vor dem Stoß v_{F11} und v_{F12} und nach dem Stoß c_{F11} und c_{F12} :

$$k \cdot (m_{F11} \cdot v_{F11} + m_{F12} \cdot v_{F12}) = (m_{F11} \cdot c_{F11} + m_{F11} \cdot c_{F12}), \quad (2.10)$$

wobei k die Stoßzahl darstellt. Die Stoßzahl beschreibt den Energieverlust durch Verformungsarbeit beim teilelastischen Stoß. Die Stoßzahl ist eine Materialkonstante und beträgt für Glas $k = 0,94$ bei Aufprallgeschwindigkeiten < 3 m/s [65]. Die Summe der Geschwindigkeiten vor dem Stoß ist größer als die nach dem Stoß. Für den Schlag zweier Einzelflaschen gilt $m_{F11} = m_{F12}$ wodurch sich Gleichung 2.9 vereinfacht zu:

$$k \cdot (v_{F11} + v_{F12}) = c_{F11} + c_{F12}. \quad (2.11)$$

Der durch den Stoß übertragene Schlagimpuls I ist von der Differenzgeschwindigkeit Δv_{F1} der Flaschen und der Masse der Flaschen m_{F1} abhängig.

$$I = m_{F1} \cdot \Delta v_{F1}. \quad (2.12)$$

Aus der Gleichung 2.12 geht hervor, dass vor allem volle Flaschen, aufgrund ihres höheren Gewichts, durch Schlagbeanspruchungen beschädigt werden können.

Nach BUDD und CORNELIUS [12] werden durch den Schlag auf die Seitenwand einer Flasche drei unterschiedliche Spannungen hervorgerufen:

- Kontaktspannung auf der äußeren Glasoberfläche unmittelbar am Schlagpunkt,
- Biegespannung auf der inneren Seite der Glasoberfläche unmittelbar am Schlagpunkt,
- Scharnierspannungen an der inneren und äußeren Glasoberfläche entlang des Umfangs der Flasche.

Meist geht ein Flaschenbruch durch Schlag auf die Scharnierspannungen zurück, da sich diese am weitesten über die Flaschenoberfläche ausbreiteten und so am wahrscheinlichsten auf eine Oberflächenbeschädigung oder eine andere Schwachstelle der Flasche treffen.

RAWSON [87] entwickelte Gleichungssysteme mit denen die durch Stoß hervorgerufenen Spannungen in der Seitenwand einer Flasche berechnet werden können. Ein Vergleich mit realen Messwerten bestätigte seine Modellrechnungen.

2.4.2 Chemische Beanspruchung

Der zweite für die Entstehung von Scuffing verantwortliche Effekt ist die Korrosion der Glasoberfläche in der Flaschenreinigungsmaschine. Zuerst werden die praktischen Anforderungen an die Flaschenreinigung und die üblichen Reinigungsbedingungen dargestellt. Im Anschluss folgt eine Literaturübersicht zum Thema Glaskorrosion.

2.4.2.1 Chemische Beanspruchung der Oberflächen in der Flaschenreinigungsmaschine

Das Schädigungspotenzial sowie auch der Reinigungseffekt für die Glasoberfläche in der Flaschenreinigungsmaschine werden von vier Einflussgrößen bestimmt. Diese sind in Bild 2.7 anhand des SINNERSchen^(*) Kreises für den Reinigungseffekt anschaulich dargestellt: Chemikalieneinsatz, Temperatur, Kontaktzeit und Mechanik. Die mechanische Reinigung (Spritzwirkung) in der Flaschenreinigungsmaschine kann hinsichtlich der Glaskorrosion vernachlässigt werden. Es gilt also die restlichen drei Einflussgrößen zu optimieren, um neben der Hauptaufgabe, der hygienischen Reinigung der Flaschen, möglichst die Glasschonung zu berücksichtigen.

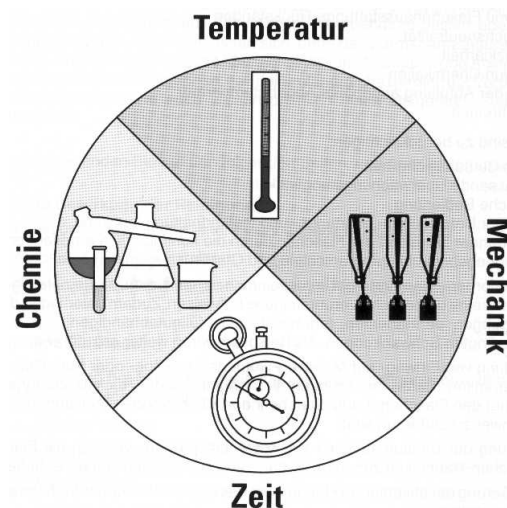


Bild 2.7. Die vier wichtigsten Einflussgrößen für den Reinigungseffekt in einer Flaschenreinigungsmaschine (SINNERScher Kreis) [5]

^(*) Der SINNERSche Kreis ist in der Reinigungstechnik ein anerkannter Begriff. Der Namenspathe des Begriffs, Herr SINNER, war ein Tensid-Chemiker bei der Firma Henkel, Düsseldorf, zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts.

Eine Flaschenreinigungsmaschine kann in die folgenden drei Zonen eingeteilt werden:

- Vorweichzone: alle Vorspritzungen und Vorweichen, vom Einlauf in die Flaschenreinigungsmaschine bis zum Eintauchen in die heiße Weichlauge
- Laugenzone: Laugenbehandlungsbereich, vom Eintauchen in die Weichlauge bis zum Erreichen der Zwischenspritzung,
- Spülzone: Summe aller Wasserzonen (Abkühl- und Spülphasen) bis zur Abgabe der Flasche aus der Flaschenreinigungsmaschine.

Die Bedingungen in diesen Zonen werden nun erläutert.

Vorweichzone

Nach dem Einfahren der Flaschen in die Flaschenreinigungsmaschine wird zuerst deren evtl. enthaltene Restflüssigkeit entleert. Anschließend wird der anhaftende Schmutz in einem Tauchbad und/oder einer Vorspritzung eingeweicht und gegebenenfalls grober Schmutz entfernt. Durch die Vorweichen oder Vorspritzungen kann der Schmutzeintrag in die nachfolgende Weichlauge verringert werden. Die Temperaturen in der Vorweichzone betragen maximal 60 °C. Meist wird für diese Zone Wasser der Spülzonen noch einmal verwendet, so dass meist nur eine niedrige NaOH-Konzentration vorliegt. Durch diese meist milden Bedingungen wird die Glasoberfläche nicht angegriffen.

Laugenzonen

Im alkalischen Milieu der Weichlaugezone bei hohen Temperaturen findet die stärkste Korrosion der Glasoberfläche statt. In der Weichlauge sollte beim Reinigen von Bierflaschen eine Laugenkonzentration (NaOH) von 1,5-1,8 % ausreichend sein [5]. Lediglich zum Entfernen von aluminiumhaltigen Etiketten und Halsfolierungen kann eine höhere NaOH-Konzentration bis etwa 2,0 % notwendig werden. Die Laugenkonzentration sollte mittels Leitfähigkeitsmessung kontinuierlich kontrolliert und vollautomatisch eingestellt werden. Laut "Handbuch für die Reinigung von Mehrweg-Glasflaschen" eines AUTORENTEAMS DES BIBELRIEDER KREISES [5] sollte im Sinne einer guten Schmutzlösung die Temperatur der Weichlauge bei maximal 83 °C liegen. Durch höhere Temperaturen können die Verunreinigungen verseifen und schlechter abgelöst werden.

Nachfolgende Laugenbäder bzw. -spritzungen müssen lediglich zu Betriebsbeginn eine NaOH-Dosierung erhalten, danach reicht die kontinuierliche Laugenzudosierung über die Verschleppung aus den vorherigen Laugen aus. Jedoch sollte hier ein maximaler Wert von 0,8 % durch kontinuierliche Verdünnung oder batchweisen Austausch der Bäderinhalte nicht überschritten werden. Die Temperaturen liegen mit 60-70 °C deutlich unter denen der Weichlauge. In den Laugenspritzungen wird durch den Spritzstrahl noch anhaftender Schmutz mechanisch gelöst. Durch die kurzen Einwirkzeiten bei nur niedrigen Laugenkonzentrationen tragen die Laugenspritzungen nur wenig zur Glaskorrosion bei.

Eine gesamte Laugentauchzeit von 6 min ist für die Reinigung von Bierflaschen normalerweise ausreichend. Bei hartnäckigen Schimmelbelägen und angetrocknetem Schmutz können jedoch längere Laugentauchzeiten von bis zu 14 min notwendig sein [5]. Aus mikrobiologischer Sicht ist bereits eine Laugenkontaktzeit von 5 min bei einer NaOH-Konzentration größer 1 % und einer Temperatur von mindestens 58 °C ausreichend [64].

Spülzone

Die nachfolgenden Warm- und Kaltwasserzone(n) dienen dem weiteren mechanischen Entfernen bereits gelöster Schmutzstoffe, dem Ausspülen der Laugenreste und auch dem Abkühlen der Flaschen. Aufgrund der Reinigungsbedingungen und der nur kurzen Einwirkzeiten in diesen Zonen wird die Glasoberfläche hier nicht mehr angegriffen. Die Temperaturen der Warmwasserzonen liegen üblicherweise zwischen 40-50 bzw. 30-40 °C, in den Kaltwasserzonen um 20-30 °C. In der Warmwasserzone werden, je nach Wasserhärte, noch einmal Härtestabilisatoren eingesetzt. Bei Wasserhärten von 4-8°dH bildet sich in den Bädern der Flaschenreinigungsmaschine ein dünner Kalkschutzfilm und außerdem können gute Ergebnisse für den Reinigungseffekt sowie die Mikrobiologie erreicht werden [35]. Desinfektionsmittel auf der Basis von aktivem Chlor in der Form von Natriumhypochlorid, Chlordioxid oder Peressigsäure, die eine Rekontamination der gereinigten Flaschen vermeiden, werden teilweise in den Wasserzonen eingesetzt. Als letzte Spritzung werden die Flaschen mit Frischwasser von Trinkwasserqualität ausgespült.

Aus den Erläuterungen zu den einzelnen Zonen geht deutlich hervor, dass die Korrosion an der Glasoberfläche in den Flaschenreinigungsmaschinen hauptsächlich in der Laugenzone stattfindet. Hier können als Hauptursachen die NaOH-Konzentration, andere Inhaltsstoffe der Reinigungslösung, die Temperatur sowie die Verweilzeit in der Weichlauge verantwortlich werden.

2.4.2.2 Glaskorrosion

Bei Glas wird unter Korrosion die chemische Reaktion mit Wasser bzw. wässrigen Lösungen verstanden. Im Falle der Flaschenreinigung ist vor allem die Reaktion mit alkalischen Lösungen von Bedeutung. Durch die aus der Dissoziation des Wassers entstehenden Hydroxid- (OH^-) und Hydroniumionen (H_3O^+) wird die Glasoberfläche angegriffen. Je nach pH-Wert (Überwiegen eines der beiden Dissoziationsprodukte) in der wässrigen Lösung können die dabei ablaufenden Reaktionen in drei Bereiche eingeteilt werden [67]:

- pH <4 echter Säurenangriff,
- pH 5-9 hydrolytischer Angriff,
- pH >10 echter Laugenangriff.

Der pH-Wert einer 2,0 %igen Weichlauge beträgt etwa 12-13, so dass in der Weichlauge einer Flaschenreinigungsmaschine ein echter Laugenangriff vorliegt.

Tabelle 2.3 zeigt die chemische Beständigkeit der drei Hauptglastypen gemäß den angegebenen DIN-Verfahren. Je kleiner die Klasse, desto beständiger zeigte sich die Glasprobe im jeweiligen Versuch. Ohne Oberflächennachbehandlung (Schliff, Politur) hergestellte Gläser wie Flaschenglas weisen nach dem Formen an der Oberfläche eine von der im Glasinneren abweichende Zusammensetzung auf [77, 94]. Dies wird durch die Verwendung von ganzen Glasbehältnissen oder Glasausschnitten bei den jeweiligen Prüfungen berücksichtigt. Nach einer definierten Behandlung einer Glasprobe mit Lauge bzw. Säure wird entweder deren Gewichtsverlust bestimmt oder die in Lösung gegangenen Glaskomponenten messtechnisch erfasst.

Tabelle 2.3. Chemische Beständigkeit der [77, 78, 79]

Prüfverfahren/ Glasyt	Säurebeständigkeit	Hydrolytische Beständigkeit	Laugenbeständigkeit
	4 Klassen nach DIN 12116 [20]	4 Klassen nach DIN 52339 [23]	3 Klassen nach DIN 52322 [22]
Natronkalkglas	1	3	1-2
Borosilicatglas	1	1	2
Bleisilicatglas	1	-	2

Tabelle 2.3 zeigt für Flaschenglas eine vergleichsweise gute Laugen- und Säurebeständigkeit, jedoch eine kleine hydrolytische Beständigkeit. Im Folgenden werden die in Frage kommenden Korrosionsmechanismen für die Reinigung von Getränkeflaschen betrachtet. In einer Flaschenreinigungsmaschine findet der chemische Angriff ausschließlich im neutralen und alkalischen Bereich statt. Durch den alkalischen Angriff wird Glasmaterial an der Oberfläche gleichmäßig abgetragen. Dabei entstehen meist glatt abgetragene Oberflächen, die keine optisch auffallenden Veränderungen aufweisen [67].

An der Grenzfläche zwischen Glas und Flüssigkeit können drei typische Korrosionsreaktionen unterschieden werden:

- Partielle Hydratation,
- Alkali-Auslaugung,
- Netzwerkauflösung.

Diese Reaktionsmechanismen gelten sowohl für neues, noch nicht chemisch vorgeschädigtes, als auch für bereits gebrauchtes Glas [68]. Die Korrosionsreaktionen werden im Folgenden näher erläutert.

Partielle Hydratation

Die Hydratation, auch Hydratisierung genannt, ist die Vorbereitung für die beiden nachfolgenden Reaktionen Alkali-Auslaugung und Netzwerkauflösung [89, 97]. Bei der Hydratation diffundieren H₂O-Moleküle ins Glas und es bildet sich eine Gelschicht. Je mehr Hohlräume die unregelmäßige Glasstruktur aufweist, desto mehr H₂O-Moleküle können ins Glas diffundieren [94]. Die eingedrungenen Wassermolekülen reagieren mit den Si-O-Si-Bindungen oder Si-OH-Gruppen [105]. Die Hydratisierung ist abhängig von der Art und dem Anteil der im Glas enthaltenen Alkalimetallionen. Je kleiner die Alkalimetallionen, desto höher ist ihre Ladungsdichte und das Glas kann weniger hydratisiert werden [31], so nimmt die Löslichkeit des Glases je nach der Zusammensetzung mit einem hohen Gehalt von K über Na zu Li ab. Je höher die Temperatur, desto stärker kann das Glas hydratisiert werden [105].

Alkali-Auslaugung

Die Auslaugung stellt einen einfachen Ionenaustauschprozess zwischen dissoziiertem Wasser (H⁺ und OH⁻) und bestimmten Netzwerkwandlern im Glas nach dem Schema der Gleichung 2.10 dar. Die Glasoberfläche verarmt durch diesen Prozess an Alkaliionen, weshalb auch von Auslaugung gesprochen wird.



Manche Netzwerk wandler, wie die Alkalimetalle, sind im Netzwerks des Glases beweglich. Sie können von Hohlraum zu Hohlraum wandern, wobei die lokale elektrische Neutralität

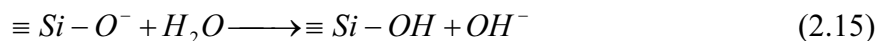
Manche Netzwerkwandler, wie die Alkalimetalle, sind im Netzwerks des Glases beweglich. Sie können von Hohlraum zu Hohlraum wandern, wobei die lokale elektrische Neutralität gewahrt bleiben muss. Die Alkaliionen diffundieren aus dem Innern des Glases durch die bereits ausgelaugte Schicht an die Grenzfläche zwischen Glas und Lösung. An dieser Grenzfläche findet ein Austausch mit H^+ -Ionen statt [94]. Mit den H^+ -Ionen diffundieren auch H_2O -Moleküle in das Glas (siehe partielle Hydratation). Die Alkaliauslaugung findet hauptsächlich bei pH-Werten im sauren und neutralen Bereich statt, dabei ist das Ausmaß in diesem pH-Wert Bereich unabhängig vom pH [94]. Durch die Alkaliauslaugung werden aus der umgebenden Lösung H^+ - bzw. H_3O^+ -Ionen entzogen, was zu einem allmählichen Ansteigen des pH-Werts führt [94].

Die zur Gruppe der Stabilisatoren zählenden Netzwerkwandler wie Erdalkalimetalle (Ca^{2+} , Mg^{2+}) sind im Gegensatz zu den Alkalimetallen unbeweglich. Sie füllen die Hohlräume und bilden somit eine Barriere gegen das Eindiffundieren von Kationen [97]. So erhöhen CaO-Anteile von bis zu 10 % im Glas die chemische Beständigkeit.

Durch den Ionenaustausch entsteht eine ausgelaugte, gequollene Silicat-Gelschicht, die im sauren und neutralen Milieu nahezu unlöslich ist [16]. Durch den Überschuss an Kationen an der Oberfläche dieser Gelschicht wird teilweise sogar ein Ionenfilm mit Schutzwirkung gegenüber weiterer Auslaugung gebildet. Bestimmte Ionen, wie beispielsweise herausgelöstes K^+ , verbleiben, vor allem bei höheren pH-Werten, in der Auslaugungsschicht [13]. Die gelartige Struktur kann jedoch auch brechen und sich sogar von der Oberfläche lösen, so dass wieder eine neue Grenzschicht Glas-Flüssigkeit entsteht. Die Gelschicht weist einen hohen Gehalt an freiem als auch fest gebundenem Wasser auf [13]. Durch Al_2O_3 kann zum einen die Gelschicht gegen Entmischen stabilisiert [94] und zum anderen durch ein Binden von Na^+ -Ionen die Auslaugung verringert werden [97]. Bei Temperaturen $>80\text{ }^\circ\text{C}$ und pH-Werten >7 wird die gelartige Auslaugungsschicht fester und stabiler, jedoch kehrt die weiche und empfindliche Struktur beim Absenken der Temperatur wieder zurück [13].

Netzwerkauflösung (= Laugenangriff)

Da die Reaktionen zur Netzwerkauflösung nach den Gleichungen 2.11 und 2.12 hauptsächlich im alkalischen Bereich ab $pH >9$ auftreten, wird diese Reaktion auch Laugenangriff genannt [13, 29]. Vor allem durch die, bei hohen pH-Werten, in hoher Konzentration vorliegenden OH^- -Ionen werden die Sauerstoffbrücken der Si-O-Si-Bindungen gelöst.



Reagieren alle vier Bindungen eines SiO_4 -Tetraeders auf diese Weise, gehen die frei werdenden Kieselsäureanionen (SiO_3^{2-}) in Lösung. Durch die Netzwerkauflösung gehen auch andere Glasinhaltsstoffe in Lösung. Die Korrosionsrate ist nach MAZER u. a. [68] von der Anzahl an negativ geladenen Si-O⁻-Gruppen an der Glasoberfläche abhängig. Durch einen Überschuss dieser negativen Ladungen (Si-O⁻) an der Glasoberfläche können die abstoßenden Kräfte der Anionen größer werden als die Bindungsenergien der Si-Bindungen und zum Zerstören der Silicatstruktur führen [98].

Von vielen Autoren wurde experimentell bestätigt, dass die Löslichkeit des Glases mit zunehmendem pH-Wert ansteigt [82, 94]. Bei konstantem pH-Wert ist die gelöste Glasmenge

proportional zur Einwirkzeit. Dies bedeutet auch eine proportionale Zunahme der Schichtdicke der ausgelaugten bzw. abgetragenen Schicht mit der Zeit [67]. Der alkalische Angriff wirkt sich um so stärker aus, je höher der Alkaligehalt des Glases ist, da dann um so mehr bereits gespaltene Si-O-Si-Bindungen vorliegen. Dabei gilt es auch zu berücksichtigen, dass die entstehenden Reaktionsprodukte den weiteren alkalischen Angriff stark beeinflussen können. So konnten in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen, Abspülen oder Verbleiben der Reaktionsprodukte auf der Glasoberfläche, sehr unterschiedliche Ergebnisse beobachtet werden [38]. Der Masseverlust einer Flasche durch Korrosion kann gravimetrisch nachgewiesen werden [82, 98].

Korrosionskinetik

Gemäß ihrer Zeitabhängigkeit wird die Korrosionsreaktion in zwei Phasen eingeteilt, wobei jeweils für die Korrosionsrate Q in Abhängigkeit der Zeit t gilt [13, 46, 68]:

$$\text{Phase 1:} \quad Q \sim t^{1/2} \quad (2.16)$$

Dieser Zusammenhang gilt in der Anfangsphase. Hier ist die Diffusionsreaktion geschwindigkeitsbestimmend. Wasser diffundiert dabei in das Glas, Natrium und andere Ionen heraus. Laut BUNKER u. a. [13] ist die Diffusionsgeschwindigkeit dieser Ionen in der hydratisierten Glasoberfläche entscheidend. Diese Phase ist hauptsächlich durch Alkali-Auslaugung gekennzeichnet.

$$\text{Phase 2:} \quad Q \sim t \quad (2.17)$$

Hier ist die Korrosionsgeschwindigkeit konstant. Die Reaktionen in dieser Phase werden durch die Reaktionen in der Grenzfläche zwischen intaktem und ausgelaugtem Glas begrenzt. In dieser Phase kommt es hauptsächlich zur Netzwerkauflösung.

Zwischen den beiden Phasen erfolgt ein kontinuierlicher Übergang, was darauf hindeutet, dass hier die Reaktionen des Ionenaustauschs und der Netzwerkauflösung in Phase 2 gleichzeitig ablaufen. Das Verschieben der ausgelaugten Grenzschicht in Richtung tieferer Glasschichten wird durch die Netzwerkauflösung überlagert. Im Übergangsbereich von Phase 1 zu Phase 2 ist die Geschwindigkeit, mit der die Grenzfläche des Ionenaustauschs ins Glas vordringt, größer als die Netzwerkauflösungsgeschwindigkeit. Es wird hier von einem instationären Zustand gesprochen. Die weitere Auslaugung bewirkt ein immer tieferes Eindringen der Grenzfläche, so dass die auszutauschenden Ionen aus dem Glas eine immer weitere Strecke bis in die Lösung zurücklegen müssen. Die Geschwindigkeit mit der die Grenzfläche wandert nimmt ab, bis sie schließlich gleich der der Netzwerkauflösung ist. Dieses Stadium entspricht dem stationären Zustand der Phase 2.

Bunker u. a. [13] gehen davon aus, dass in den oben genannten Korrosionsphasen nicht nur ein Reaktionstyp, sondern eine Vielzahl von Reaktionen abläuft, die in ihrer Summe den Korrosionstyp, die Kinetik, die Diffusionspartner der Auslaugung und die Korrosionsrate bestimmen.

Die Korrosionsreaktion ist stark von der Temperatur abhängig. In verschiedenen Arbeiten konnte eine Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit k nach der Arrhenius-Gleichung 2.18 gezeigt werden [68, 94, 98], d. h. die Geschwindigkeit nimmt exponentiell mit der absoluten Temperatur zu.

$$k = A \cdot e^{-\left(\frac{E_A}{RT}\right)} \quad (2.18)$$

wobei gilt: A Geschwindigkeitskonstante für $1/T = 0$ in 1/s,
 E_A Aktivierungsenergie der Korrosionsreaktion in J/mol (60-80 kJ/mol),
 R allgemeine Gaskonstante ($R = 8,314 \text{ J/(mol K)}$),
 T absolute Temperatur in K.

Im Temperaturbereich zwischen 0 und 100 °C steigt durch Erhöhen der Temperatur um 20 K die Korrosionsgeschwindigkeit um den Faktor 10 an. Manche Elemente besitzen bei höheren Temperaturen eine höhere Sättigungskonzentration in Lösung, weshalb die Korrosionsreaktion länger in Gang gehalten werden kann. Nicht nur in der Flaschenreinigungsmaschine, sondern immer dann, wenn die Glasoberfläche mit einer Flüssigkeit benetzt ist (beispielsweise beim Lagern), kann sie korrodieren. Wie Gleichung 2.18 zeigt, laufen die Reaktionen aber bei den meist niederen Temperaturen nur sehr langsam ab.

Eine Sonderrolle unter den Inhaltsstoffen bei den Natronkalkgläsern nimmt Magnesium ein. Vor allem bei sehr rauen Oberflächen kann sich bereits ausgelaugtes, gelöstes Magnesium wieder an der Glasoberfläche anreichern und bildet eine Schutzschicht, die ein Auflösen der Si-Bindungen verhindert [11]. KAMIZONO u. a. [60] beschreiben eine solche Präzipitation an der Glasoberfläche auch für Calcium-Ionen. Generell können mehrwertige Ionen wie Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} schwer lösliche Verbindungen mit den freien Silanolgruppen (SiO_2^{2-}) bilden und schützen so in geringen Konzentrationen das Glas vor dem weiteren Laugenangriff [57, 96]. In deionisiertem oder sehr weichem Wasser sind diese Schutzionen nicht enthalten, die Schwelle liegt bei etwa 1 °dH. Auch dispergierend wirkende Agenzien verringern die Korrosion, da sie an der Glasoberfläche schützende Komplexe bilden [98].

Sequestrierende Agenzien, wie beispielsweise EDTA, wirken korrosionsfördernd, da sie auch die Schutzionen aus der Lösung und der Glasoberfläche in Komplexen binden [57]. Auch Phosphate aus Bierresten, Etikettenleim oder Reinigungsadditiven erhöhen die Glaskorrosion. Carbonate, vor allem in Konzentrationen ab 0,2 % Na_2CO_3 , erhöhen den korrosiven Effekt an der Glasoberfläche [49, 57, 67].

Für die Korrosionsreaktion stellt das Verhältnis der Glasoberfläche zum Lösungsvolumen eine wichtige Kenngröße dar [11, 15, 53, 60]. Dieses Verhältnis wird in der Literatur in der Regel mit SA/V (Surface Area/Volumina) abgekürzt. Vor allem bei fortgeschrittener Korrosion, d. h. mit Glasbestandteilen in Lösung, ist der SA/V -Wert nach CLARK [15] von Bedeutung. Dabei wird die Netzwerkauflösung stärker vom SA/V -Wert beeinflusst. Mit steigendem SA/V -Wert wird die Korrosionsrate erhöht. Bei größerem SA/V -Wert ist die Tiefe der ausgelaugten Schicht geringer [11]. In feuchten Räumen können während der Lagerung durch Kondenswasserbildung an der Glasoberfläche flächige Trübungen an Flaschenglas auftreten [53]. Hier liegt aufgrund des sehr kleinen Lösungsvolumens ein sehr großes SA/V -Verhältnis vor.

In der Literatur werden sehr viele Untersuchungen zur Korrosion beschrieben. Beim Übertragen der Ergebnisse verschiedener Gläser ist jedoch besondere Vorsicht geboten. Viele Versuche wurden an Borosilicatgläsern durchgeführt. Teilweise wurden jedoch für

Borosilicat- und Natronkalkgläser gegenteilige Effekte gefunden. Modelle zur Vorhersage der Korrosionsreaktionen wurden vor allem für Borosilicatgläser entwickelt, die für die Endlagerung von Nuklearabfällen eingesetzt werden [45]. In den achtziger Jahren wurde auf diesem Gebiet vermehrt geforscht, da in den USA die Entscheidung zur Lagerung der Nuklearabfälle zugunsten der Glasbehälter fiel. Zur Simulation von Langzeitversuchen wurde mit erhöhten Temperaturen und ungünstigen SA/V -Verhältnissen an diesen Gläsern eine stark beschleunigte Oberflächenkorrosion untersucht [60]. Mittlerweile wurden die Korrosionsmodelle auch für andere Glasarten weiterentwickelt, beispielsweise von RICHTER u. a. [89] für Natronkalkglas für kürzere Zeiträume (Stunden), wobei auch der Einfluss von Oberflächenverletzungen berücksichtigt werden kann.

pH-Wert Abhängigkeit der Korrosionsreaktion

Versuche von MAZER u. a. [68] ergaben, dass zwischen pH 3 und pH 6 die Korrosionsreaktionen nur wenig vom pH abhängig sind. Steigt der pH über 6, so nehmen die Korrosionsraten mit dem pH-Wert leicht zu. EL-SHAMY u. a. [33] untersuchten die Korrosionsraten von Glasproben in Pufferlösungen unterschiedlicher pH-Werte im Bereich von pH 1 bis pH 13. Sie fanden dabei einen Übergang zwischen den beiden Hauptreaktionen der Glaskorrosion Alkali-Auslaugung und Netzwerkauflösung bei pH 9. Im sauren Bereich bis pH 9 findet hauptsächlich Alkali-Auslaugung statt, ab pH 9 bis in den stark alkalischen Bereich löst sich das Glasnetzwerk auf. Den Rückgang der Alkali-Auslaugungsreaktion oberhalb pH 9 sieht DAS [16] in der hohen Konzentration an bereits in Lösung gegangenen Alkaliionen, wodurch auch die Diffusion der Alkaliionen aus dem Glasinneren zum Erliegen kommt. Die Zeitabhängigkeit der Korrosionsraten wird durch die Gleichungen 2.16 und 2.17 beschrieben. Die Korrosionsraten beider Reaktionen bleiben bis pH 9 konstant. Bild 2.8 zeigt die ermittelte pH-Wert Abhängigkeit der Korrosionsraten [33]. Die gezeigten Kurven stellen Versuche von zwei Gläsern unterschiedlicher Zusammensetzung (Tabelle 2.4) bei einer Temperatur von 35 °C dar. Der Vergleich soll lediglich den qualitativen Verlauf der Korrosionsraten in Abhängigkeit vom pH-Wert verdeutlichen. Die Alkali-Auslaugung in der Vorweich- und Spülzone einer Flaschenreinigungsmaschine sollte in etwa den in Bild 2.8 gegebenen Korrosionsraten entsprechen. Die Netzwerkauflösung in der Weichlauge einer Flaschenreinigungsmaschine findet bei höheren Temperaturen (80 °C) statt, so dass die Korrosionsrate nach der Arrhenius-Temperaturabhängigkeit (Gleichung 2.18) mindestens um den Faktor 20 höher sein wird.

Tabelle 2.4. Versuchsbedingungen nach EL-SHAMY [33]

Versuchsbedingungen	Alkali-Auslaugung (A)	Netzwerkauflösung (B)
Glaszusammensetzung	85% SiO ₂ , 15% Na ₂ O	85 % SiO ₂ , 15% K ₂ O
Angabe der Korrosionsrate in	mg/(g Glas $\sqrt{\text{min}}$)	mg/(g Glas min)
Temperatur	35 °C	35 °C

Durch die alkalische Reinigung wird Glasmaterial von einer homogenen Flaschenoberfläche gleichmäßig abgetragen. Im Glas bereits vorhandene Oberflächenkratzer beschleunigen die Korrosionsreaktion. Durch die Kratzer ist eine vergrößerte Oberfläche und somit ein höheres SA/V -Verhältnis vorhanden, was zu erhöhten Korrosionsraten und lokal erhöhten pH-Werten führt. Außerdem befinden sich auf der vergrößerten Oberfläche auch mehr reaktive Gruppen, die an der Korrosion beteiligt werden können. So werden vorhandene Unregelmäßigkeiten, wie mikroskopisch feine Risse und andere Oberflächenverletzungen, durch die Netzwerk-

auflösung geweitet. Durch das Aufweiten verändert sich die Lichtbrechung an der Oberfläche und zuvor mit bloßem Auge nicht erkennbare Risse werden als weißliche Verfärbungen sichtbar [79]. Beim Abtrocknen der laugebehandelten Glasoberfläche kann es zu einer Kristallbildung von Inhaltsstoffen der Reinigungslösung kommen [67].

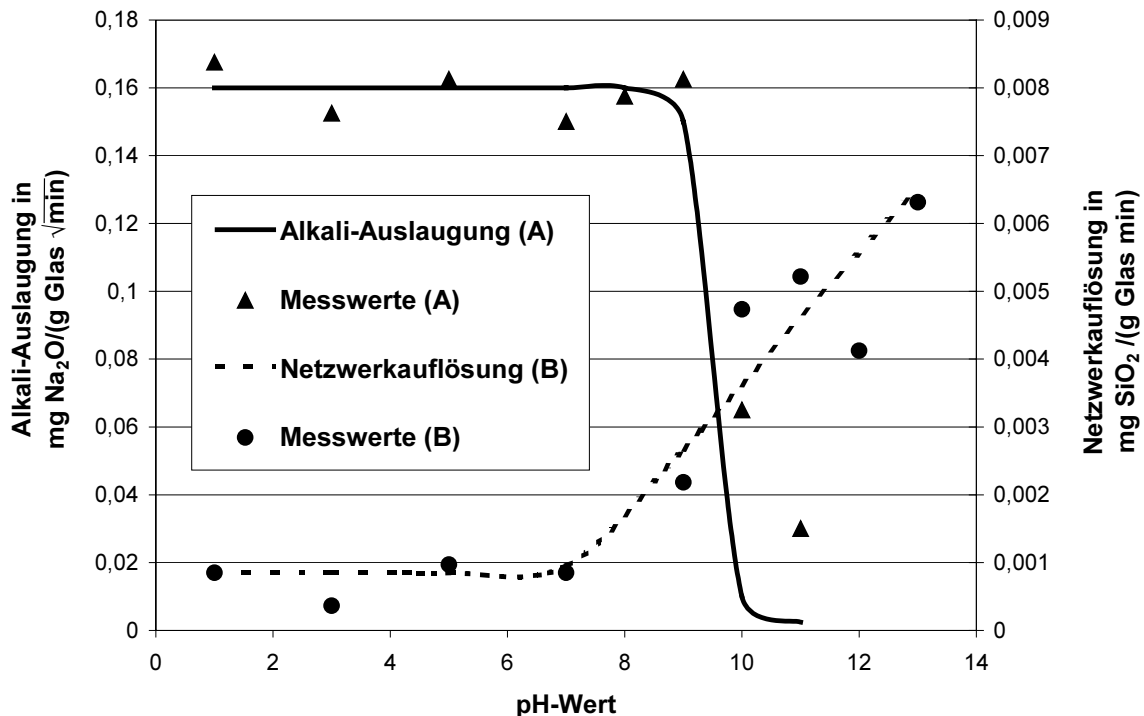


Bild 2.8. pH-Wert Abhängigkeit der beiden Hauptreaktionen bei der Glaskorrosion nach EL-SHAMY u. a. bei 35 °C [33]

Die Glaskorrosion findet bei Glasflaschen nicht ausschließlich an der Glasoberfläche der Flaschenaußenseite statt, sondern auch an der Innenseite. Dies bedeutet, dass sich nach den oben beschriebenen Korrosionsreaktionen auch Glasbestandteile im Füllgut lösen. Die Umgebungsbedingungen, wie pH-Wert des Füllguts (meist leicht sauer bis neutral) und die Temperaturen, sorgen jedoch für einen Übergang an nur vernachlässigbar kleinen Mengen [85].

2.4.3 Zeitlicher Ablauf der Beanspruchungen einer Mehrwegflasche

Die oben genannten Beanspruchungen wirken auf die Mehrwegflaschen in unterschiedlich langen, sich teilweise wiederholenden Zeitintervallen ein. Außerdem kann es zum Überlagern mehrerer Beanspruchungen kommen. Bild 2.9 zeigt den typischen Beanspruchungskreislauf einer Mehrwegflasche. Der aufgezeichnete Kreislauf soll, beginnend bei der entleerten Mehrwegflasche im Stapelkasten vor dem Wiedereinspeisen in die Abfüllanlage, beschrieben werden. Beim Lagern des Leerguts wirken lediglich die bereits durch den Formprozess der Flasche erzeugten Eigenspannungen in der Glaswand. Außerdem finden, je nach Umgebungsbedingungen, die in Kapitel 2.6.2 erwähnten Alterungsprozesse, das Ausheilen von Oberflächenrissen, statt. In der Abfüllanlage wirken von der Flaschenauspackmaschine bis zur Flascheneinpackmaschine unterschiedliche, sich teilweise überlagernde Beanspruchungen auf die Flaschen ein. Auf den Flaschenförderern und in den Einzelaggregaten finden vorwiegend tribologische Beanspruchungen und Schlagbeanspruchungen statt. In der Flaschenreinigungsmaschine ist die Flaschenoberfläche chemischen

Beanspruchungen ausgesetzt. Während des Befüllens werden die Flaschen meist mit einem Überdruck von etwa 2-6 bar beaufschlagt. Bei carbonisierten Getränken bildet sich nach dem Verschließen der Flaschen ein von der Getränketemperatur und der CO₂-Konzentration des Getränks abhängiger, innerer Überdruck aus. Dabei laufen im Glas die in Kapitel 2.6.1 beschriebenen Ermüdungsreaktionen ab. Diese Beanspruchung durch inneren Überdruck bleibt bis zum Öffnen der Flasche durch den Verbraucher erhalten, dann beginnt der beschriebene Kreislauf wieder von vorn.

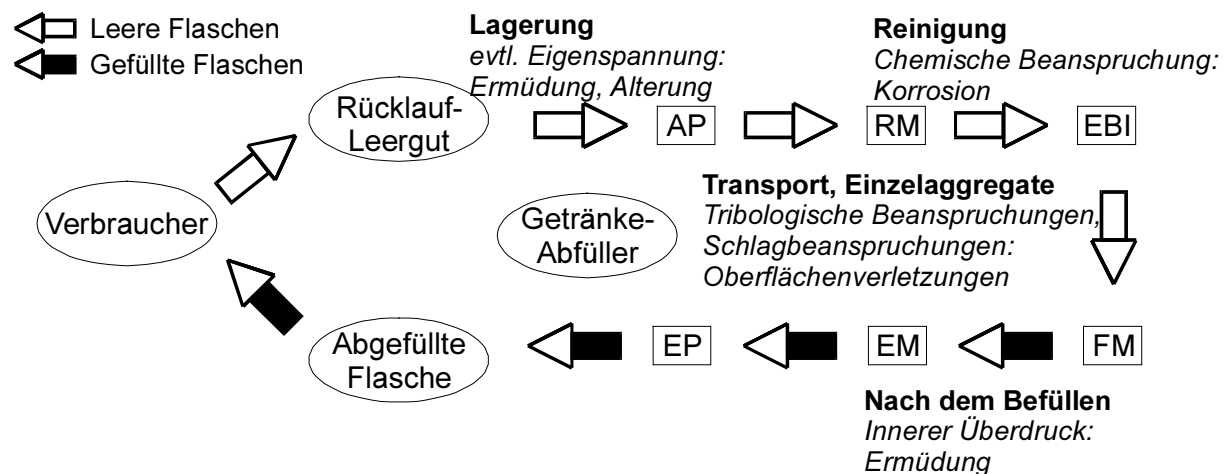


Bild 2.9. Ablauf der Beanspruchungen auf eine Mehrwegflasche

2.4.4 Biologische Beanspruchung

Allgemein wird eine biologische Materialschädigung durch Mikroorganismen, Insekten oder Wirbeltiere bewirkt. Der Werkstoff dient dabei entweder als Nahrung oder er wird speziell bei den Mikroorganismen durch deren Stoffwechselprodukte angegriffen. Eine mögliche Schädigung von Glas durch das Nagen von Insekten und Wirbeltiere kann ausgeschlossen werden.

Biofilme auf Glasoberflächen können sich nur innerhalb von Monaten bilden, so dass eine biologisch induzierte bzw. beschleunigte Korrosion an Flaschenglas nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Eventuell bei längerer Lagerung des Rücklaufleerguts gebildete Biofilme werden beim maschinellen Reinigen der Flaschen wieder abgelöst.

Von DREWELLO und WEISSMANN [26] wurde die mikrobiell unterstützte Korrosion von Glasoberflächen an historischen und technischen (optischen) Gläsern beschrieben. Es wurden vor allem Schimmelpilze und sporenbildende Bakterien als Besiedler der Glasoberflächen ausgemacht. Je nach Glasart, Glaszusammensetzung und den herrschenden Umgebungsbedingungen unterscheidet sich die Zusammensetzung der Mikroflora sowie die Besiedelungsart, die Dicke und Dichte des gebildeten Biofilms. Durch den Befall mit Mikroorganismen, bzw. durch deren aggressiven Stoffwechselprodukte, kann die Korrosion im Vergleich zu Korrosion in wässrigem Medium beschleunigt werden. Die Metaboliten im Stoffwechsel der Mikroorganismen, meist organische Säuren (Glucon-, Oxal-, Zitronensäure), bewirken eine meist punktuelle Abätzung oder beschleunigte Auslaugung der Glasoberfläche. Teilweise konnte sogar eine selektive, auf spezielle, für die Mikroorganismen essentielle Elemente beschränkte Auslaugung der Glasoberfläche beobachtet werden. Durch diese

Reaktionen wird eine hydratisierte Gelschicht gebildet, die bei Erreichen einer bestimmten Schichtdicke bricht, was zur erneuten Schichtbildung führt usw. Von STAUDIGEL u. a. [101] wurde jedoch auch der umgekehrte Fall beobachtet, dass ein Biofilm aus Mikroorganismen als Schutzschicht die Korrosion der Oberfläche verzögert. DREWELLO u. a. [27] beschreiben, dass durch die Auslaugung und Abätzung der Glasoberfläche Spannungen im Glas entstehen können, die sogar zu Rissen oder bis zum Bruch des Glases führen, vor allem bei Gläsern mit einem K_2O/CaO -Verhältnis $<0,91$ (Flaschenglas: 0,1).

Ausgangspunkt für ein mikrobiologisches Wachstum ist eine für Mikroorganismen nutzbare C-Quelle. Diese kann beispielsweise in Form von organischen Verunreinigungen, Polymer-Beschichtungen, Kleb- oder Farbstoffen vorliegen. Günstige Umgebungsbedingungen für Mikroorganismen, wie hinreichende Temperaturen (ab etwa 18 °C) und relative Feuchten (ab etwa 75 %), sind sehr oft beim Lagern der Flaschen im Freien gegeben.

2.4.5 Materialschutz - speziell Verschleißschutz

Um den Verschleiß an Flaschen möglichst gering zu halten, gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Zweckmäßige Gestaltung der Flaschenform (eingezogenen Etikettenbereiche verhindern den großflächigen Verschleiß).
- Aufbringen von Schutzschichten aus verschiedenen Materialien, die sogenannte Vergütung, die die Glasoberflächen schützen (Heißend-, Kaltend-, Nachvergütung).
- Vorspannen (chemisch oder thermisch) der Glasoberfläche, auch Härten genannt. Diese Methoden sind jedoch für Flaschenglas ungeeignet.

2.4.5.1 Oberflächenvergütung

Bereits in der Glashütte erhalten die Mehrwegflaschen eine Heißend- und Kaltendvergütung. Eine eventuelle Nachvergütung könnte in der Flaschenabfüllanlage nach jedem Reinigungsprozess erfolgen.

Heiß- und Kaltendvergütung in der Glashütte

Die Heißendvergütung wird bei einer Glastemperatur der Flaschen von etwa 600 bis 700 °C noch vor dem Kühltunnel vorgenommen. Hierzu werden Metalloxide, wie Zinn- bzw. Titanoxid, in Dampfform oder durch Sprüherstäubung, auf die äußere Flaschenoberfläche aufgebracht. Die Metalloxide füllen die in der Glasoberfläche vorhandenen Mikrorisse auf und erschweren so ein weiteres Ausbreiten dieser Risse. Außerdem besitzt der Metalloxidfilm eine hohe Abriebfestigkeit. Durch die Heißendvergütung wird die Glasoberfläche rauer, sie dient als Haftvermittler zwischen hydrophiler Glasoberfläche und der anschließend aufgetragenen, hydrophoben Polymerlösung der Kaltendvergütung [99]. Die Schichtdicke der Heißendvergütung wird meist in CTU (Coating Thickness Unit) angegeben. Dabei wird in einem einfachen Messverfahren der reflektierte Anteil eines auf die Probenoberfläche gerichteten Lichtstrahls (UV oder Infrarot) gemessen. Die Schichtdicke liegt zwischen 50-60 CTU, was in etwa 12,5-15 nm entspricht (1 CTU = 0,25 nm). Zwischen der Lichtbrechung an der Heißendvergütung und deren Schichtdicke, die beispielsweise mit einem Elektronenstrahl vermessen werden kann, besteht ein linearer Zusammenhang [43]. Nach dem Kühltunnel, bei Temperaturen von etwa 150 °C, wird die Kaltendvergütung in Form von organischen Polymerlösungen (beispielsweise Polyethylen) aufgesprüht. Die Schichtdicke der Kaltendvergütung beträgt etwa 50 nm.

Durch die Kombination der Kalt- und Heißendvergütung wird die Glasoberfläche kratzfester und widersteht etwa den 10-20fachen Anpresskräften ohne Kratzer im Vergleich zur unvergüteten Glasoberfläche. Eine alleinige Kaltendvergütung führt nur zu einer Erhöhung der Kratzfestigkeit um etwa das Doppelte [111]. Durch die Vergütung wird auch die Festigkeit erhöht und die Gleiteigenschaften der Flaschen verbessert. Die beiden Vergütungsschichten bieten jedoch keinen dauerhaften Schutz. Durch wiederholte Reinigungsprozesse wird zuerst die Kaltendvergütung abgewaschen und danach auch die Heißendvergütung durch die Lauge angegriffen. Die Glasoberfläche wird stumpfer und anfälliger für mechanischen Abrieb.

Eine Erhöhung der Schichtdicke, beispielsweise der Kaltendvergütung, bringt keine Vorteile. Selbst eine dickere Schicht wird durch wiederholte Reinigungen abgewaschen, wenn auch erst wenige Reinigungszyklen später. D. h. die Möglichkeiten zum Optimieren der Vergütung in der Glashütte mit den bisher eingesetzten Chemikalien sind beschränkt. Bei der Entwicklung von Leichtglasflaschen wird in Richtung einer optimierten Vergütung, die die Festigkeit und die Gleiteigenschaften der Flaschen verbessert, geforscht. NAKAGAWA u. a. [72] berichten von einer Beschichtungsmethode mit SnO_2 unter ungewöhnlich hohen Temperaturen, oberhalb des Transformationsbereichs von Glas bei 550-700 °C. Sie beobachteten an den vergüteten Flaschen eine dickere Vergütungsschicht (zwischen 40 und 100 nm), die eine feste Verbindung mit der Glasoberfläche eingeht und sich beim Reinigungsprozess nicht ablöst.

In neueren Veröffentlichungen zur Vergütung von Glasoberflächen werden andere Vergütungsverfahren und Metalloxide untersucht. HAUKE u. a. [48] untersuchten die Beschichtung von Flachglas mit Al_2O_3 im Sol-Gel-Verfahren, womit die Kratzfestigkeit der Glasoberfläche deutlich verbessert werden konnte. Es soll vor allem für Automobilverglasung angewandt werden. Ein verbessertes Verfahren zur Aluminiumoxidbeschichtung mit Lasertechnik beschrieben BABER und RAETHER [6]. Hier wird eine angetrocknete Salzlösung durch Anwenden von lokal sehr hohen Temperaturen bis zu 2500 °C für nur kurze Zeit, etwa 100 μs , gesintert. Es entsteht eine optisch homogene Oberfläche ohne Risse. Hierdurch konnten sowohl die tribologischen Eigenschaften als auch die chemische Beständigkeit der Oberflächen verbessert werden. Das Verfahren wäre eine denkbare Alternative zur Vergütung qualitativ hochwertiger Produkte. Für eine Serienfertigung von Flaschenglas ist jedoch noch ein Optimieren der bisher sehr zeitaufwändigen Methode (1 min für 25 cm^2) notwendig.

Nachvergütung im Abfüllbetrieb

Eine regelmäßige Nachvergütung der Flaschen kann nach jedem Reinigungsvorgang in der Flaschenabfüllanlage durchgeführt werden. Die Nachvergütung entspricht chemisch einer erneuten Kaltendvergütung. Die Nachvergütungslösung wird in einem speziellen Aggregat nach Vereinzeln der Flaschen in mehreren Strängen durch Drehen der Flaschen an mit Polymerlösung getränkten Schwämmen aufgetragen. Pro Strang können etwa 10-15.000 Fl/h beschichtet werden [111]. Die Vergütungsstation wird direkt nach der Flaschenreinigungsmaschine in die Abfüllanlage integriert. Durch ein regelmäßiges Nachvergüten der Flaschen behält die Oberfläche länger ihre guten Gleiteigenschaften und auch der chemische Glasangriff in der Flaschenreinigungsmaschine wird vermindert. Diese Möglichkeit der Nachvergütung wurde bereits in den 70er Jahren entwickelt [9]. Bei der nächsten Reinigung nachvergüteter Flaschen wird erst die oberste Vergütungsschicht abgetragen und die darunter

liegende Heißendvergütung geschützt. Jedoch können in die Laugen eingetragene Polymere zu Problemen führen. So ist für diese Methode keine Akzeptanz bei Abfüllbetrieben vorhanden, obwohl sie langfristig zu einer Schonung der Flaschen beiträgt und die Umlaufzahlen der Flaschen nachweislich erhöht.

Optisches Kaschieren der Zerkratzen

Bei dieser Methode wird die meist trockene Flaschenoberfläche mit einer Wachsschicht, möglichst erst nach der Etikettierung, beschichtet. Eine Steigerung der mechanischen Festigkeit oder des Zerkratzenwiderstandes durch diese Methode ist nicht gegeben. Auch wird diese hydrophobe Paraffinschicht in der Flaschenreinigungsmaschine nicht vollständig abgewaschen, was nach mehrmaligem Beschichten und damit entstehenden, dickeren Schichten zu klebrigen Flaschen führten und bei der weiteren Verarbeitung, wie z. B. beim Etikettieren, zu Problemen führen kann. Auch der Eintrag dieser Wachsschichten in die Lauge der Flaschenreinigungsmaschine kann zu Problemen führen.

2.5 Theoretische und praktische Festigkeit von Flaschenglas

Die Festigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Bruch. Die Bruchfestigkeit entspricht der Spannung, die den Bruch bewirkt, wobei nach der Art der Beanspruchung unterschieden wird in Zug-, Druck-, Biege-, Schub- oder Torsionsspannung.

Die theoretische Festigkeit von Glas wird bestimmt durch die atomaren Bindungskräfte zwischen den einzelnen Gittermolekülen. Aus der GRIFFITHSchen Formel [47], die bereits im Jahre 1920 aufgestellt wurde (Gleichung 2.19), lässt sich die theoretische Festigkeit σ_{theo} von Glas berechnen. Dabei gehen der E-Modul E , die freie Oberflächenenergie γ und der Atomabstand a ein:

$$\sigma_{theo} = \sqrt{\frac{4 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot a}}, \quad (2.19)$$

wobei: $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$; $\gamma = 0,3 \text{ N/m}$; $a = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Hieraus berechnet sich eine theoretische Festigkeit von Glas $\sigma_{theo} = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. Die in der Literatur angegebenen Werte für die theoretische Festigkeit schwanken zwischen $0,7-1,3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. Dies entspricht etwa einem Fünftel bis einem Zehntel des E-Moduls [10, 94].

Zwischen der theoretischen und der praktischen Festigkeit von Glas zeigt sich eine deutliche Diskrepanz. Die tatsächliche, praktische Festigkeit liegt etwa um den Faktor 100 unterhalb der theoretischen. Hier werden in der Literatur Werte im Bereich zwischen 5 und $20 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ genannt. Die Festigkeit von Glas wird vorwiegend durch seine Oberflächenbeschaffenheit charakterisiert. Bereits in jungfräulichem Glas enthaltene Mikrorisse spielen hierbei die entscheidende Rolle. Teilweise sind diese Mikrorisse sogar so klein, dass sie mit dem Elektronenmikroskop nicht sichtbar gemacht werden können [10]. In der Literatur werden auch inhomogene Regionen auf atomarer Ebene, wie beispielsweise besonders alkalireiche Bereiche, die schwächere Bindungen aufweisen, für die verminderte Festigkeit verantwortlich gemacht. Lediglich vergleichsweise kurze Glasfasern, mit Durchmessern von 1 bis $100 \mu\text{m}$, erreichen unter Zugbelastung wegen fehlender Oberflächenfehler nahezu die theoretische

Festigkeit. Mit steigender Länge und zunehmendem Durchmesser der Glasfasern nimmt deren Festigkeit ab, was durch die wachsende Oberfläche mit einer steigenden Wahrscheinlichkeit für vorhandene Oberflächenfehler zu erklären ist [10]. Bereits bei der Herstellung können im Glas Oberflächenverletzungen und Spannungen entstehen. Dabei spielen nach EDINGTON [32] vor allem

- die Zusammensetzung der Glasschmelze,
- der Prozess der Formgebung (Temperaturverteilung, Zusp eisung der Glasschmelze, Werkstoff der Form usw.),
- die Behandlung der frisch geformten Flaschen und
- die Abkühlphase (Temperaturprogramm) eine Rolle.

Die tatsächliche Festigkeit einer Glasflasche wird von mehreren Parametern, die sich häufig aus ihrer mechanischen und thermischen Vorgeschichte ergeben, beeinflusst. Sie ist allgemein abhängig von

- dem Werkstoff (chemische Natur, Bindungen, Mikrostruktur),
- der Geometrie der Flasche (größter Durchmesser, Größe, Form),
- der Wandstärke sowie Unterschieden in der Wandstärke,
- der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit, Beschädigungen, Unregelmäßigkeiten),
- der Glasbeschaffenheit (Inhomogenitäten, Gas-, Fremdkörpereinschlüsse),
- der Beanspruchungsart (Zug, Druck, Schub, Biegung, Torsion),
- der Beanspruchungs-Zeit-Funktion und
- den Umgebungsbedingungen, wie z. B. Temperatur und Luftfeuchte.

Durch die zuletzt genannten drei Punkte wird klar, dass die gemessenen Festigkeitswerte auch von der angewandten Messmethode abhängen. So gibt es für Festigkeitsmessungen an Flaschen für jede Beanspruchungsart (Innendruckfestigkeit, Schlagfestigkeit, Axialkraftbelastbarkeit, Temperaturwechselfestigkeit) standardisierte Methoden, die reproduzierbare Messungen zulassen.

Beim Entwickeln einer neuen Flaschenform, oder beim Abschätzen des Einflusses von Formänderungen auf das Festigkeitsverhalten von Glasflaschen, ist es sinnvoll, Berechnungsmodelle einzusetzen. Dabei ist es besonders wichtig, die oben genannten Parameter möglichst genau abzuschätzen. Anhand der Simulationsrechnungen kann der zu erwartende Festigkeitsbereich berechnet werden. Entsprechende Software, meist auf Basis der Finiten Elemente Analyse, wird in Glashütten verwendet, um bei Neuentwicklungen Spannungsspitzen zu erkennen und vermeiden zu können [58].

Mit der Formel 2.20 lässt sich die sogenannte Kerbspannung errechnen. Die Kerbspannung ist die maximale Spannung σ_{Rmax} , die in der Rissspitze einer Oberflächenbeschädigung angreift. Sie ist abhängig von der angelegten Zugspannung σ_0 , der Risslänge l_R und dem Radius in der Rissspitze r_R :

$$\sigma_{Rmax} = 2\sigma_0 \sqrt{\frac{l_R}{2r_R}}, \quad (2.20)$$

wobei gilt: $r_R \ll l_R$.

Sobald die Spannung in der Rissspitze größer wird als die atomaren Bindungskräfte, wächst der Riss weiter. Die Geometrie der Rissspitze ist messtechnisch nicht erfassbar, so dass es

bezüglich der Größenordnung des Radius Annahmen zwischen 1-10 Atomabständen gibt. Ob tatsächlich von einem Radius gesprochen werden kann ist ebenso fraglich [10].

Gegenüber Druckbelastung besitzt Glas eine etwa um den Faktor acht bis zehn höhere Festigkeit im Vergleich zur Zugbelastung [10, 61, 62]. Die mechanische Beständigkeit gegenüber Biegebeanspruchung liegt dazwischen, da bei dieser Beanspruchungsart eine Seite der Oberfläche unter Zugbelastung die andere unter Druckbelastung steht [10]. Da bei Messung der Axialkraftbelastbarkeit von Glasflaschen die Biegebeanspruchung bestimmt wird, wurde im praktischen Teil dieser Arbeit auf solche Versuche verzichtet.

An jeder Glasprobe bestimmt die empfindlichste Stelle, d. h. deren Rissgeometrie, die Festigkeit. Es gibt Untersuchungen, in denen Gleichungen zur Festigkeitsvorhersage aufgestellt werden [3, 12, 87]. Diese sind jedoch jeweils nur bei bestimmten Proben mit definierten bzw. bekannten Beschädigungen anwendbar. Jedoch bei praxisnahen Beschädigungen, deren Ausmaß nicht bekannt ist, gibt es keine Möglichkeit, die Festigkeit von einzelnen Glasflaschen vorhersagen zu können. Hier kann lediglich über statistische Untersuchungen eine Aussage über zu erwartenden Festigkeitswerte gemacht werden. Über statistische Methoden kann berechnet werden, ob beispielsweise die Innendruckfestigkeit eines Flaschentyps die Mindestanforderungen für die Praxis erfüllt.

Untersuchungen zum Zusammenhang von definiert, mit Schmirgelpapier und Diamantpaste erzeugten Oberflächenbeschädigungen und dem Festigkeitsverhalten von Glas wurden an Glasstäben unter anderem von VARNER u. a. [106] und AUGUSTSSON [4] durchgeführt. Diese Versuche zeigten, dass durch ein Verwenden größerer Kratzkörper (Korngröße) die hervorgerufenen Oberflächenverletzung stärker und damit die gemessenen Festigkeiten kleiner waren.

2.5.1 Bruchmechanik

Unter Bruchmechanik wird die Untersuchung der Vorgänge beim Bruch eines Werkstoffes (Bruchentstehung und Bruchausbreitung) und die beeinflussenden Faktoren verstanden. Hierbei sind vor allem die physikalischen und chemischen Bedingungen an der Oberfläche, die Umweltbedingungen während der Prüfung, die Dauer und Art der Belastung und die chemische Zusammensetzung des Glases von Bedeutung.

KERKHOF [61] unterscheidet an einem vorhandenen Riss drei einfache, charakteristische Beanspruchungsarten (Modi I-III): Rissöffnung (I), Längsscherung (II) und Querscherm (III). Diese führen jeweils zum Bruch des Glases und können sich teilweise überlagern. Dabei kommt die einfache Rissöffnung (Modus I) durch eine Zugbeanspruchung des Glases senkrecht zum Riss am häufigsten vor.

Beim Modus I sind die an der Rissspitze auftretenden Normalspannungen entscheidend dafür, ob der Riss bruchauslösend ist. Die Spannungen an der Oberflächenbeschädigung können durch einen Spannungsintensitätsfaktor K_I beschrieben werden. Der Faktor K_I ist proportional zu der angelegten Zugspannung σ_0 sowie der Rissgeometrie (Risslänge l_R) [10]:

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi \cdot l_R}{2}}. \quad (2.21)$$

Erreicht die angelegte Spannung die sogenannte kritische Spannung σ_k ab der die Probe zu Bruch geht, kann aus obiger Gleichung 2.21 der kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ik} bestimmt werden:

$$\text{mit } \sigma_0 = \sigma_k \text{ folgt: } K_{Ik} = \sigma_k \sqrt{\frac{\pi \cdot l_R}{2}}. \quad (2.22)$$

Für die kritischen Spannungsintensitätsfaktoren verschiedener Gläser können in der Literatur Werte gefunden werden. Für Flaschenglas beträgt $K_{Ik} = 7,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^{3/2}$.

Meist kommen in der Praxis jedoch nicht nur einzelne Risse vor, so dass sich die Spannungsfelder benachbarter Risse gegenseitig beeinflussen. Die Lage zueinander entscheidet darüber, ob sich die Spannungen verstärken oder abschwächen. Ein Entlastungseffekt tritt bei einer parallelen Anordnung zweier Risse ein, so dass jeder der Risse im entlasteten Gebiet des anderen liegt [61]. Diesen Effekt macht man sich beispielsweise bei der Herstellung hochfester Keramikteile zu Nutze, wo durch gezieltes Hinzufügen kleiner Risse große Risse stabilisiert werden.

Glas zeigt Mikroplastizität, denn es erscheint bis zum Bruch völlig elastisch [44]. Die ersten Bruchlinien entstehen in senkrechter Richtung zur Zugbeanspruchung. Das gesamte Bruchliniensystem kann, unter Berücksichtigung aller charakteristischen Erscheinungen der Bruchmechanik, auf einen Bruchsprung zusammengeführt werden. Eine gemessene Festigkeit einer Glasprobe ist die Zugfestigkeit an der schwächsten Stelle der belasteten Oberfläche, an der ein Riss entsteht [70].

Nach dem Bruch des Glases ist die Bruchausgangsstelle von einer Bruchfläche, dem sogenannten Bruchspiegel, umgeben. In unmittelbarer Nähe des Bruchsprungs ist die Oberfläche des Bruchspiegels spiegelglatt und wird mit wachsendem Abstand vom Bruchsprung rauer. Es können, die nach ihrem Entdecker benannten, WALLNER-LINIEN beobachtet werden [10]. WALLNER-LINIEN gehen vom Rand des Bruchspiegels von vorhandenen Oberflächenverletzungen bzw. Störstellen aus. Sie entstehen, wenn sich die Bruchwelle ausgehend vom Bruchsprung ausbreitet. Je nach Art der angelegten Spannung (punktförmig oder flächig) breitet sich die Bruchwelle halbkugelförmig oder gerade aus. KERKHOF [61] beschreibt, wie aus dem Bruchspiegelradius die Größe der bruchauslösenden Fehlstelle geschätzt werden kann. Die halbe Risslänge einer halbkreisförmig gedachten bruchauslösenden Fehlstelle entspricht etwa einem Zehntel des Bruchspiegelradius.

Jeder Bruch verläuft in drei Phasen: Rissbildung, Risswachstum und Rissausbreitung. Der Energieverbrauch während der Rissausbreitung kann dabei variieren. Es wird unterschieden zwischen dem zähen, sich unter großem Energieverbrauch ausbreitenden, und dem spröden Bruch, bei dem nur sehr wenig Energie benötigt wird.

Risse breiten sich mit unterschiedlich hohen Risswachstumsgeschwindigkeiten v_R im Bereich von 10^{-10} m/s bis $1,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ aus. Ein Riss breitet sich bis zum Erreichen des kritischen Spannungsintensitätsfaktors (Gleichung 2.22) zunächst langsam und dann mit einer, für jede Glaszusammensetzung typischen, konstanten Geschwindigkeit aus [10]. Die Endgeschwindigkeit v_{Rmax} kann aus einer molekularen Betrachtungsweise abgeleitet werden und

ist nach KERKHOF [61] abhängig von der Oberflächenenergie γ , der Glasdichte ρ und dem mittleren Atomabstand a im Glasgitter:

$$v_{Rmax} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot a}} \quad (2.23)$$

Mit Werten $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 0,3 \text{ N/m}$ und $a = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ berechnet sich die maximale Rissausbreitungsgeschwindigkeit für Flaschenglas zu etwa $v_{Rmax} = 1550 \text{ m/s}$ [10]. Dies konnte auch in Versuchen bestätigt werden [94]. Die Risswachstumsgeschwindigkeiten können abhängig vom vorherrschenden Mechanismus in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- sehr langsames bzw. kein Risswachstum: charakterisiert die Langzeitfestigkeit von Glas: die Transportrate von H_2O zur Risspitze ist groß genug, dass chemische Reaktionen die geschwindigkeitsbestimmenden Faktoren sind,
- Risswachstum mit sehr hohen Geschwindigkeiten: spontanes Lösen der Netzwerkbindungen im Glas ohne Einfluss des umgebenden Mediums.

KERKHOF [61] hat aus verschiedenen Arbeiten Daten zusammengetragen, die für $v_R \leq 10^{-4} \text{ m/s}$ eine Abhängigkeit der Risswachstumsgeschwindigkeiten von den Umgebungsbedingungen zeigen. Die Risswachstumsgeschwindigkeit steigt bei gleichem Spannungsintensitätsfaktor K_I mit zunehmender Luftfeuchtigkeit und Temperatur an.

Bei Flaschenglas wird ein Bruch meist durch Schlag oder Innendruck hervorgerufen. Außerdem treten in Flaschenglas häufig Eigenspannungen auf. An der Flascheninnenseite treten meist Druckspannungen, an der Flaschenaußenseite Zugspannungen auf. Der Bruchursprung liegt meist an der Außenseite, da hier durch mechanische Beanspruchung Oberflächenverletzungen auftreten. Durch inneren Überdruck in einer Flasche treten am Bruchursprung Tangential- und Axialspannungen auf.

Nach der Kesselformel lassen sich Spannungen σ in der Wand einer Flasche an einem beliebigen Durchmesser D berechnen:

$$\sigma = \frac{p \cdot D_i^2}{D_a^2 - D_i^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_a^2}{D} \right) \right] \quad (2.24)$$

Wobei: D_a bzw. D_i : äußerer bzw. innerer Flaschendurchmesser, p : innerer Überdruck, D : beliebig gewählter Flaschendurchmesser zwischen D_a und D_i an dem die Spannung bestimmt werden soll.

Die Kesselformel lässt sich für den zylindrischen Teil der Flasche in vereinfachte Formeln umwandeln, die zeigen, dass die auftretenden Tangentialspannungen σ_t in etwa doppelt so groß wie die Axialspannungen σ_a sind, siehe Gleichungen 2.23 und 2.24 [61]. Aus diesem Grund breiten sich Brüche vorwiegend in axialer Richtung aus.

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot d} \quad (2.25)$$

$$\sigma_a = \frac{p \cdot D}{4 \cdot d}, \quad (2.26)$$

wobei: D : beliebiger Flaschendurchmesser zwischen D_a und D_i , p : innerer Überdruck, d : Dicke der Flaschenwand.

TEAGUE und BLAU [103] konnten bei Untersuchungen von Zugspannungen an Flaschen mit innerem Überdruck die Kesselformeln bestätigen. Es zeigte sich, dass die größten Zugspannungen an der Innenseite der Flaschenwand am Übergang zwischen zylindrischem Teil und Boden der Flasche in Umfangsrichtung auftreten.

Auch bei einem Bruch durch Schlagbelastung wird ein Bruch letztendlich durch Zugspannungen verursacht. Der Bruch wird an einer bereits vorhandenen Oberflächenbeschädigung ausgelöst, die im durch den Schlag erzeugten Druck- oder Zugspannungsgebiet liegt. Folglich können sich die Auftreffstelle des Schlages und der Bruchursprung lokal unterscheiden. Oft wird hier auch von sekundären Rissen, die erst zum Bruch führen, gesprochen. Auch beim Bruch durch Schlagbeanspruchung kann aus den Bruchlinien (wellen- und linienförmig) und dem entstandenen Bruchflächen (Spalt- bzw. Muschelfläche) an der Schlagstelle die Bruchrichtung, Bruchgeschwindigkeit und der Bruchursprung sowie die bruchauslösende Beanspruchung hergeleitet werden [61].

Auch durch thermisch induzierte Spannungen können Brüche an Flaschen verursacht werden. Diese meist durch rasches Abkühlen oder Erhitzen hervorgerufenen Spannungen wirken nur temporär, sie klingen nach Temperatúrausgleich innerhalb der Flaschen wieder ab. Dieser Effekt wird im Kapitel der Temperaturwechselfestigkeit näher erläutert.

2.5.2 Innendruckfestigkeit

Die Innendruckfestigkeit von Glasflaschen ist vor allem für das Abfüllen carbonisierter Getränke von großer Bedeutung, wo sich in der Flasche durch enthaltenes CO_2 im Getränk ein Überdruck entwickeln kann. Dieser ist abhängig von der gelösten Menge an CO_2 , der Temperatur, dem Getränk und dem Kopfraumvolumen. Vor allem die beiden zuerst genannten Parameter sind entscheidend. Der innere Überdruck im Gleichgewichts- oder Sättigungszustand kann nach dem HENRYschen Gesetz berechnet werden. Es gilt, dass die im Getränk gelöste CO_2 -Menge c proportional zum CO_2 -Partialdruck p im Gasraum ist:

$$c = S \cdot p \quad (2.27)$$

wobei S den getränkespezifischen und temperaturabhängigen Löslichkeitskoeffizienten darstellt. Der Löslichkeitskoeffizienten für CO_2 für verschiedene Getränke wie Mineralwasser, Vollbier, Limonaden und Sekt wurden von RAMMERT und PAHL [86] bestimmt.

Die Gleichgewichtsdrücke nach Gleichung 2.27 werden bei einer ruhenden Flasche jedoch nie erreicht. Beim Schütteln der Flasche dauert die Gleichgewichtseinstellung nur wenige Minuten. Dies bedeutet, dass beim Pasteurisieren der Flaschen in Kammer- oder Tunnelpasteurisierapparaten keine Gleichgewichtsdrücke erreicht werden. Im Gegensatz hierzu kann es jedoch beim Transport der Flaschen zum Einzelhandel oder beim Verbraucher durch Schütteln der Flaschen zu einem schnelleren Ausbilden des Gleichgewichtsdrucks kommen. Es ist wichtig, die Innendruckfestigkeit der Flaschen für diese Beanspruchungen auszulegen,

da durch spontan platzende Flaschen nicht nur Produkt und Flasche verloren gehen, sondern auch unmittelbar Personen gefährdet sind.

Beim Transport der Flaschen auf dem LKW oder beim Verbraucher können im Sommer Temperaturen von bis zur 40 °C auftreten. Bei 40 °C kann der innere Überdruck für normal befüllte 0,5-l-Bierflaschen mit einem CO₂-Gehalt von 5,3 g/l nach LIEBENSPOCHER, WEISSER und BUCHNER [66] etwa 4,4 bar betragen. Durchaus üblich sind CO₂-Gehalte bis etwa 8 g/l Getränk, so dass auch höhere Überdrücke entstehen können. Nach TEAGUE und BLAU [103] treten bei hohen Temperaturen im Sommer bis zu 8,6 bar auf, wo hingegen beim Kühlen der Getränke werden nur etwa 3,0 bar erreicht.

Alle Glasflaschen für carbonisierte Getränke sollten auf jeden Fall so konzipiert sein, dass sie dem maximal möglichen inneren Überdruck standhalten. Dieser Forderung wird beispielsweise in den STLB für Bierflaschen [102] Rechnung getragen: eine Gebrauchsinndruckfestigkeit von 10 bar ist vorgeschrieben, diese untere Toleranzgrenze T_u darf nur von 2 % der Flaschen einer Stichprobe unterschritten werden. Gebrauchsinndruckfestigkeit bedeutet, dass die Flaschen auch nach mehrmaligen Umläufen diese Festigkeiten aufweisen müssen. Solche Vorschriften gibt es für alle Flachentypen, meist handelt es sich dabei um Vereinbarungen zwischen den Abfüllbetrieben bzw. entsprechenden Verbänden und den Glashütten.

Bereits frühere Untersuchungen von VOGELPOHL [109] und SCHMAUDER [93] an verschiedenen Flaschentypen (Euro-, NRW-, GDB-Flaschen) zeigten eine deutliche Abnahme der Festigkeit von gebrauchten gegenüber hüttenneuen Glasflaschen. Hier wurde jedoch keine weitere Differenzierung des Scuffinggrades der gebrauchten Flaschen vorgenommen bzw. die untersuchten Poolflaschen waren erst wenige Jahre im Einsatz. In dieser Arbeit konnte mit Hilfe der Kamerasysteme eine weitere Klassierung der gebrauchten Flaschen vorgenommen werden. Es wurden weiterführende Erkenntnisse zur Festigkeit besonders oft umgelaufener Flaschen mit starkem Scuffing erwartet.

2.5.3 Schlagfestigkeit

Flaschen werden in Abfüllanlagen und beim Verbraucher häufig auf Schlag beansprucht. So beispielsweise beim Transport der Flaschen durch Aufeinanderprallen in Vereinzelnungen und Zusammenführungen, bei Stausituationen, in der Aufgabe der Flaschenreinigungsmaschine sowie beim Ein- und Auspacken. Schlagbeanspruchungen beim Verbraucher entstehen beim Herausnehmen und Zurückstellen aus bzw. in den Stapelkasten und bei der Handhabung.

Auch zur Schlagfestigkeit führte VOGELPOHL [108] bereits Messungen zum Vergleich der Festigkeit von hüttenneuen und gebrauchten Euro-Flaschen aus, jedoch wurde auch hier nicht zwischen Flaschen mit unterschiedlich starkem Scuffing unterschieden. Analog zu den Messungen der Innendruckfestigkeit waren auch auf diesem Gebiet in dieser Arbeit mit dem Kamerasystem differenziertere Ergebnisse zu erwarten.

2.5.4 Temperaturwechselfestigkeit

Bei plötzlichem Temperaturwechsel kann es aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Glas zu großen Temperaturunterschieden zwischen der inneren und äußeren Glasoberfläche kommen. Die daraus resultierende, lokal unterschiedliche Wärmeausdehnung führt zu

Spannungen im Glas, die bis zum Bruch des Glases führen können. Dabei ist plötzliches Abkühlen, das die Glasoberfläche unter Zugspannungen setzt gefährlicher als plötzliches Erhitzen (Druckspannungen) [95]. Generell liegt die Temperaturwechselfestigkeit für Natronkalkglas (bis 60 K) deutlich unter der von Borosilicatglas (bis 190 K) [63].

Die Temperaturwechselfestigkeit $\Delta\vartheta_{max}$ ist proportional zur Festigkeit σ und umgekehrt proportional zum Wärmeausdehnungskoeffizienten α und berechnet sich für Flachglas nach folgender Gleichung [63]:

$$\Delta\vartheta_{max} = \frac{\sigma \cdot (1 - \mu)}{\alpha \cdot E}, \quad (2.28)$$

wobei: μ : Querkontraktionszahl und E : E-Modul.

Die Querkontraktionszahl, auch Poisson-Zahl genannt, liegt für Behälterglas im Bereich zwischen $\mu = 0,25$ und $\mu = 0,5$. Da die Temperaturwechselfestigkeit direkt von der Festigkeit des Glases abhängig ist, wurden die Untersuchungen zum Einfluss der Zerkratzung auf die Eigenschaften der Glasflaschen in dieser Arbeit auf die Festigkeitsmessungen beschränkt.

YOKOKURA [114, 113] bestimmte die Temperaturwechselfestigkeit in Abhängigkeit vom Innendruck gefüllter Flaschen (wichtig für das Verhalten im Pasteurisierapparat) und vom Alter bzw. der Vorschädigung von Flaschen. Es wurde jeweils getestet, bei welcher Temperaturdifferenz die ersten Flaschen zu Bruch gingen. Die Temperaturwechselfestigkeit nahm mit steigendem Innendruck ab. Er fand an für Japan typischen Mehrwegflaschen eine Abnahme der möglichen Temperaturdifferenz bei raschem Abkühlen. Die mögliche Temperaturdifferenz lag bei Versuchen ohne Innendruck bei $\Delta\vartheta_{max} = 40$ K und bei 6 bar innerem Überdruck bei $\Delta\vartheta_{max} = 35$ K. Auch konnte er eine kleinere Temperaturwechselfestigkeit bei bereits gebrauchten Flaschen im Vergleich zu neuen Flaschen feststellen.

Den größten plötzlichen Temperaturunterschieden sind Flaschen bei der maschinellen Abfüllung von Getränken (Heißabfüllung und Dampfvorspannung), beim Reinigen und Pasteurisieren ausgesetzt. Da in der Praxis nur Temperaturunterschiede von etwa 40-50 K (Erhitzen) bzw. 20-30 K (Abkühlen) auftreten, ist hier nur mit wenig Flaschenbruch durch Thermoschock zu rechnen.

2.6 Langzeitverhalten

Unter Langzeitverhalten werden Reaktionen und Veränderungen von Flaschenglas über einem längeren Zeitraum verstanden. Der betrachtete Zeitraum kann nur wenige Stunden bis zur gesamten Nutzungsdauer der Flasche betragen. Im Kapitel Ermüdung und Wechselfestigkeit wird das Langzeitverhalten von Glasflaschen bei unterkritischer Beanspruchung, im Kapitel Altern ohne Beanspruchung beschrieben.

2.6.1 Ermüdung und Wechselfestigkeit

Unter Ermüdung wird das Werkstoffversagen bei länger anhaltender oder periodisch wiederkehrender, jedoch unterkritischer Beanspruchung verstanden. Als unterkritische Beanspruchungen gelten Beanspruchungen, die unterhalb der Bruchgrenze liegen und nicht unmittelbar zum Bruch des Glases führen. Diese Beanspruchungen schwächen jedoch das Glas und können nach einer gewissen Dauer auch zum Bruch führen. Je größer die

Beanspruchung, desto kürzer ist der Zeitraum bis zum Bruch. So wird die Festigkeit zur zeitabhängigen Größe. Dieser Effekt wird statische Ermüdung genannt.

Grundlage für dieses Verhalten bilden auch bei geringer Beanspruchung langsam weiterwachsende, in der Glasoberfläche vorhandene Risse und Oberflächenverletzungen. Wenn die Risse eine kritische Tiefe unterschreiten, breiten sie sich schlagartig aus, was zum Bruch des Glases führt. Von dynamischer Ermüdung wird gesprochen, wenn es sich um eine gleich große, periodisch wiederkehrende Beanspruchung handelt [10]. TOMOZAWA [104] macht für die Ermüdung chemische Reaktionen in den Rissen verantwortlich. Nach seinen Untersuchungen wird die Diffusion von Wasser aus der Umgebung in das Glas durch Anlegen einer Zugspannung deutlich erhöht, was zu einem langsamen Weiterwachsen bereits vorhandener Oberflächenrisse führt.

Bei einer Literaturstudie zu Ermüdungseffekten finden sich erste Untersuchungen bereits um 1940, aus denen deutlich wird, dass es sich bei den Ermüdungseffekten nicht um einen einfachen Zusammenhang zwischen Zeit und Festigkeit handelt [7, 80]. Die Dauerbelastungsgrenze, die die unendlich lange Belastung einer Probe ohne Bruch darstellt, wird mit etwa 20-30 % der Ausgangsfestigkeit unbeanspruchter Proben angegeben. Dieser Spielraum ergibt sich aus den unterschiedlichen Prüfmethoden. Ermüdungseffekte spielen bereits bei Belastungszeiten ab $2 \cdot 10^{-3}$ s eine Rolle. Hieraus wird die Bedeutung normierter Prüfverfahren zur Messung der Festigkeit deutlich. Nach MOULD [70] sind Ermüdungseffekte und damit die Messergebnisse einer Festigkeitsprüfung abhängig von:

- den umgebenden Medien bei der Lagerung (Ausheilen von Verletzungen in Abhängigkeit von Luftfeuchte) und während der Festigkeitsmessung (Wasser, wasserfreie Medien, Luftfeuchte),
- der Prüfdauer (Zeit-Belastungs-Funktion) und
- der Temperatur bei Prüfung und Lagerung (Festigkeit sinkt mit Erhöhen der Temperatur).

Unterschiede bei gemessenen Innendruckfestigkeitswerten ergeben sich auch durch die Druckanstiegsgeschwindigkeit bei der Messung. Bei langsam ansteigender Geschwindigkeit wachsen die vorhandenen Risse auch während der Messung langsam weiter, dies verringert die Endfestigkeit. Bei schnell ansteigendem Druck können sich die Risse nicht in dem Maße verlängern, die vorhandenen, nicht so tiefen Risse bestimmen die dann höhere Endfestigkeit [10].

HÖHNE [51] beobachtete unterschiedliche Ermüdungseffekte in Abhängigkeit von der Vorgesichte des Flaschenglases. Er führte Versuchsreihen an unterschiedlich vorgeschädigten Glasstäben durch. Die Glasstäbe wurden entweder durch Reibungskontakt untereinander sowie mit Schleifpapier (stumpfer Kontakt) oder durch Eindringen eines spitzen Diamantkörpers in die Glasoberfläche (Vickerseindruck) geschädigt. In seinen Versuchsreihen beobachtete er eine Festigkeitserhöhung nur bei den reibungsgeschwächten, in Wasser, Säure oder feuchter Luft unter Biegespannung gelagerten Glasstäben um jeweils etwa 17 % (bezogen auf die Ausgangsfestigkeit unbeschädigter Glasstäbe). HÖHNE nennt diesen Effekt Rissalterung. Die Ergebnisse sprechen gegen eine Abstumpfung der Risse, da bei Lagerung in Säure bei kleinen pH-Werten ein Netzwerkabbau im Glas eher unwahrscheinlich ist.

2.6.2 Alterung

Unter dem Altern eines Werkstoffes wird die Summe aller chemischen und physikalischen Vorgänge an einem Werkstoff ohne zusätzlich wirkende Spannungen verstanden. Die Ursachen für die Alterung können wie folgt eingeteilt werden in:

- äußere Ursachen, wie beispielsweise chemische Einflüsse, Umgebungsfeuchte, Temperaturwechsel usw.,
- innere Ursachen, wie beispielsweise Spannungsabbau im Material, Veränderung in der chemischen Zusammensetzung und Molekularstruktur, Phasenumwandlungen, usw.

Diese Ursachen können zu unterschiedlichen Alterserscheinungen führen. Sind die Vorgänge auf eine Reaktion der Glasoberfläche mit feuchter Luft zurückzuführen, wird in der Literatur der Begriff Verwitterung verwendet [94].

In der Literatur scheint teilweise der Unterschied zwischen Altern und Ermüdung zu verschwimmen, so dass hier widersprüchliche Aussagen hinsichtlich des Verhaltens an Rissen gemacht werden. Zum einen wird ein festigkeitserhöhender Effekt durch das Korrodieren der Oberfläche durch das Abrunden und Vergrößern der Radien in Rissspitzen beschrieben. Zum anderen kann ein Korrodieren auch zum Weiterwachsen bzw. Verlängern von Rissen führen, sogar einhergehend mit einem kleiner werdenden Radius [10], und damit zum Verringern der Festigkeit führen.

MOULD fand durch Alterungsvorgänge eine Erhöhung der Festigkeit bis zu 50 %, was nach Gleichung 2.20 bedeutet, dass sich die Radien der Rissspitzen durch das Ausheilen der Risse etwa halbieren. Die Veränderungen durch chemische Reaktionen mit Wasser spielen sich in einigen, bisher noch nicht betroffenen Molekülschichten in der Rissspitze ab [70]. Die Festigkeitserhöhung findet bei „frischen“ Beschädigungen und Lagerung bei hohen relativen Feuchten bzw. direkt im Wasser statt. Diese ist meist bereits in einem Tag abgeschlossen.

Bei Glas kann durch den Alterungseffekt auch eine irisierende Oberfläche entstehen. Sie wird durch das Abscheiden bestimmter Glasinhaltsstoffe, auch Ausblühen oder Ausschwitzen genannt, erzeugt. Bei Flaschenglas kann ein irisierender Effekt auch durch den teilweisen Abbau der Oberflächenvergütung erzeugt werden.

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die Versuchsdurchführung sowie die dazu verwendeten Versuchsaufbauten, die Auswertemethoden und das eingesetzte Probenmaterial für alle Versuche dieser Arbeit beschrieben. Die Ergebnisse der Versuche werden in den folgenden Kapiteln 4 und 5 dargestellt und diskutiert.

3.1 Kamerasystems zum Beurteilen des Scuffinggrades

Um Scuffing an Glasflaschen, im Gegensatz zum zeitaufwändigen manuellen Bestimmen der Reibringhöhe, objektiv beurteilen zu können, musste ein geeignetes Messsystem entwickelt werden. Dieses System zum Bestimmen des Scuffinggrades an Mehrwegflaschen sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Erkennen und Quantifizieren von visuell sichtbarem Scuffing und Zerkratzen,
- Bestimmen der Scuffingfläche bzw. der zerkratzten Fläche im Messbereich sowie der Höhe des oberen bzw. unteren Reibrings,
- mögliches Anpassen an Flaschen unterschiedlicher Geometrie (Form, Größe) und Glasfarbe,
- flexibel und transportabel, anpassungsfähig an verschiedene Gegebenheiten vor Ort, kalibrierbar,
- Messen von einzelnen Flaschen am gesamten Umfang (360°),
- Messen mit automatischem Trigger online in Abfüllbetrieben unter Auswertung bis zu 60.000 Fl/h (= 17 Bilder/s) in Echtzeit,
- Zwischenspeichern der ausgewerteten Daten,
- Möglichkeit zur Ausgabe der Messwerte an einen PC.

Die im Jahr 1996 vom Funktionsumfang in Frage kommenden PC-basierten Bildverarbeitungssysteme mit Kamertechnik waren für den Einsatz bei online-Messungen in Abfüllbetrieben aufgrund der notwendigen Geschwindigkeiten von bis zu 17 Bildern/s nicht geeignet. Hier können je nach verwendeter Kamera, auszuwertender Pixelanzahl und Anzahl an Rechenoperationen pro Pixel (Bildpunkt) bis zu 1.000 MOPS anfallen. Andere Techniken mit LED und Lichtleitern führten nicht zum gewünschten Ergebnis.

So wurden die Maschinenbauunternehmen Heuft Systemtechnik GmbH, Burgbrohl, und Krones AG, Neutraubling, die Leerflaschen-Inspektionsmaschinen bauen, kontaktiert. In Zusammenarbeit mit diesen Firmen wurde je ein Kamerasystem nach unserem Anforderungsprofil entwickelt und uns für die Messungen zur Verfügung gestellt. Bei diesen Systemen werden mehrere Transputer parallel zum Verrechnen der anfallenden Bilddaten eingesetzt. Für die Bildaufnahme wird eine Schwarzweiß-Kamera mit 8 bit CCD-Technik eingesetzt. Eine optimale Beleuchtung für eine Glasoberfläche mit Scuffing kann im Hellfeld mit Durchlicht erreicht werden. Die beiden Systeme sind im Prinzip gleich aufgebaut, die wenigen Unterschiede werden im Folgenden erläutert. Bild 3.1 zeigt den schematischen Aufbau der entwickelten Kamerasysteme.

Die eingesetzten Kameras und Auswerteeinheiten entsprechen modifizierten Inspektionsmodulen für die Seitenwandkontrolle aus den Leerflaschen-Inspektionsmaschinen der beiden Hersteller. Zusätzlich zu den schon vorhandenen Möglichkeiten der Bildverarbeitung wurde ein Auswertalgorithmus für die Reibringhöhe eingebaut. Die sonstigen Veränderungen an

den Auswerteeinheiten bezogen sich hauptsächlich auf die Darstellung und Ausgabe der Messergebnisse für das Scuffing. Außerdem wurde der gesamte Versuchsaufbau zum mobilen Einsatz in verschiedenen Abfüllbetrieben flexibel gestaltet.

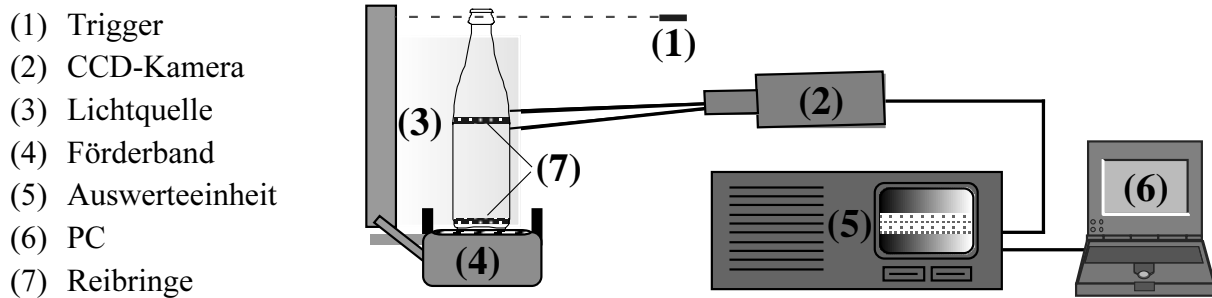


Bild 3.1. Versuchsaufbau zum Bestimmen des Scuffinggrades an Mehrwegflaschen

Die Grundprinzipien der zum Auswerten der Kamerabilder verwendeten Bildverarbeitungs-algorithmen der beiden Systeme sind ähnlich. Die Flaschen werden bei beiden Systemen mit einer Beleuchtungseinheit auf der gegenüberliegenden Seite der Kamera im Durchlicht beleuchtet. Beim System Heuft wird eine Stroboskoplampe, beim System Krones eine permanente Beleuchtung eingesetzt. Mit beiden Systemen werden Unterschiede in der Farbsättigung der Flaschen, die vor allem bei Braunglas Probleme bereiten können, ausgeglichen. Die für jede Flasche optimale Belichtungszeit wird, über eine der eigentlichen Aufnahme vorausgehenden Helligkeitsmessung, ermittelt. Die verwendeten CCD-Kameras sowie die Parametrierung der Kameras und Auswerteeinheiten sind jeweils auf die Beleuchtungsarten abgestimmt. Das Licht der Beleuchtungseinheit wird an Oberflächenverletzungen wie Scuffing oder Kratzern des Glases gestreut. Eine solche Stelle erscheint im Vergleich zur intakten Glasoberfläche der Flasche im Kamerabild dunkler. Durch eine optimale Beleuchtung der Flasche wird ein möglichst hoher Kontrast, d. h. ein großer Graustufenunterschied, zwischen verletzter und glatter Glasoberfläche erzielt. Den größten Kontrast zeigen leere Flaschen.

Um eine möglichst hohe Auflösung im Bereich des Reibrings für die Auswertung zu erhalten, beschränkt sich der Aufnahmebereich der CCD-Kamera entweder auf den oberen oder den unteren Reibring einer Flasche. Das digitalisierte Kamerabild des Reibringbereiches mit 256 Graustufen wird an die Auswerteeinheit zum Bestimmen des Scuffinggrades weitergegeben. Bei beiden Systemen wird aus dem Graustufenbild der Kamera ein Messfeld ausgewählt, auf das sich die Auswertung beschränkt. Die Abmessungen und die Lage dieser Messfelder können beliebig gewählt werden (Bild 3.2). Das Messfeld wird bestimmt durch die x- und y-Startposition auf dem Koordinatenraster des Bildschirms sowie durch die x-Breite und y-Höhe in Pixel. Bei der Auswerteeinheit von Krones können auf Wunsch auch zwei Messfelder pro Kamerabild definiert werden. Zum Auswerten der Bildinformation wird nach einem bestimmten Rechenalgorithmus die Graustufe jedes Bildpunktes im Messfeld mit der eines Vergleichspixels, beispielsweise seines Nachbarpixels, verglichen. Überschreitet der Graustufenunterschied eine gewählte Schwelle, werden im Messfeld die entsprechenden Pixel abgezählt. Diese sogenannten Fehlerpixel können auf den Bildschirmen beider Auswertesysteme farblich gekennzeichnet dargestellt werden. In den Systemen wird die erkannte Anzahl an Fehlerpixeln in unterschiedliche Messwerte umgerechnet, die aber miteinander

vergleichbar sind. Die Anzahl Fehlerpixel im Messfeld wird als Fehlerfläche mit der Einheit [Pixel²] definiert.

Bild 3.2 zeigt die Lage des Messfeldes am oberen Reibring einer NRW-Flasche und die Bildschirmanzeige des aufgenommenen und ausgewerteten Graustufenbildes der Kamera am Beispiel der Auswerteeinheit von Krones. Die weiße Fläche im Messfeld der Auswerteeinheit stellt die erkannte Scuffingfläche dar.

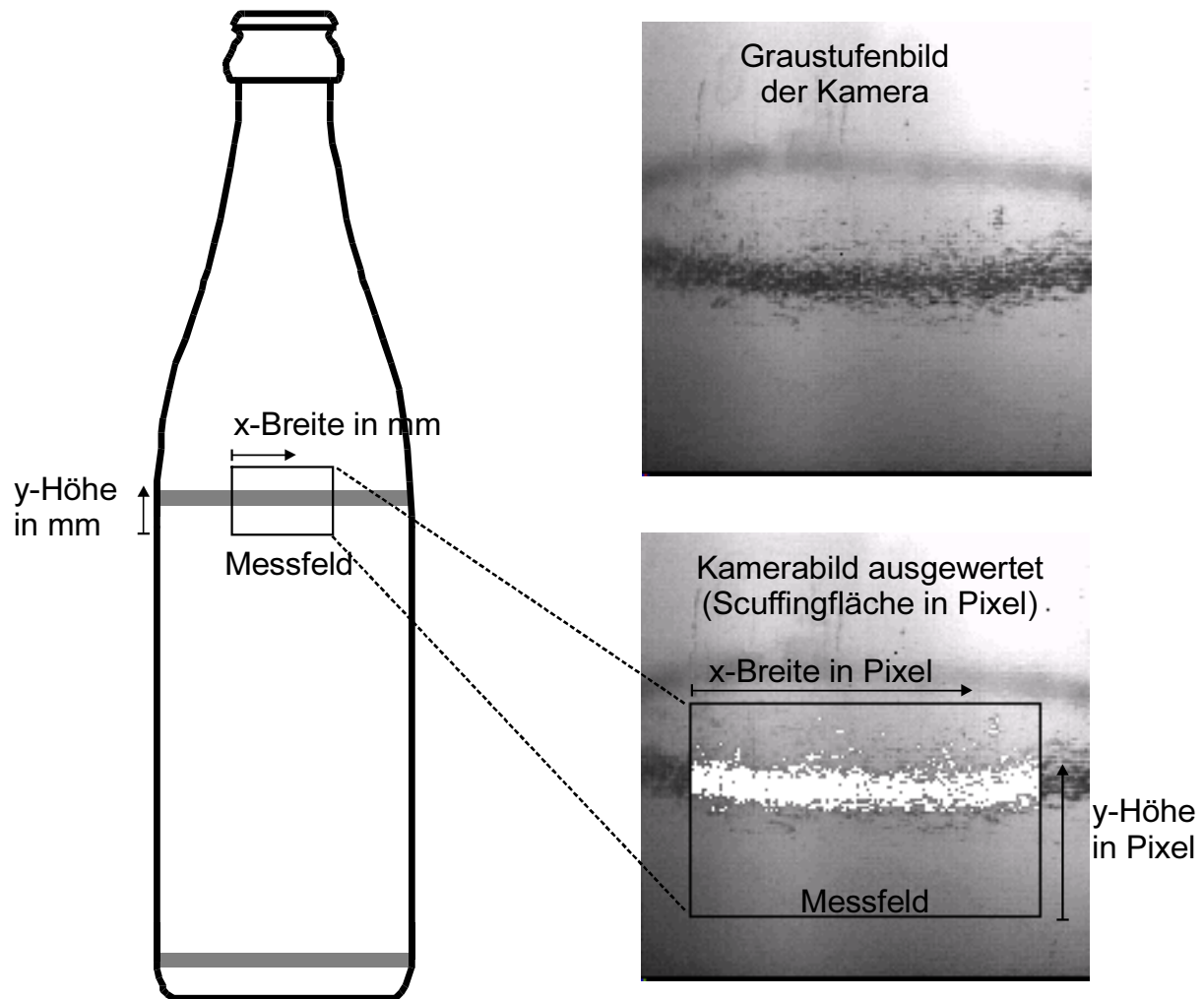


Bild 3.2. Lage des Messfeldes an der Versuchsflasche, Kamerabild und Bildschirmanzeige der Auswerteeinheit am Beispiel des Kamerasystems von Krones

Die Auswerteeinheit von Krones gibt die Fehlerfläche in [Pixel²] als **Messwert (Krones) M_K** aus:

$$\text{Messwert (Krones) } M_K = \text{Fehlerfläche im Messfeld} = [\text{Pixel}^2]. \quad (3.1)$$

Beim System der Firma Heuft liefert die Auswerteeinheit den wie folgt berechneten, **Messwert (Heuft) M_H** :

$$\text{Messwert (Heuft) } M_H = \frac{\text{Fehlerfläche im Messfeld in Pixel}^2}{x\text{-Breite des Messfeldes in Pixel}} = [\text{Pixel}]. \quad (3.2)$$

Die beiden Messwerte M_H und M_K sind abhängig vom gewählten Messfeld, das für verschiedene Flaschentypen unterschiedlich groß sein kann. Auch die Einstellungen der Kamera, wie beispielsweise die Entfernung der Kamera zur Flasche und die Parametrierung der Auswerteeinheit, beeinflussen die Messwerte. Für Parameter, die die Auswerteeinheit betreffen, können Standardeinstellungen festgelegt werden. Da es sich jedoch um eine transportable Messeinrichtung handelt, die an verschiedene Erkennungsaufgaben angepasst werden kann, werden in der Praxis die Versuchsbedingungen, wie beispielsweise der Abstand Kamera-Flasche, nie genau gleich sein. Die Messsysteme müssen deshalb bei jedem Versuch kalibriert werden, auch um die Messergebnisse der beiden Systeme miteinander vergleichen zu können. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten: das Berechnen eines standardisierten Scuffinggrades aus den Messwerten und den gegebenen Versuchsbedingungen oder das Verwenden von Referenzflaschen definierter Reibringhöhe zum Kalibrieren des Systems.

3.1.1 Standardisierter Scuffinggrad

Die Messwerte beider Systeme können in eine absolute Angabe, die Scuffingfläche in mm^2 in einem Messfeld standardisierter Breite, umgerechnet werden. Hierzu werden die Abmessungen des Messfeldes, die x-Breite und y-Höhe, an der Flasche in mm bestimmt. Mit den gewählten Koordinaten des Messfeldes in Pixel des Kamerabildes, abzulesen an den Auswerteeinheiten, kann ein für diese Einstellung gegebenes Verhältnis mm/Pixel jeweils für die x- und y-Richtung berechnet werden. Das Standardfeld kann für jeden Flaschentyp durch die x-Breite definiert werden, solange die Höhe des Messfeldes den gesamten Reibring auch bei starkem Scuffing noch beinhaltet. Der dimensionslose Faktor F_S für die Standardisierung berechnet sich nach Gleichung 3.3 aus dem Verhältnis der tatsächlichen x-Breite des Messfeldes und der Standardbreite 20 mm:

$$F_S = \frac{20 \text{ mm}}{x\text{-Breite in mm}}. \quad (3.3)$$

Aus den Messwerten beider Systeme kann dann mit Hilfe der gewählten Einstellungen, den Abmessungen des Messfeldes und des Standardisierungsfaktors ein wie folgt definierter standardisierter Scuffinggrad S in $[\text{mm}^2]$ berechnet werden:

$$S = \frac{x\text{-Breite in mm}}{x\text{-Breite in Pixel}} \cdot \frac{y\text{-Höhe in mm}}{y\text{-Höhe in Pixel}} \cdot \text{Fehlerfläche im Messfeld in Pixel}^2 \cdot F_S. \quad (3.4)$$

Für die Umrechnung des Messwertes (Heuft) M_H in den Scuffinggrad wird die obige Formel 3.4 ohne den Faktor $1/(x\text{-Breite in Pixel})$ berechnet, da diese Größe schon in den Messwert (Heuft) M_H der Gleichung 3.2 mit eingeht.

3.1.2 Beispiel für die Berechnung des standardisierten Scuffinggrades S

Im Folgenden wird am Beispiel einer Referenzflasche (Kapitel 3.1.3) für eine Reibringhöhe von 2 mm der standardisierte Scuffinggrad berechnet. Hierzu werden reale Daten für die Messfeldgröße und Messwerte der Auswerteeinheit von Krones verwendet. Der standardisierte Scuffinggrad wird anhand der obigen Gleichungen 3.1-3.4 berechnet.

Der Messwert (Krones) an der Auswerteeinheit entspricht der Fehlerfläche im Messfeld und betrug für die Referenzflasche mit einem Reibring von 2 mm Höhe:

$$M_K = 3350 \text{ Pixel}^2.$$

Tabelle 3.1. Reale Daten des Messfeldes an der Referenzflasche (NRW-Flasche, Kamerasystem Krones)

Messfeldgröße	x-Breite	y-Höhe
in mm	31,0	14,0
in Pixel	240	100

Aus der x-Breite des Messfeldes ergibt sich der Standardisierungsfaktor F_S (nach Gleichung 3.3):

$$F_S = \frac{20,0 \text{ mm}}{x - \text{Breite in mm}} = \frac{20,0 \text{ mm}}{31,0 \text{ mm}}.$$

Nach Gleichung 3.4 berechnet sich der standardisierte Scuffinggrad S der Referenzflasche:

$$S = \frac{x\text{-Breite in mm}}{x\text{-Breite in Pixel}} \cdot \frac{y\text{-Höhe in mm}}{y\text{-Höhe in Pixel}} \cdot \text{Fehlerfläche im Messfeld in Pixel}^2 \cdot F_S$$

$$S = \frac{31,0 \text{ mm}}{240 \text{ Pixel}} \cdot \frac{14,0 \text{ mm}}{100 \text{ Pixel}} \cdot 3350 \text{ Pixel}^2 \cdot \frac{20,0 \text{ mm}}{31,0 \text{ mm}}$$

$$\underline{\underline{S = 39,1 \text{ mm}^2.}}$$

Als Referenzflasche wurde eine Flasche mit Scuffing aus der Praxis gewählt. Diese Flasche wies über gesamte Messfeldbreite am Umfangs des oberen Reibrings einen visuell gleichmäßig erscheinenden Reibring einer Höhe von 2 mm auf. Theoretisch müsste sich für diese Referenzflasche mit einer Reibringhöhe von 2 mm ein standardisierter Scuffinggrad $S_{theo} = 40 \text{ mm}^2$ ergeben:

$$S_{theo} = \text{Standardbreite Messfeld in mm} \cdot \text{Reibringhöhe in mm}$$

$$S_{theo} = 20,0 \text{ mm} \cdot 2,0 \text{ mm}$$

$$\underline{\underline{S_{theo} = 40,0 \text{ mm}^2.}}$$

Diese kleine Abweichung zwischen theoretischem und gemessenem Scuffinggrad lässt sich durch leichte Unregelmäßigkeiten (fehlender Kontrast) in der Scuffingfläche der Praxisflasche erklären.

3.1.3 Kalibrieren mit Referenzflaschen

Eine weitere Möglichkeit, die Messwerte vergleichen zu können, ist der Einsatz von Referenzflaschen zum Kalibrieren der Kamerasysteme. Als Referenzflaschen werden Flaschen mit bekannter Reibringhöhe eingesetzt. Diese Methode ist vor allem sinnvoll bei online-Bestandsaufnahmen in Flaschenabfüllanlagen. Bei diesen Versuchen werden die Scuffingdaten möglichst vieler Flaschen während des Betriebes einer Abfüllanlage aufgenommen, um daraus Erkenntnisse über den Zustand des Flaschenpools zu gewinnen.

Das Kalibrieren mit Referenzflaschen ist auch beim Vermessen von nassen Flaschen eine geeignete Möglichkeit, Messwerte vergleichbar zu machen. Durch einen Wasserfilm an der Glasoberfläche wird der Kontrast des Scuffings kleiner, das Licht wird nicht mehr so stark gestreut und die zur Erkennung notwendigen Graustufenunterschiede werden verringert. So sind die Messwerte bei nassen Flaschen bei gleicher Kameraeinstellung kleiner, da die Scuffingspuren schlechter bzw. teilweise gar nicht erkannt werden. Die Referenzflaschen

müssen, um diesen Effekt auszugleichen, in gleicher Weise mit Wasser benetzt werden wie die zu messenden Flaschen.

Eine Reibringhöhenmessung, die mit dem Vermessen des Reibrings mit einer Schieblehre vergleichbare Ergebnisse liefert, ist in beiden Messgeräten integriert. Bei beiden Systemen wird die Reibringhöhe in Pixel angegeben. Bei System Krones korrelieren die beiden Größen Reibringhöhe und Anzahl der Fehlerpixel sehr gut, beim System Heuft fällt der Wert für die Reibringhöhe teilweise auf 0 Pixel ab, obwohl die Flaschen Scuffing aufweisen, und auch der Wert für die Reibfläche >0 ist. Dieser Effekt hat jedoch keine Auswirkungen auf die Messung des Scuffinggrades, da hier der Messwert (Heuft) in Fehlerpixel und nicht die Reibringhöhe verwendet wurde. Außerdem beschränkt sich dieser Fehler lediglich auf Flaschen mit vergleichsweise schwachen Scuffingspuren.

3.2 Versuchsdurchführung zum Bestimmen des Scuffinggrades

Je nach untersuchter Fragestellung wurde das Kamerasystem im Einzelbetrieb oder online mit automatischem Triggern der Aufnahmen betrieben.

3.2.1 Einzelbetrieb

Die Messungen im Einzelbetrieb wurden an Einzelflaschen durchgeführt, deren Festigkeit anschließend bestimmt wurde. Im Einzelbetrieb wurde der Scuffinggrad entlang des Reibrings einer Flasche durch Drehen der Flasche vor der Kamera untersucht. Für ein möglichst maßstabsgetreues Abbild des Scuffings wird die Flasche nur auf der der Kamera zugewandten Seite aufgenommen und das Messfeld auf maximal ein Sechstel des Flaschenumfangs begrenzt. Abhängig vom Durchmesser der Flasche ergeben sich bei einer Messfeldbreite von etwa 16 bis 32 mm pro Flasche zwischen sechs und zwölf Messfelder. Der Scuffinggrad wurde dabei entweder am oberen oder unteren Reibring ermittelt. Der mittlere Scuffinggrad \bar{S} der Flasche wird als arithmetischer Mittelwert aus den sechs bis zwölf Messungen, getrennt für den oberen und unteren Reibring, berechnet.

3.2.2 Online-Messungen

In Flaschenabfüllanlagen kann mittels eines automatischen Triggers, der direkt von den einsträngig vorbeigeführten Flaschen auf der Förderkette ausgelöst wird, bis zu einem Durchsatz von 30.000 bzw. 60.000 Fl/h gemessen werden. Das Kamerasystem wird hierzu an einer Förderstrecke mit Einzelflaschenführung, beispielsweise am Einlauf oder Auslauf der Leerflaschen-Inspektionsmaschine, aufgestellt. Während der online-Messungen werden über mehrere Stunden an einer Flaschenabfüllanlage die Reibringhöhe und der Scuffinggrad jeder verarbeiteten Flasche aufgezeichnet. Die zwischengespeicherten Messwerte werden über eine serielle Schnittstelle an einen PC zur weiteren Auswertung ausgegeben. Mit entsprechender Auswertesoftware wird der standardisierte Scuffinggrad S jeder Flasche und daraus die empirische Verteilungsfunktion des jeweiligen Flaschenpools eines Abfüllbetriebes bestimmt.

Mit den Kamerasystemen stehen neuartige Messverfahren zur Verfügung, mit deren Hilfe die Scuffingdaten einer sehr großen Stichprobe der Grundgesamt eines Flaschenpools zu ausgewertet werden können. Durch manuelles Vermessen der Flaschen konnte bisher selbst mit hohem personellen Aufwand nur ein Bruchteil der mit dem Kamerasystem betrachteten Stichprobe untersucht werden.

Beim Vermessen nur eines Messfeldes mit einer tatsächlichen Breite von 20 mm werden beispielsweise an NRW-Flaschen pro Flasche etwa 9,5 % des Umfangs berücksichtigt. Aus Einzelmessungen ergab sich ab einer Reibringhöhe von etwa 2 mm ein maximaler Variationskoeffizient von 40 % innerhalb des Reibringes einer Flasche. So kann bei den online-Messungen mit hinreichender Sicherheit an jeder Flasche in nur einem Messfeld gemessen werden. Ein viel höherer technischer Aufwand für eine Totalkontrolle der Flaschen mit zusätzlichen Kamerasystemen, erweiterten Auswerteeinheiten sowie Drehstationen zum definierten Weiterdrehen der Flaschen zwischen den Kameras, um den Scuffinggrad an weiteren Messfeldern entlang des Reibringes zu bestimmen, ist demnach nicht sinnvoll.

Die Kamerasysteme zeichnen bei der online-Bestandsaufnahme über mehrere Stunden die Flaschendaten jeder verarbeiteten Flasche auf, so dass die betrachtete Stichprobe aus der Grundgesamtheit (Flaschenpool des jeweiligen Abfüllbetriebs) sehr groß ist. Bei NRW-Flaschen entspricht diese Stichprobe 9,5 % der betrachteten Grundgesamtheit. So wird durch die große, meist hunderttausende von Flaschen umfassende Stichprobe bei diesen online-Messungen der Vertrauensbereich (Gleichung 3.5), in dem der wahre Mittelwert der Grundgesamtheit liegt, sehr klein (Tabelle 3.2). Der Vertrauensbereich μ , eine in der Verpackungstechnik übliche Größe zum Beschreiben der Güte einer Stichprobe, berechnet sich nach folgender Gleichung [91]:

$$\mu_{o,u} = \bar{x} \pm \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n}}, \quad (3.5)$$

wobei: \bar{x} Mittelwert der Stichprobe,
 s_x Standardabweichung der Stichprobe,
 t Wert aus der Studentverteilung für gewähltes Vertrauensniveau und Stichprobenanzahl (z. B. $t = 1,965$; für $n = 500$ und $t = 1,960$; für $n \rightarrow \infty$ jeweils bei zweiseitiger Abgrenzung und einem Vertrauensniveau von 95 %),
 n Anzahl der Messwerte der Stichprobe (entspricht bei NRW-Flaschen 9,5 % der vermessenen Flaschen).

Tabelle 3.2. Beispiele für die oberen μ_o und unteren μ_u Grenzen des Vertrauensbereiches sowie und die prozentualen Anteile des Vertrauensbereichs an $\bar{\mu}$ bei online-Messungen verschiedener Abfüllbetriebe

μ_o	μ_u	% von $\bar{\mu}$	n	\bar{x}	s_x
43,1	41,9	1,3	12.056	42,5	31,8
29,9	28,9	1,6	10.251	29,4	24,2
26,6	25,8	1,4	12.227	26,2	20,7
16,7	16,1	2,0	13.110	16,4	19,8
14,4	13,8	1,9	17.376	14,1	18,3
12,2	11,8	1,8	21.708	12,0	16,5

Bei online-Bestandsaufnahmen in Brauereien wurde das verwendete Kamerasystem jeweils vor Ort mit zwei Referenzflaschen einer definierten Reibringhöhe von 2 und 3 mm kalibriert. Diese Reibringhöhen wurden gewählt, da laut der Poolvereinbarung zwischen den deutschen Brauereien und dem Deutschen Brauer-Bund [25] bereits Flaschen mit einer Reibringhöhe von >2 mm ausgeschieden werden sollen.

Um den Scuffinggrad zu veranschaulichen ist in Tabelle 3.3, beispielhaft für 0,7-l-GDB-Flaschen, die visuelle Beurteilung und die manuell gemessenen Reibringhöhe der Klassen (0)-(6) dargestellt. Eine Einteilung des Flaschenpools in sechs Klassen mit Klassengrenzen innerhalb $S = 10 \text{ mm}^2$ hat sich aus den Messungen an verschiedenen Flaschentypen als sinnvoll erwiesen. Eine größere Klassenzahl ergibt keine weitere Differenzierung der Klassen untereinander.

Tabelle 3.3. Scuffinggrad S , die visuelle Beurteilung sowie die manuell gemessene, maximale Reibringhöhe in mm der Scuffingklassen (0)-(6) für 0,7-l-GDB-Flaschen

Scuffing-klasse	S in mm^2	Visuelle Beurteilung des Scuffings	maximale Reibringhöhe in mm
(0)	0	hüttenneue Flaschen, kein Scuffing sichtbar	-
(0*)	0	hüttenneue Flaschen, einmal gereinigt, kein Scuffing sichtbar	-
(0)	0	hüttenneue Flaschen, ausschließlich chemisch beansprucht, kein Scuffing sichtbar	-
(1)	0,0-10,0	unterbrochene Reibringe	1,0
(2)	10,1-20,0	sehr schwache, teilweise oben und unten ausgefranste, durchgehende Reibringe	1,5
(3)	20,1-30,0	stärkere, teilweise oben und unten ausgefranste, durchgehende Reibringe	3,0
(4)	30,1-40,0	durchgehende, stark weiß erscheinende Reibringe	4,0
(5)	40,1-50,0	durchgehende, stark weiß erscheinende Reibringe zusätzlicher zweiter nur schwacher, nicht durchgehender Reibring unterhalb des ersten	5,0 (4,0)
(6)	>50,1	durchgehende, stark weiß erscheinende Reibringe	>5,0

Aus der Tabelle geht hervor, dass die manuell gemessenen Reibringhöhen nicht linear in einen standardisierten Scuffinggrad umgerechnet werden können. An einer Praxisflasche wird der gemessene immer vom theoretischen Scuffinggrad abweichen (siehe auch Beispielrechnung 3.1.2). Dies erklärt sich zum einen dadurch, dass bei Praxisflaschen innerhalb der Scuffingfläche im Reibringbereich Bereiche vorhanden sind, die kein Scuffing aufweisen (siehe auch Bild 3.2). Außerdem ist die Scuffingfläche eines Reibringes nie scharf abgegrenzt, d. h. die Ränder sind ausgefranst, so dass auch Fehlerpixel außerhalb des Reibringes vorhanden sind.

3.3 Bestimmen der Festigkeit von Glasflaschen

Die Festigkeitseigenschaften von Glasflaschen werden durch folgende Messgrößen beschrieben: Innendruckfestigkeit, Schlagfestigkeit, Temperaturwechselfestigkeit (Beständigkeit gegenüber Thermoschock) und Axialkraftbelastbarkeit. Da Mehrwegglasflaschen normalerweise nur in Kästen gestapelt werden, sind im praktischen Gebrauch und beim Abfüllen der Flaschen vor allem die ersten drei Eigenschaften von Bedeutung. Die Temperaturwechselfestigkeit ist hauptsächlich vom Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Wandstärke des Flaschenglases, aber weniger von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig, deshalb wird in dieser Arbeit ausschließlich der Einfluss des Scuffings auf die Innendruck- und Schlagfestigkeit untersucht.

3.3.1 Innendruckfestigkeit

Ein Innendruckversuch für Hohlglasbehältnisse kann nach DIN ISO 7458 [17] entweder als Attribut- oder Variablenprüfung stattfinden. Bei der Attributprüfung wird der Innendruck bis auf einen vorgegebenen Prüfdruck erhöht und die Anzahl bzw. Quote der durch die Druckbeanspruchung gebrochenen Proben festgehalten (pass test). Bei der Variablenprüfung wird der Innendruck so lange gesteigert, bis es zum Bruch der Flaschen (Zerstörungstest) kommt. Ein solches Messgerät zur Zerstörungsprüfung wurde erstmals 1950 von PRESTON [81] entwickelt. Die heutigen Messgeräten basieren noch auf diesem Messprinzip. Die Innendruckfestigkeit der Flaschen in dieser Arbeit wurde anhand einer Variablenprüfung mit einem Ramp Pressure Tester der Firma American Glass Research (AGR), Butler, USA, bestimmt. Hier wird in den zu prüfenden Flaschen ein hydrostatischer Überdruck von maximal 59,0 bar erzeugt, der in der Regel zum Bersten der Flasche führt. Abweichend von der DIN ISO 7458 [17] wird bei diesem Messgerät der Druck nicht schrittweise um 1 bar gesteigert und jeweils für 1 Minute konstant gehalten, sondern kontinuierlich mit einer konstanten Druckanstiegsgeschwindigkeit von 4,1 bar/s erhöht. Dieses Verfahren und das Messgerät beschreibt die amerikanische Norm ASTM C-147-91 [2]. Der Berstdruck p_t wird beim Ramp Pressure Tester für alle Probeflaschen im Gerät entsprechend der ASTM nach folgender Formel in eine äquivalente 1-Minuten-Druckfestigkeit p_{60} in bar Überdruck umgerechnet:

$$p_{60} = \frac{p_t - 1,78}{1,38}. \quad (3.6)$$

3.3.2 Schlagfestigkeit

Für die Messung der Schlagfestigkeit wurde ein bereits früher am Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik entwickeltes Schlagpendelmessgerät verwendet [108]. Es wurden lediglich die, auf die Flaschentypen abgestimmten, Widerlager ausgetauscht [55]. Üblicherweise werden Pendelschlagversuche an Glasbehältnissen nach DIN 52295 [21] durchgeführt. Für die Messung der Schlagfestigkeit wurde einer Variablenprüfung ausgewählt. Dabei werden die Probeflaschen mit wiederholten Pendelschlagversuchen mit steigendem Schlagimpuls bis zum Bruch beansprucht.

Den schematischen Aufbau des Messgerätes in der Ansicht und Draufsicht zeigt Bild 3.3. Ein in der Höhe verstellbares Schlagpendel mit einer gehärteten Stahlkugel ($\varnothing 55$ mm) als Schlagkörper schlug die Versuchsflaschen in Höhe des oberen oder unteren Reibringes an. Dazu wurde das Schlagpendel von Hand um einen bestimmten Winkel ausgelenkt. Die Geometrie, das Gewicht und der Auslenkungswinkel des Pendels bestimmen die Aufprallgeschwindigkeit des Schlagkörpers auf die Glasflasche, die übertragene kinetische Energie und somit den auf die Versuchsflasche einwirkenden Schlagimpuls, der nach der Gleichung 3.9 berechnet werden kann. Als Widerlager dienten in der jeweiligen Form (NRW, GDB) hergestellte Messingflaschen. Der Werkstoff Messing besitzt je nach den enthaltenen Cu- und Zn-Anteilen einen mit Flaschenglas vergleichbaren Elastizitätsmodul im Bereich von $E_M = 7 \cdot 10 \cdot 10^{10}$ N/m². Laut DIN 52295 [21] sollte das Widerlager mindestens die 12fache Masse des Schlagpendels besitzen und möglichst wenig nachfedern. Das verwendete Prüfgerät besaß, abhängig vom eingesetzten Widerlager, mindestens die 50fache Masse. Ging eine Versuchsflasche nach erfolgtem Pendelschlag nicht zu Bruch, wurde die Flasche um 30° gedreht, das Pendel weiter ausgelenkt und der Versuch wiederholt.

Das verwendete Schlagpendelmessgerät weicht von dem in der DIN 52295 beschriebenen und von der Firma AGR, Butler, USA, vertriebenen „Preston Impact Tester“ ab. Ein wesentlicher Unterschied besteht vor allem im Widerlager, welches beim AGR Gerät leichter und fest mit dem gesamten Messgerät verbunden ist. PENZKOFER [76], der verschiedene Messgeräte zur Bestimmung der Schlagfestigkeit untersuchte, bemängelte in seinen Ausarbeitungen die zu geringe Masse des Widerlagers des Preston Impact Testers. Für die Bauweise des Schlagpendelmessgeräts des Lehrstuhls stand vor allem eine Simulation der in der Praxis vorherrschenden Schlagbeanspruchungen einer Flasche durch den Aufprall anderer Flaschen in einer Abfüllanlage im Vordergrund. Die Pendelmasse des Messgerätes entsprach etwa der Masse voller Flaschen (NRW, Ale). Aufgrund der genannten Unterschiede der beiden Geräte sind die Ergebnisse nicht unmittelbar miteinander vergleichbar.

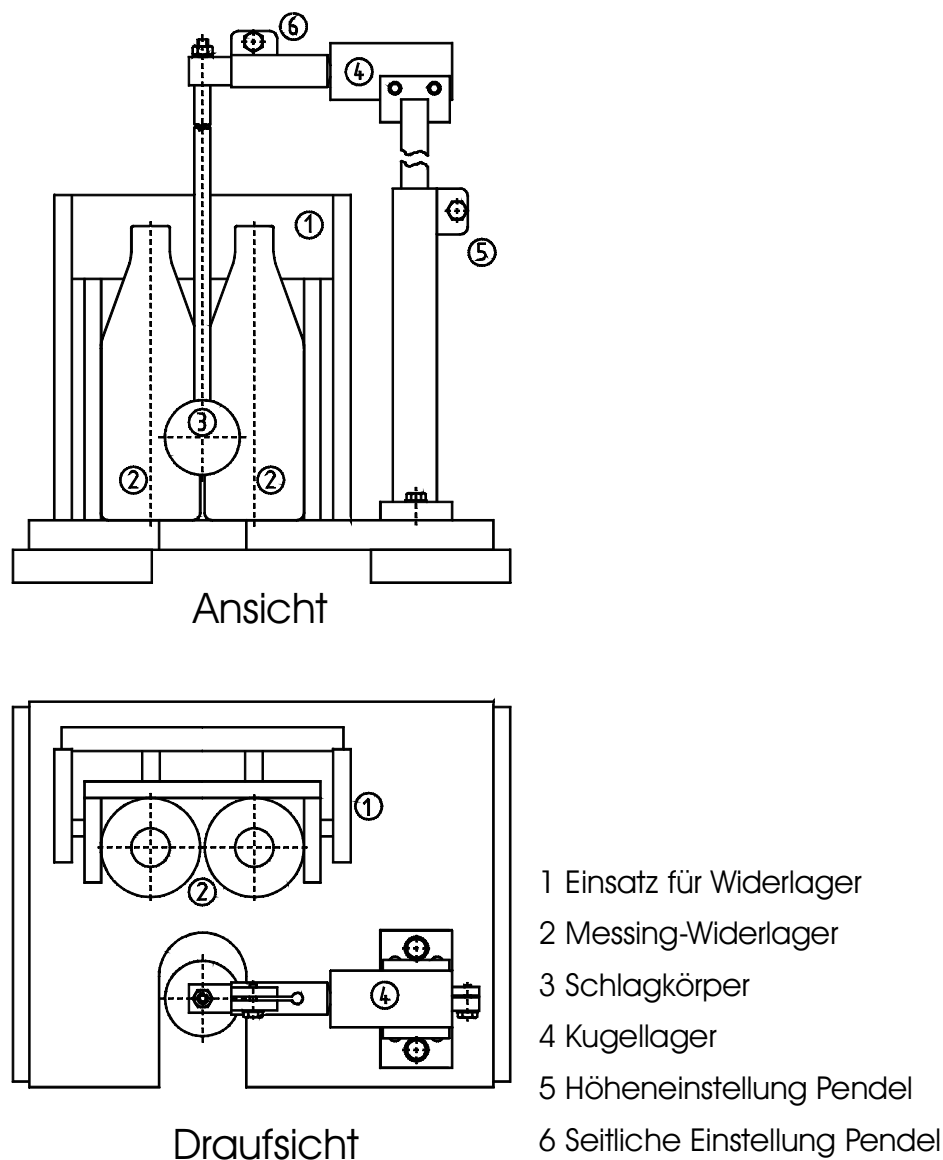


Bild 3.3. Schematischer Aufbau des verwendeten Schlagpendelmessgerätes ohne Testflasche [112]

Gemäß DIN 52295 gelten die Gleichungen 3.7-3.9 für ein idealisiertes, sogenanntes mathematisches Pendel, das sich durch eine punktförmige Masse und eine starre, masselos gedachte

Pendelstange definierter Länge auszeichnet. Beim verwendeten Messgerät betrug die rechnerische Pendelmasse $m_P = 0,94 \text{ kg}$ und die mathematische Pendellänge $l_P = 275 \text{ mm}$. Die Aufprallgeschwindigkeit v_P des Schlagkörpers errechnet sich wie folgt aus dem Auslenkungswinkel α des Pendels, der Pendellänge l_P sowie der Erdbeschleunigung g :

$$v_P = \sqrt{2 \cdot g \cdot l_P \cdot (1 - \cos \alpha)}. \quad (3.7)$$

Da es sich bei einem solchen Schlag um ein vergleichsweise langsames Ereignis handelt, wird laut RAWSON [87] die gesamte Energie in Verformungsenergie der Flasche umgewandelt. Durch das Einbeziehen der Pendelmasse m_P erhält man die verformend wirkende, kinetische Energie E_{kin} unmittelbar vor dem Aufschlag:

$$E_{kin} = \frac{m_P}{2} \cdot v_P^2 = m_P \cdot g \cdot l_P \cdot (1 - \cos \alpha). \quad (3.8)$$

Der Schlagimpuls I unmittelbar beim Aufschlag lässt sich aus dem Produkt der Aufprallgeschwindigkeit v_P und der Pendelmasse m_P berechnen:

$$I = m_P \cdot v_P = m_P \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot l_P \cdot (1 - \cos \alpha)}. \quad (3.9)$$

Der Schlagimpuls, der zum Bruch einer Flasche führt wird als deren Schlagfestigkeit bezeichnet.

3.4 Tribologische Systeme der Mehrwegflaschen

Im Folgenden werden die Messgeräte sowie die Messmethoden beschrieben mit deren Hilfe das Reibverhalten von Mehrweg-Glasflaschen mit unterschiedlichen Reibpartnern untersucht wurde.

3.4.1 Bestimmen von Haftreibungskoeffizienten

Die Haftreibungskoeffizienten zwischen Glasflaschen mit verschiedenen Reibpartnern wurden mit dem Tilt Table der Firma AGR, Butler, USA, gemessen. Zur Messung werden beispielsweise drei Flaschen pyramidenförmig auf den horizontal kippbaren Probenstisch gelegt. Bild 3.4 zeigt Fotos des Messgerätes in Startposition und bei gekipptem Probenstisch.



Bild 3.4. Tilt Table zum Bestimmen des Haftreibungskoeffizienten (hier zwischen 0,7-l-GDB-Flaschen)

Eine seitliche Führungsschiene verhindert das Wegrollen der unten liegenden Flaschen. Der Tisch wird, angetrieben von einem Schrittmotor, mit einer Geschwindigkeit von $3,6^\circ/\text{s}$ bis zu einer maximalen Neigung von 45° gegen die Horizontale geneigt. Gerät die oberste Flasche ins Rutschen, wird ein Ausschalter betätigt. Der Neigungswinkel des Probetisches kann an einer Skala in Winkelgraden abgelesen werden. Der Tangens dieses Neigungswinkels entspricht dem Haftreibungskoeffizienten. Mit diesem Versuchsaufbau können auch andere Reibpaare, wie beispielsweise Glasflasche und Geländerführung gemessen werden. Hierzu wird statt der unteren zwei Glasflaschen ein zugeschnittenes Stück einer Geländerführung verwendet.

3.4.2 Bestimmen von Gleitreibungskräften

Die Gleitreibungskräfte zwischen Glasflaschen und einer Glasplatte wurde mit einer Universalprüfmaschine 81801 der Firma Frank, Weinheim, bestimmt. Eine liegende Glasflasche wurde mit konstanter Geschwindigkeit von 500 mm/min über eine Glasplatte gezogen. An der Universalprüfmaschine wurde die benötigte Zugkraft F_{Zug} über die gezogene Wegstrecke W aufgenommen. Der Betrag der hierzu benötigten Zugkraft F_{Zug} entspricht der Gleitreibungskraft F_{GR} , die entgegen der Bewegungsrichtung wirkt. Der Versuchsaufbau (Bild 3.5) wurde ausschließlich für Vergleichsmessungen der Gleitreibungskräfte zwischen trockenen und nassen Glasoberflächen verwendet.

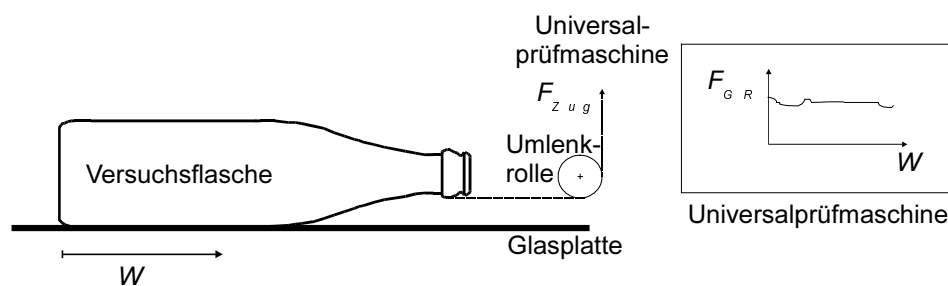


Bild 3.5. Versuchsaufbau zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten

3.4.3 Kratzversuche im Labormaßstab

Um die Oberflächenbeschädigungen von Mehrwegflaschen in unterschiedlichen tribologischen Systemen zu beurteilen, wurden Kratzversuche in einem Prüfstand im Labormaßstab durchgeführt. Das Beanspruchungsprinzip ist in Bild 3.6 dargestellt.

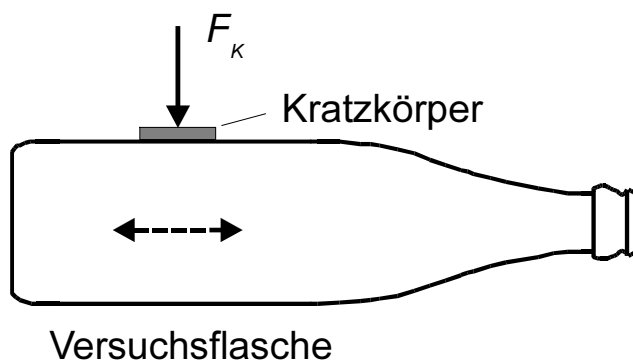


Bild 3.6. Versuchsaufbau zur Entstehung von Kratzspuren

Es wurde getestet, bei welcher Krafteinwirkung, welchem Schmiermittel und Kratzkörper die Oberfläche einer Versuchsflasche im einminütigen Kratzversuch sichtbar beschädigt wird. Dazu scheuerte ein Kratzkörper an einer in horizontaler Richtung, mit einer Frequenz von 75 min^{-1} und einer Amplitude von 14 mm, hin und her bewegten Mehrwegflasche.

Die Kratzkörper bestanden aus folgenden Werkstoffen: hüttenneues und gebrauchtes Glas verschiedener Flaschentypen, Metall und Kunststoff (PE). Als Kratzkörper wurde eine Scherbe oder ein Zuschnitt des jeweiligen Werkstoffes mit einer Größe von etwa $40 \times 40 \text{ mm}$ verwendet. Weiterhin wurde die Anpresskraft F_K , die Versuchsflaschen (Glasflaschen neu oder gebraucht unterschiedlicher Flaschentypen sowie Kunststoffflaschen) sowie das Schmiermittel (trocken, Wasser, Kettengleitmittellösung, Schmutzwasser) variiert.

3.4.4 Flaschenförderstrecke

Um die oben genannten, aus dem Laborversuch gewonnenen Ergebnisse zu verifizieren, wurden Versuche auf einer dem Lehrstuhl von der Firma Max Kettner Maschinenfabrik, Rosenheim, zur Verfügung gestellten Flaschenförderstrecke im Technikum der Fakultät durchgeführt (Bild 3.7). Dabei wurden jeweils 50 Versuchsflaschen unter verschiedenen Förderbedingungen, leer und voll im Rundlauf gefördert und dabei die Entstehung von Oberflächenzerkratzen untersucht. Als Versuchsflaschen wurden hüttenneue NRW-Flaschen eingesetzt, die zuvor fünfmal in einer Flaschenreinigungsmaschine gereinigt wurden, um die schützende Kaltendvergütung zu entfernen.

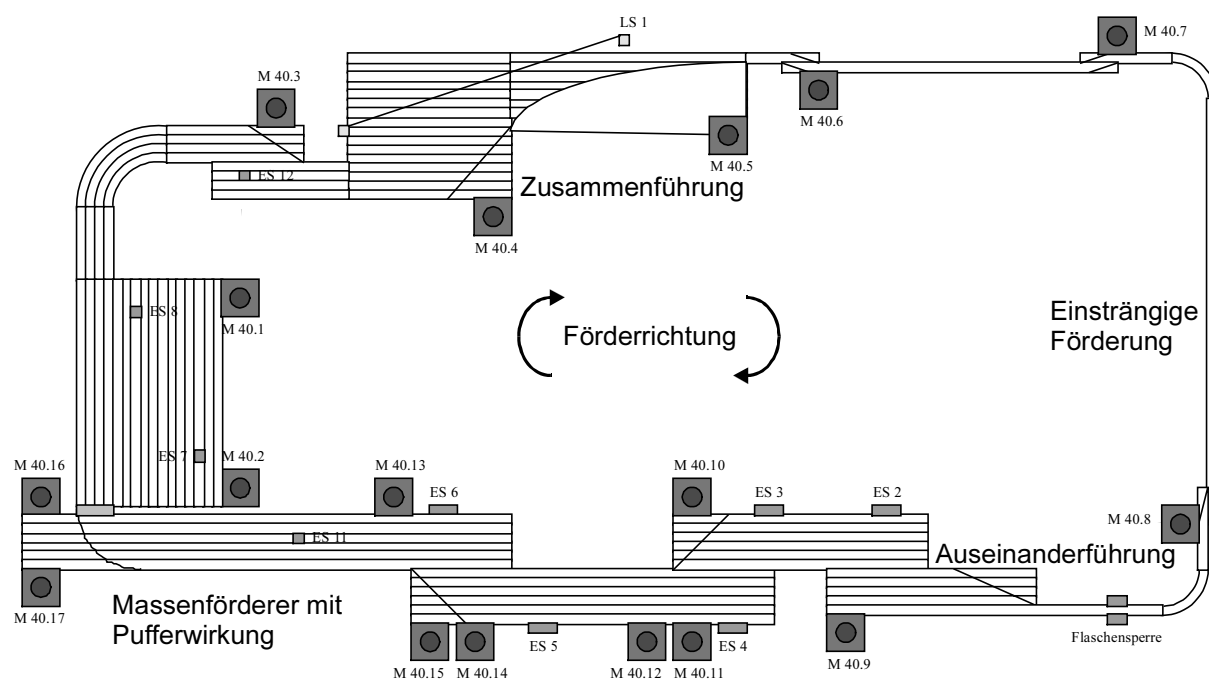


Bild 3.7. Flaschenförderstrecke im Technikum [84]

Die Flaschenförderstrecke verfügt über je eine Zusammen- und Auseinanderführung, ein Teilstück mit einsträngiger Förderung und ein mehrsträngiges Teilstück (Massenförderer) mit Pufferwirkung. Diese Anordnung entspricht etwa einem Förderabschnitt in einer Abfüllanlage

zwischen zwei Einzelaggregaten. In einer Flaschenabfüllanlage einer Brauerei gibt es meist fünf solcher Förderabschnitte zwischen den folgenden Einzelaggregaten:

- Auspackmaschine,
- Flaschenreinigungsmaschine,
- Leerflaschen-Inspektionsmaschine,
- Flaschenfüll-/Flaschenverschließmaschine,
- Flaschenausstattungsmaschine,
- Einpackmaschine.

Der Förderabschnitt zwischen Leerflaschen-Inspektionsmaschine und Flaschenfüll-/Flaschenverschließmaschine ist meist elektronisch verblockt und hier wird fast ausschließlich einsträngig gefördert. In anderen Abschnitten findet hingegen keine einsträngige Förderung der Flaschen statt. So kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass etwa vier bis fünf Umläufe in der Flaschenförderstrecke einem Umlauf in einer Abfüllanlage der Praxis entsprechen. Hierbei wurde nicht berücksichtigt, dass in der Praxis teils leere, teils volle Flaschen gefördert werden.

3.5 Versuche zur mechanischen Beanspruchung in verschiedenen Abfüllanlagen

Im Folgenden werden die Versuchsdurchführung und die Auswertemethoden der zur Entstehung von Scuffing in verschiedenen Abfüllanlagen durchgeführten Versuche beschrieben. Hierfür wurden Untersuchungen in 15 Brauereien mit insgesamt 18 Abfüllanlagen durchgeführt. Die Nennausbringungen der Abfüllanlagen erstreckten sich von 36.000 bis 120.000 Fl/h, die Baujahre von 1970 bis 1998. Der technische Stand der Abfüllanlagen war aufgrund der weiten Spanne der Baujahre sehr unterschiedlich. Allerdings fielen auch ältere Abfüllanlagen, wie beispielsweise eine Abfüllanlage aus dem Baujahr 1992, durch technisch gute Detaillösungen auf. Die Regelkonzepte der Abfüllanlagen waren sehr unterschiedlich und reichten von unregelmäßigen Anlagen mit fest vorgegebenen Geschwindigkeiten für jede Flaschenförderkette bis zu geschwindigkeitsgeregelten Förderketten durch frequenzmodulierbare Motoren im Rahmen von übergeordneten Steuerungen. Im Ergebnisteil (Kapitel 4) werden diese Abfüllanlagen willkürlich mit den Buchstaben A bis R bezeichnet, wobei gleiche Buchstaben in unterschiedlichen Versuchen nicht auf die gleichen Abfüllanlagen schließen lassen.

3.5.1 Entwickeln von Dummy-Flaschen

Um die mechanische Beanspruchung der Flaschen in Einzelaggregaten und in Förderstrecken der Abfüllanlagen zu quantifizieren, wurden sogenannte Dummy-Flaschen entwickelt. Bei den Dummy-Flaschen handelt es sich um mit Polystyrol-(PS)-Folie ummantelte (gesleevte) Flaschen. Die PS-Folie wird bei mechanischer Beanspruchung beschädigt. Der Grad der Beschädigung ist ein Maß für die Stärke der Beanspruchung. Ein einmaliger Durchlauf durch Teilstücke der Flaschenabfüllanlage wie Flaschenförderer oder Einzelaggregat genügt, um an Oberflächenbeschädigungen und Druckstellen der PS-Folie Schwachstellen zu erkennen. Eine Beurteilung ist visuell ohne zusätzliche Hilfsmittel möglich. Die lediglich durch Aufschneiden des PS-Schlauches abzulösenden Dummy-Etiketten können archiviert werden und beispielsweise zu einem Vorher/Nachher-Vergleich bei Versuchen zum Optimieren einer Flaschenabfüllanlage dienen.

Diese Dummy-Flaschen Methode bietet große Vorteile gegenüber dem Verwenden von hüttenneuen oder mehrmals gereinigter Glasflaschen, die in derartigen Versuchen erst nach

sehr vielen Umläufen (mindestes 50) sichtbare Kratzspuren an der Glasoberfläche aufwiesen. In Vorversuchen wurde die Eignung unvergüteter sowie mit Etiketten aus verschiedenen Materialien ummantelter Glasflaschen für den Einsatz als Dummy-Flaschen untersucht. Dabei wurden mit einer PS-Folie die besten Ergebnisse erzielt.

Zur Herstellung der Dummy-Flaschen werden hüttenneue Glasflaschen mit einer geschäumten PS-Folie gesleevt. Die verwendete PS-Folie wurde aus mit Titandioxid weiß eingefärbtem und mit Ammoniumhydrogencarbonat (NH_4HCO_3) aufgeschäumtem PS hergestellt. Das Flächengewicht der Folie betrug 50 g/m^2 und die Dichte: 380 kg/m^3 . Bei der PS-Folie handelte es sich um eine koextrudierte PS-Folie mit einer Gesamtdicke von $140 \mu\text{m}$. Der Kern der Folie besteht aus geschäumtem PS von $125 \mu\text{m}$ Dicke. Dieser wird beidseitig mit sogenannten PS-Skin-Schichten aus nicht geschäumtem PS mit $10 \mu\text{m}$ Dicke außen (weiße Seite) bzw. $3\text{-}5 \mu\text{m}$ Dicke innen (graue, normalerweise bedruckte Seite) umgeben. Die Begriffe außen und innen beziehen sich auf das Aufbringen der Folie auf die Flasche bei der Herstellung der Dummy-Flaschen. Dabei muss die Folienrichtung beachtet werden, da Folie nur in Extrusionsrichtung schrumpft. Die handelsübliche PS-Folie mit einer Gesamtdicke von $140 \mu\text{m}$ wird üblicherweise zum Etikettieren von Einwegflaschen für Softdrinks verwendet und wurde von der Firma Gerro Plast, Düsseldorf, bezogen.

Ein auf die Flaschengröße abgestimmter Folienzuschnitt (Bild 3.8) kann mit einem Lösungsmittel (Tetrahydrofuran) zu einem Schlauch zusammengefügt werden und lässt sich mit einem Heißluftfön bei etwa $300 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr gut an die Kontur einer Flasche über den gesamten zylindrischen Bereich anschrumpfen. Die entwickelte Dummy-Flaschen Methode wurde in die METHODENSAMMLUNG DER MEBAK [69], Band V Gebinde und Produktausstattungs-mittel unter Kapitel 3.4.34: Schwachstellenanalyse und Beurteilung von Flaschenabfüll-anlagen mittels Dummy-Flaschen, aufgenommen.

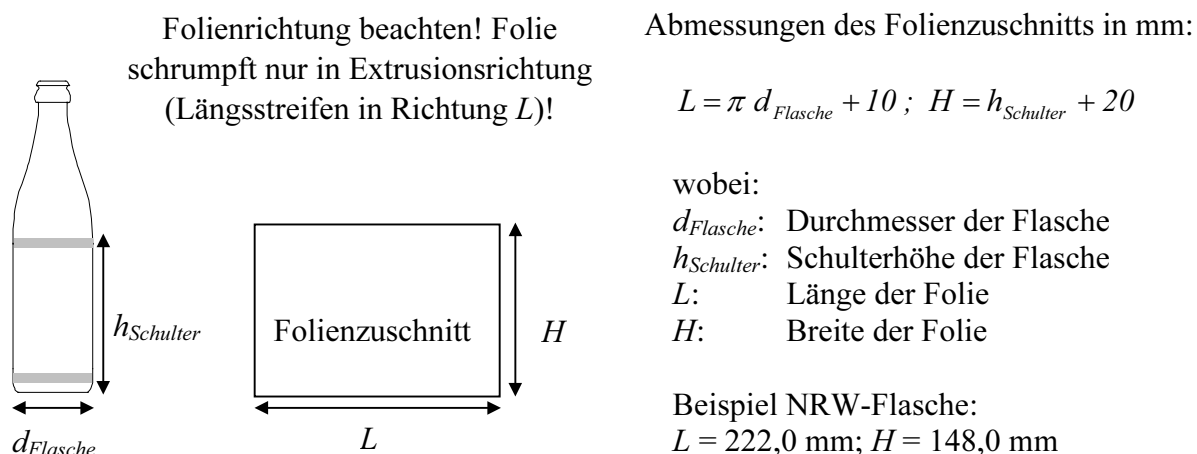


Bild 3.8. Abmessungen des benötigten Folienzuschnitts [69]

3.5.1.1 Beurteilen der Dummy-Flaschen

An den Dummy-Flaschen, die auf den Förderabschnitten zwischen den Einzelaggregaten eingesetzt wurden, waren ausschließlich Druckspuren an den Reibringbereichen vorhanden. Diese Dummy-Flaschen wurden anhand der Stärke der Beschädigung in unterschiedliche

Beschädigungsklassen \bar{B} von 0 bis 5, die für NRW-Flaschen einer Beurteilung von sehr gut bis unbefriedigend entsprechen, eingeteilt (Tabelle 3.4). Gemäß Tabelle 3.4 können Beschädigungsklassen bis 2 als befriedigend, zwischen 2 und 3 als ausreichend betrachtet werden. Ab der Beschädigungsklasse 4 (mangelhaft) ist der jeweilige Abschnitt als verbesserungsbedürftig einzustufen. Bild 3.9 zeigt Fotos von Dummy-Flaschen verschiedener Beschädigungsklassen.

Tabelle 3.4. Beurteilung der Beschädigungen von Dummy-Flaschen verschiedener Beschädigungsklassen \bar{B} an den Reibringbereichen für NRW-Flaschen

Beschädigungsklasse \bar{B}	Beschreibung der Beschädigung	Beurteilung
0	keine Druckstellen an den Reibringen	sehr gut
>0-1	leichte Druckstellen an den Reibringen	gut
>1-2	mittelstarke Druckstellen an den Reibringen	befriedigend
>2-3	deutliche Druckstellen an den Reibringen	ausreichend
>3-4	teilweise eingerissene Etiketten an den Reibringen	mangelhaft
>4-5	deutlich eingerissene Etiketten an den Reibringen	unbefriedigend

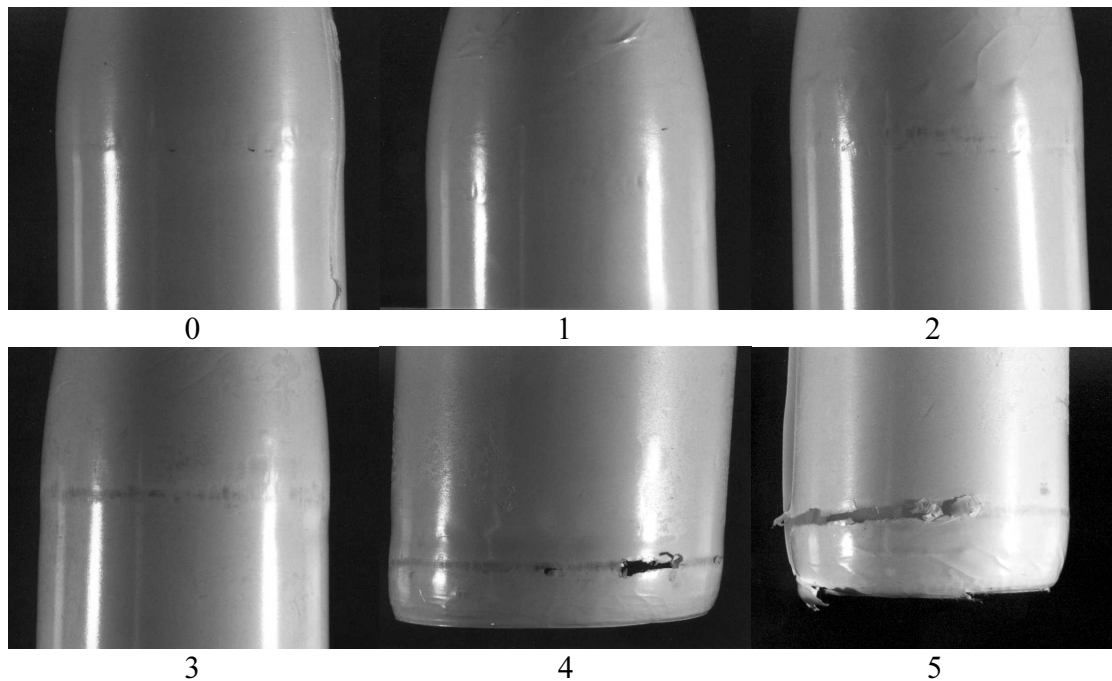


Bild 3.9. Bilder von NRW-Dummy-Flaschen der sechs Beschädigungsklassen nach Tabelle 3.4

Pro Förderabschnitt wurden bis zu zehn Dummy-Flaschen eingesetzt. Die Versuchsflaschen wurden am Auslauf eines Einzelaggregates in den Flaschenstrom eingestellt und vor dem Einlauf des nächsten Einzelaggregates vom Flaschenförderer genommen. Abhängig vom Transportweg der Flasche auf der Förderstrecke, entlang des Flaschenführungsgeländers oder in der Mitte des Flaschenpulks, können sich die Beschädigungen der einzelnen Dummy-Flaschen unterscheiden. Zur Auswertung der Versuche werden die arithmetischen Mittelwerte \bar{B} der eingesetzten Dummy-Flaschen pro Förderabschnitt bestimmt.

3.5.2 Stauzonen

Um die Ursachen für die Beschädigung der Dummy-Flaschen auf den Förderabschnitten detaillierter zu betrachten, wurde die Anzahl der Stauzonen zwischen den Aggregaten ermittelt. Als Stauzonen gelten dabei Abschnitte des Flaschenförderers, in denen die Flaschen aufgestaut werden, wie beispielsweise:

- 90°-Kurve mit stumpfem Überschub (ohne kurvengängige Scharnierbandketten),
- 180°-Umlenkung,
- Flaschenweiche bzw. -verteilung im Flaschenstrom,
- Überschubleche in geraden Förderabschnitten,
- Verengungen durch Reduzieren der Flaschenreihen,
- Zusammenführung oder Einlaufkabinett vor einem Einzelaggregat.

Tabelle 3.5 zeigt die Anzahl der Stauzonen St innerhalb eines Förderabschnitts zwischen zwei Einzelaggregaten der Abfüllanlagen. In einigen Förderabschnitten werden die Flaschenströme aufgeteilt, beispielsweise von einer Flaschenfüll-/verschließmaschine auf zwei Flaschen-Ausstattungsmaschinen. Hierbei können die beiden Teilstrecken eine unterschiedliche Anzahl von Stauzonen aufweisen, was in Tabelle 3.5 zu einer Bereichsangabe führt. Für weitere Berechnungen wurde der Mittelwert aus den Stauzonen der Teilströme verwendet.

Tabelle 3.5. Anzahl der Stauzonen St zwischen den Einzelaggregaten in den Abfüllanlagen A bis R

Abfüll-anlage	Anzahl der Stauzonen St zwischen den Förderabschnitten				
	AP-RM	RM-EBI	EBI-FM	FM-EM	EM-EP
A	5	5	4-5	3	2
B	5	5	4	4	3
C	5	4	6	6	6
D	8	6	1	Bl	2
E	2	3	1	5	1
F	3	2	1	Bl	1
G	6	7	1	6	5
H	5	5	1	Bl	1
I	5	5	1	5-12	2
J	4	4	Bl	2-4	4
K	6-9	>7	4-6	7-8	8
L	7	7	8-9	8	4
M	7	3	Bl	5	3
N	3	5	4	7	4
O	4	4	1	4	1-2
P	6	6	Bl	5	3
Q	1	1	1	1	1
R	3	6	1	5	1
\bar{St}	4,8	4,7	2,7	4,7	2,9

Erläuterungen:

AP - Auspackmaschine, **RM** - Flaschenreinigungsmaschine, **EBI** - Leerflaschen-Inspektionsmaschine, **FM** - Füll- und Verschließmaschine, **EM** - Flaschenausstattungsmaschine, **EP** - Einpackmaschine, **Bl** - Mechanisch verblockte Aggregate entspricht $St = 0$.

3.6 Versuche zur chemischen Beanspruchung

Zur Klärung, inwieweit die chemische Beanspruchung der Glasoberfläche eine Rolle für das Entstehen von Scuffing spielt, wurden Versuche zur Glaskorrosion durchgeführt.

3.6.1.1 Laborversuche zur Glaskorrosion

Im Laborversuch wurden Glasproben über eine Dauer von 14 Tagen in einem Wasserbad mit Einhängethermostat Typ E 8 der Firma Haake Mess-Technik, Karlsruhe, gelagert. Dabei wurden die Versuchsbedingungen wie Temperatur, NaOH-Konzentration und Wasserhärte variiert. Zum Beurteilen der Glaskorrosion wurde die Oberfläche der Proben im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

3.6.1.2 Praxisversuche - Temperaturverlauf in Flaschenreinigungsmaschinen

Um die chemische Beanspruchung von Glasflaschen in den Flaschenreinigungsmaschinen zu beurteilen, wurden folgende Parameter aufgenommen: Temperaturverlauf, maximale Weichlaugentemperatur, Verweilzeiten in den einzelnen Zonen der Flaschenreinigungsmaschine und die NaOH-Konzentration.

Der Temperaturverlauf und die Verweilzeit der Flaschen in der Flaschenreinigungsmaschine wurden mit einem Temperaturlogger Typ EBI 125 EM 150 der Firma ebro, Ingolstadt, aufgenommen. Bei den nachfolgend gezeigten Messergebnissen wurde ein Messtakt von einer Sekunde verwendet. Der Temperatursensor wurde zum Transport durch die Flaschenreinigungsmaschine in einen aufschraubbaren PTFE-Behälter in Form einer Flasche eingebracht. Die aufgenommenen Temperaturprofile wurden zur Auswertung gemäß Kapitel 2.1.2.1 in die drei Bereiche Vorweichzone, Laugenzone und Spülzone aufgeteilt (Bild 3.10).

Die Verweilzeiten in diesen drei Bereichen und die entsprechenden maximalen Temperaturen wurden für jede untersuchte Flaschenreinigungsmaschine aus den Temperaturprofilen entnommen. Meist wurden pro Flaschenreinigungsmaschine drei Durchläufe mit dem Temperaturlogger aufgenommen. Jeweils in einem Flascheneinlaufkabinett am rechten und am linken Rand (meist in der dritten oder vierten Korbreihe) und in der Mitte der Flaschenreinigungsmaschine. Die Temperaturprofile der drei Reihen unterschieden sich bei den untersuchten Flaschenreinigungsmaschinen kaum, so dass von einer gleichmäßigen Temperaturverteilung über die gesamte Reihe der Flaschenkörbe ausgegangen werden kann. Die NaOH-Konzentrationen der Weichlauge wurden jeweils an den Flaschenreinigungsmaschine abgelesen.

Aus den Aufzeichnungen des Temperaturverlaufes in den Flaschenreinigungsmaschinen mit dem Temperaturlogger war ein genaues Bestimmen der reinen Laugentauchzeit in der Weichlauge nicht möglich^(♦), es konnte jedoch die gesamte Laugenkontaktzeit t_L in allen Laugenbädern und -spritzungen erfasst werden. Als Verweilzeit wurde jeweils nur der kürzeste der aufgenommenen Durchläufe berücksichtigt.

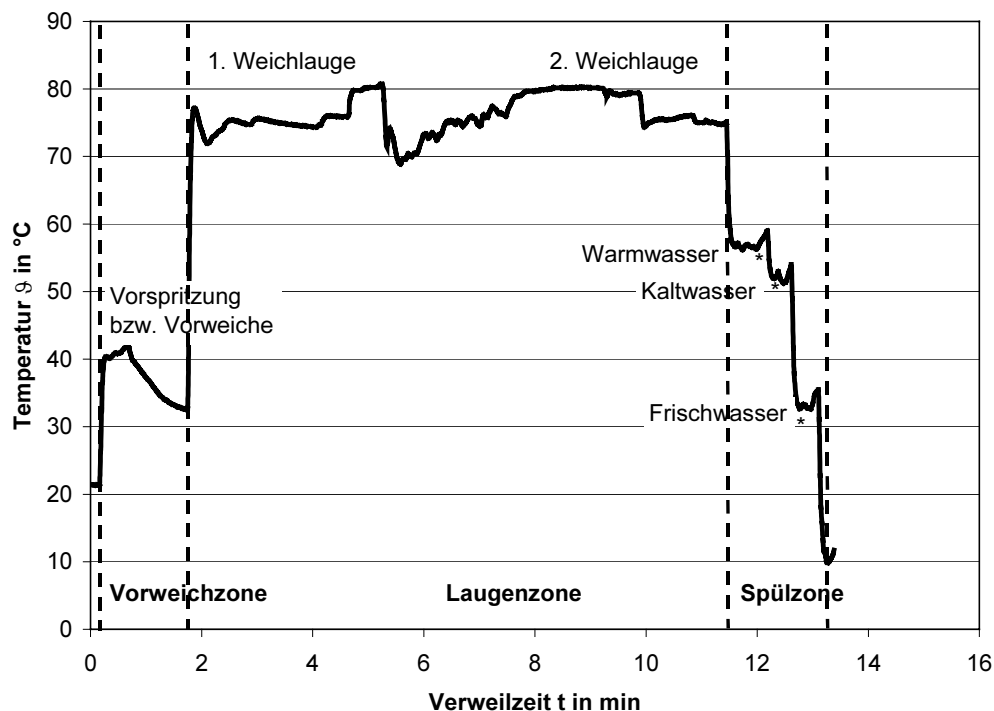


Bild 3.10. Aufteilung der Temperaturbereiche der Flaschenreinigungsmaschine am Beispiel der Abfüllanlage A^(♦)

3.7 Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Aufnahmen der Glasoberfläche mit einem REM wurden am Lehrstuhl für Physik der TU München in Freising-Weihenstephan durchgeführt. Dabei handelte es sich um ein REM der Firma Leica Modell Cambridge S 360. Die Versuchsflaschen wurden in kleine Scherben von etwa 15 x 15 mm Größe geschnitten bzw. gebrochen und die Glasoberfläche mit Ethanol gereinigt. In einer Polaron E 5400 Sputteranlage wurde die für die Aufnahmen erforderliche, leitende Oberfläche, eine Goldschicht, durch etwa sechsminütiges Sputtern hergestellt.

(♦) Besonderheiten beim Lesen des Temperaturprofils

Bedingt durch die Bauart der Messflasche weichen die gemessenen Temperaturen in der Messflasche von der tatsächlichen Temperatur der Lauge ab. Durch die Geometrie der Messflasche werden eher die Temperaturen in einer zu reinigenden Flasche wiedergegeben, wobei sich die Wärmekapazitäten für Glas und PTFE unterscheiden. In der Weichlauge wird die Messflasche beim Eintauchen mit der Lauge gefüllt, die eingeschlossene Lauge verbleibt dort bis zum Umdrehen der Flasche im Weichlaugenbad und wird dabei von der Messflasche abgekühlt. Beim Umdrehen fließt die abgekühlte Lauge über den Temperaturfühler und zeigt eine niedrigere Temperatur als die umgebende Lauge an, dabei erfolgt ein Austausch der Lauge in der Messflasche und es wird wieder eine höhere Temperatur angezeigt. Die Temperaturen der Laugenbäder können anhand der maximalen gemessenen Temperaturen im aufgenommenen Profil beschrieben werden. Die Messflasche ist auch nach dem Verlassen der Lauge heiß und wärmt die enthaltene Luft nach den folgenden Spritzungen in den Spülzonen immer wieder auf. So kann in den Spülzonen die Temperatur der einzelnen Spritzungen nur unmittelbar vor dem Wiederansteigen der Temperatur abgelesen werden, in Bild 3.10 gekennzeichnet mit *. Der angezeigte Temperaturverlauf der Vorweichzonen entspricht den gegebenen Wassertemperaturen, sofern Flüssigkeit in die Flasche gelangt.

3.8 Verwendetes Probematerial – Versuchsflaschen

Für die Festigkeitsmessungen wurden die Versuchsflaschen in folgende Scuffingklassen eingeteilt^(♦♦):

- **Klasse (0): Hüttenneue Flaschen.** Diese Flaschen wurden von der Firma Oberland Glas AG, Bad Wurzach, zur Verfügung gestellt. Alle für eine Versuchsreihe verwendeten Flaschen stammten aus der gleichen Charge Neuglas.
- **Klasse (0*): Einmal gereinigte, hüttenneue Flaschen.** Hierbei handelt es sich um hüttenneue Flaschen, die einmal bei normalem Betrieb in einer Flaschenreinigungsmaschine eines Abfüllbetriebes gereinigt wurden. Auch hier stammten alle für eine Versuchsreihe verwendeten Flaschen aus der gleichen Charge Neuglas.
- **Klasse (0′): Ausschließlich chemisch beanspruchte, hüttenneue Flaschen.** Diese Flaschen wurden von Hand besonders vorsichtig in die Flaschenkörbe einer Flaschenreinigungsmaschine eingeschoben und in die Weichlauge eingebracht. Die Flaschenreinigungsmaschine wurde für eine bestimmte Zeit (10 min bzw. 16 Stunden) angehalten. Um die Flaschen mechanisch möglichst wenig zu beanspruchen, wurden diese direkt nach der Flaschenabgabe der Flaschenreinigungsmaschine vom Flaschenförderer genommen.
- **Klassen (1)-(6): Gebrauchte, Flaschen mit unterschiedlich starkem Scuffing.** Diese Flaschen stammten aus der Produktion verschiedener Abfüllbetriebe und wurden hinter der Flaschenreinigungsmaschine direkt entnommen. Hierbei wurden Flaschen ausgewählt, die erkennbar Scuffing aufwiesen. Gemäß des mit dem Kamerasystem bestimmten Scuffinggrades *S* wurden die Flaschen Scuffingklassen (1) bis (6) zugeordnet. Der Scuffinggrad der Flaschen nimmt von Klasse (1) bis (6) zu.

Bei der Auswahl der gebrauchten Versuchsflaschen für die Festigkeitsmessungen wurde besonders darauf geachtet, dass möglichst keine anderen Oberflächenbeschädigungen oder Glasfehler, wie Blasen oder Fremdkörpereinschlüsse, vorlagen. Nur so wurde weitgehend sichergestellt, dass ausschließlich die Einflüsse des Scuffings an den Reibringzonen auf die Festigkeit untersucht wurden. Ältere Flaschen, die diese Bedingungen erfüllen, waren nur schwer zu finden. Je älter die Flaschen waren, desto eher wiesen sie noch andere Beschädigungen auf, wie z. B. Ausbrüche am Boden und an der Seitenwand, Gewindefschäden, Dichtflächenausbrüche sowie Zerkratzen auch außerhalb der Reibringzonen. Für die Stichproben wurde also keine zufällige Auswahl der Flaschen getroffen, so dass aus den Ergebnissen keine Rückschlüsse auf den Zustand des gesamten Flaschenpools des jeweiligen Abfüllbetriebes gezogen werden können.

Im Folgenden werden die drei untersuchten Flaschentypen NRW, GDB und Ale vorgestellt. Skizzen dieser Glasflaschen sind im Anhang aufgeführt. Tabelle 3.6 zeigt einen Überblick der wichtigsten Merkmale der drei Flaschentypen.

3.8.1 0,5-l-NRW-Flaschen

Bei der 0,5-l-NRW-Flasche nach Standardblatt 82 [100] handelt es sich um eine braune Poolflasche des Deutschen Brauer-Bundes mit Kronenkorkmundstück nach DIN 6094 Teil 1 [18] zur Abfüllung von Bier und alkoholfreien Getränken. Sie stellt die Nachfolgeform der 0,5-l-

^(♦♦) Die Klassenzugehörigkeit von Flaschen wird im Folgenden durch die Klassenbezeichnung in Klammern, beispielsweise (0) für die Klasse der hüttenneuen Flaschen, deutlich gemacht.

Euro-Flasche nach DIN 6198 [19] dar. Die NRW-Flasche wurde erst im Februar 1989 [8] eingeführt, so dass das maximale Alter der untersuchten Flaschen zehn Jahre betrug.

3.8.2 0,7-l-GDB-Flasche

Bei der Brunnen-Einheitsflasche, auch Perlenflasche genannt, handelt es sich um eine weiße Poolflasche mit Schraubmundstück 7,5 R nach DIN 6094 Teil 12 [18] der Genossenschaft Deutscher Brunnen (GDB). Hauptsächlich werden in dieser Flasche natürliches Mineralwasser und alkoholfreie Erfrischungsgetränke abgefüllt. Diese GDB-Flasche gibt es bereits seit 1969, so dass sich in diesem Pool auch sehr alte Flaschen mit starkem Scuffing befinden.

3.8.3 0,5-l-Ale-Flasche

Die 0,5-l-Ale-Flasche mit Kronenkorkmundstück nach DIN 6094 Teil 1 [18] ist in Braun- oder Grünglas auch unter vielen anderen Bezeichnungen im Einsatz. Diese Flaschen werden hauptsächlich von Brauereien in Norddeutschland und ausschließlich zur Bierabfüllung verwendet. Die folgenden Untersuchungen wurden an grünen Ale-Flaschen durchgeführt. Die Ale-Flasche (Form I) gibt es bereits seit 1960, so dass in diesem Pool auch Flaschen mit sehr starkem Scuffing vorliegen. Unterschieden wird hierbei in die drei Standardformen Ale I bis III mit leicht unterschiedlicher Geometrie. Die älteste Form I weicht in der Geometrie vergleichsweise stark von den beiden neueren Formen ab. Die Form I wurde bei der Auswertung der Messergebnisse nicht mit berücksichtigt. Bei den neueren Formen II und III beschränkt sich das Scuffing konstruktionsbedingt wie auch bei den beiden anderen Flaschentypen NRW und GDB nur auf die beiden Reibringbereiche. Form II und III unterscheiden sich in Ihrer Geometrie nur im Halsbereich. Form II (mit leicht bauchigem) und III (mit geradem Hals) wurden in diesen Untersuchungen nicht unterschieden.

Tabelle 3.6. Die wichtigsten Merkmale der verwendeten Versuchsflaschen im Überblick

Bezeichnung	NRW	GDB	Ale
Nennfüllmenge in l	0,5	0,7	0,5
Glasfarbe	braun	weiß	grün
Flaschenmasse in g			
leer	380	585	385
voll	880	1285	885
Mundstück	Kronenkorkmundstück DIN 6094 Teil 1 [18]	Schraubmundstück DIN 6094 Teil 12 [18]	Kronenkorkmundstück DIN 6094 Teil 1 [18]
größter Flaschen- durchmesser in mm	67,5	79,0	68,5
theoretische Wand- stärke in mm [75]	2,83	3,48	3,31
Flaschenhöhe in mm	260	290	270
Einführungsjahr	1989	1969	1960

4 Entstehung von Scuffing

In Kapitel 4 werden die Ursachen für das Entstehen von Scuffing an Mehrwegflaschen untersucht. Dabei werden die Beanspruchungen auf die Flaschen beim Verarbeiten in mechanische (verschiedene tribologische Systeme) und chemische Beanspruchungen untergliedert. Für beide Beanspruchungsarten wurden jeweils die wichtigsten Parameter für das Entstehen von Oberflächenzerkratzen bzw. Glaskorrosion sowie auch deren Zusammenwirken untersucht.

4.1 Zusammenwirken mechanischer und chemischer Beanspruchung

In ersten Versuchen an Glasflaschen wurden die unter verschiedenen Förderbedingungen (leere/volle Flaschen, Höhe des Staudrucks) entstehenden Oberflächenzerkratzen untersucht. Hierzu wurden die Flaschen auf der Versuchs-Flaschenförderstrecke im Technikum (Bild 3.7) gefördert. Die Flaschen wurden dabei ausschließlich mechanisch beansprucht. Um die Kaltendvergütung zu entfernen, wurden die hüttenneuen Versuchsflaschen fünfmal in einer Flaschenreinigungsmaschine gereinigt. Der Flaschenförderstrecke war mit etwa 1500 NRW-Flaschen mit unterschiedlich starken Gebrauchspuren aus dem Leergut einer Brauerei gefüllt, so dass sich ein Füllungsgrad der Pufferstrecke von etwa 50 % ergab. Die 50 Versuchsflaschen (NRW-Flaschen) befanden sich verteilt im Flaschenpulk. Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse für vier verschiedene Versuchsbedingungen. Die Versuche (A) bis (D) können anhand des Durchsatzes an Fl/h, der Flaschenbefüllung (leer oder voll) und der Stausituation im Flaschenpuffer (Kettengeschwindigkeiten) charakterisiert werden. Die an den Versuchsflaschen entstandenen Oberflächenzerkratzen wurden mit dem Kamerasystem und zusätzlich visuell beurteilt.

Tabelle 4.1. Versuchsbedingungen und Ergebnisse zur mechanischen Beanspruchung

Versuch	(A)	(B)	(C)	(D)
Durchsatz in Fl/h	20.000	20.000	35.000	35.000
Flaschenbefüllung	leer	leer	leer	voll
Stausituation im Flaschenpuffer	$v_B \approx v_P$	$v_B > v_P$ ($\Delta v \approx 0,3$ m/s)	$v_B \approx v_P$	$v_B \approx v_P$
Anzahl Umläufe	250	250	250	250
\bar{S} in mm ² am RR _o	0-0,5	0-0,8	0-1,1	0-1,2
Visuelle Beurteilung der Zerkratzung	nur leichte Kratzer am RR _o und RR _u auf $\approx 1,5$ mm Breite einzelne, grau erscheinende, kleine Kratzer	RR _o $\approx 1,5$ mm Breite, RR _u ≈ 4 mm Breite, jeweils stark durchbrochen (= einzelne kleine Kratzer)	RR _o ≈ 3 mm Breite, RR _u ≈ 5 mm Breite, jeweils stark durchbrochen, Kratzer zunehmend weiß erscheinend	RR _o ≈ 4 mm Breite, RR _u ≈ 5 mm Breite, jeweils stark durchbrochen, Kratzer zunehmend weiß erscheinend
\bar{B} Dummy-Flaschen am RR _u	2	3	3	3-4

Abkürzungen:

RR_o: oberer Reibring; RR_u: unterer Reibring; Fl.: Flaschen

v_B : Geschwindigkeit der Flaschenförderkette,

v_P : Geschwindigkeit des Flaschenpulses

Außerdem wurde die mechanische Beanspruchung der Flaschen bei den einzelnen Versuchsbedingungen mit Dummy-Flaschen dokumentiert. Die mittleren Beanspruchungsklassen \bar{B} der eingesetzten Dummy-Flaschen lagen zwischen 2 und 4. Verglichen mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.4 entspricht damit ein Umlauf auf der Flaschenförderstrecke dem Durchlauf eines Förderabschnittes zwischen zwei Einzelaggregaten in einer Abfüllanlage. Somit bestätigte sich die Aussage aus Kapitel 3.4.4, dass etwa 4 bis fünf Umläufe auf der Flaschenförderstrecke mit einem Umlauf in der Praxis gleichzusetzen sind. Die mechanische Beanspruchung der Glasflaschen in diesen Versuchen mit 250 Umläufen entspricht also 50-62 Umläufen in der Praxis, jedoch ohne Beanspruchung in den Einzelaggregaten und ohne Reinigung der Flaschen und der damit verbundenen Glaskorrosion.

Wie aus Tabelle 4.1 hervorgeht, ist die Stausituation im Flaschenpuffer bzw. der dort herrschende Staudruck von entscheidender Bedeutung. Aufgrund des höheren Staudrucks zerkratzen volle Flaschen bei gleichen Förderbedingungen früher als leere Flaschen. Grundsätzlich sind die Zerkratzen der NRW-Flaschen am unteren Reibring stärker als am oberen ausgebildet. Dies liegt in der Form der 0,5-l-NRW-Flasche begründet. Am oberen Reibring ist die Reibringerhöhung aus zwei unterschiedlich großen Radien zusammengesetzt (Bild 4.1). Die Radien am oberen Reibring betragen $r_{o1} = 145,0/3,4$ mm, die am unteren nur $r_u = 45,5/45,5$ mm. Daraus folgt, dass sich am unteren Reibring früher Zerkratzen zeigen. Sie erscheinen scharf abgegrenzt und weißer im Vergleich zum oberen Reibring. Am oberen Reibring hingegen werden die Zerkratzen früher breit und damit großflächiger. Sie erscheinen dadurch diffuser und ausgefranster.

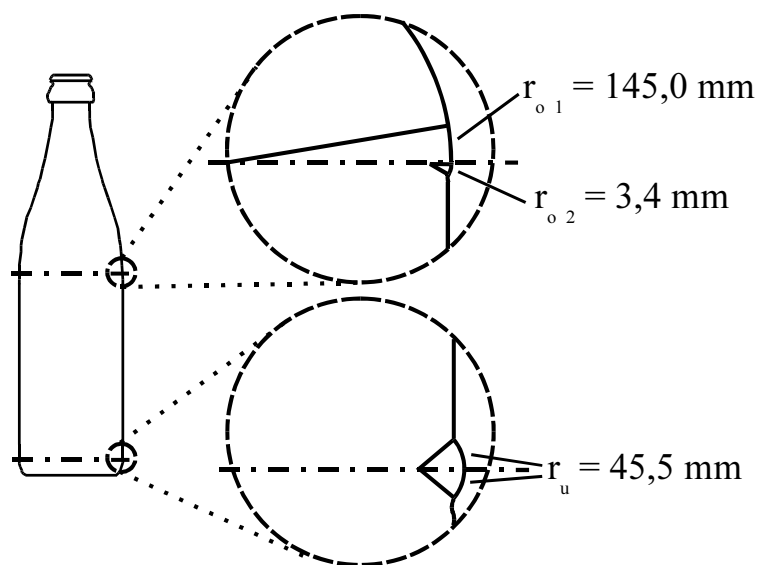


Bild 4.1.

Radien r_o und r_u an den beiden Reibringbereichen einer NRW-Flasche nach Standardblatt A 82 [100]

Da bei diesen Versuchen die Zerkratzen nur schwach ausgeprägt waren und so eine Bestimmung des Scuffinggrades \bar{S} mit den Kamerasystemen nur bedingt möglich war, wurden sie zusätzlich visuell beurteilt. Obwohl diese rein mechanischen Beanspruchungen der Glasflaschen etwa 62 Umläufen der Flaschen in einer Abfüllanlage entsprechen, entstanden kaum sichtbare Oberflächenzerkratzen.

Tabelle 4.2 zeigt Versuchsbedingungen und Ergebnisse von Laborversuchen zur chemischen Beanspruchung (A) bis (D). Im Vergleich hierzu die Ergebnisse einer Flaschenreinigung unter

Praxisbedingungen (E) und (F). Für Versuch (E) wurden die Flaschen 25-mal ausschließlich durch die Flaschenreinigungsmaschine gefahren. Die Flaschen von Versuch (F) durchliefen 10-mal die gesamte Flaschenabfüllanlage. Die chemische Beanspruchung der Glasflaschen führte in Abhängigkeit von der Verweilzeit zu einem Abtrag von Glasmaterial durch Korrosion an der Glasoberfläche. Aufnahmen der unterschiedlich behandelten Glasoberflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) befinden sich in Kapitel 5.2.

Tabelle 4.2. Versuchsbedingungen und Ergebnisse zur chemischen Beanspruchung (Glas-korrosion)

Versuch	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
Labor/Praxis-versuch	Laborversuch	Laborversuch	Laborversuch	Laborversuch	25 Reini-gungszyklen	10 Gesamt-umläufe
Temperatur	20,0 °C	80,0 °C	20,0 °C	80,0 °C	80,0 °C	80,0 °C
NaOH in %	-	-	2,0	2,0	2,0	2,0
Verweilzeit	14 Tage	14 Tage	14 Tage	14 Tage	5 h	2 h
Wasser	0 und 16 °dH	0 und 16 °dH	0 und 16 °dH	0 und 16 °dH	5 °dH	5 °dH
REM-Bild	vgl. 5.5	5.14	-	5.13	5.11/12	5.6-5.10
Ergänzende Bemerkungen zu den REM-Aufnahmen						
(A) keine Veränderung an der Glasoberfläche gegenüber hüttenneuen Flaschen,						
(B) Kaltendvergütung löst sich schuppenartig ab, letzte Bruchstücke haften noch,						
(C) Mikroskopisches Bild ähnlich Versuch (D) aber weniger Materialabtrag,						
(D) Kaltendvergütung ist vollständig abgelöst, deutlicher Materialabtrag wird sichtbar, die Oberfläche wird rau,						
(E) im Vergleich zu hüttenneuem Glas zeigen sich wenige mineralische Ablagerungen, kein korrosiver Abtrag sichtbar, deutliche Oberflächenkratzer innerhalb und außerhalb des Reibringbereichs,						
(F) stark zerklüftete Oberfläche im Reibringbereich, außerhalb des Reibringbereichs einzelne Oberflächen-kratzer aber kein korrosiver Abtrag von Glasmaterial sichtbar.						

Bei den Versuchen (A) bis (D) bildeten sich auf der Oberfläche mineralische Ablagerungen. Mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse [50] wurden vor allem die Elemente O, Na, Ca, Al, Si, Fe identifiziert. Diese stammen aus angetrockneten Rückständen der Lauge, Wasserhärte und Glasbestandteilen. Nach Abwaschen (Essigsäure) der Ablagerungen konnten an den Glasoberflächen visuell keine Veränderungen festgestellt werden, Unterschiede ergaben sich erst im REM-Bild. Bei den Versuchen unter Praxisbedingungen (E) und (F) konnte bei 10 bzw. 25 Reinigungsvorgängen kein korrosiver Abtrag von Glasmaterial im REM-Bild der Glasoberfläche festgestellt werden.

Diese Versuchsreihen (Tabelle 4.1 und 4.2) zeigen deutlich, dass typische Scuffingspuren erst durch die Kombination mechanischer und chemischer Beanspruchung entstehen. Ein genaues Einschätzen der jeweiligen prozentualen Anteile am Gesamteffekt Scuffing ist jedoch anhand dieser Versuche nicht möglich. Der Einfluss keiner der beiden Beanspruchungsarten ist dabei vernachlässigbar gering. Durch die Bildung einer Gelschicht in der Flaschenreinigungsmaschine wird die Glasoberfläche empfindlicher gegen die mechanische Beanspruchung. Mechanisch hervorgerufene Oberflächenverletzungen werden durch die zusätzliche Korrosion des Glases an der gesamten Oberfläche aufgeweitet, werden dadurch besser sichtbar und erscheinen weißer. In Versuchen zur Reduktion des chemischen Scuffings durch den Einsatz korrosionshemmender Additive verschiedener Hersteller, konnte von einer Reduktion des

Scuffings um 30-50 % erreicht werden [49, 59, 98, 90]. Dies lässt auf etwa je einen gleich großen Anteil der jeweiligen Beanspruchungsart am Gesamteffekt schließen.

4.2 Mechanische Beanspruchung

In den folgenden Unterkapiteln wird der Einfluss verschiedener Reibbedingungen auf die Tribologie der Glasflaschen mit unterschiedlichen Reibpartnern untersucht.

4.2.1 Tribologische Untersuchung verschiedener Einflussgrößen

Auf dem in Kapitel 3 beschriebenen Prüfstand wurden Kratzversuche durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter wie Schmiermittel, Oberflächenverschmutzung, Glasfarbe sowie Kratzkörpern auf das tribologische System einer Mehrwegflasche zu untersuchen. Um Vergleichswerte zu anderen Getränkeverpackungen zu erhalten, wurden in diese Versuche auch Kunststoffflaschen mit einbezogen. In Tabelle 4.3 sind die, jeweils für verschiedene Versuchsflaschen notwendigen Anpresskräfte F_K aufgelistet, um im einminütigen Kratzversuch Zerkratzungsspuren an den Versuchsflaschen zu erzeugen. Der obere Teil der Tabelle zeigt die Ergebnisse für Glasflaschen der untere für Kunststoffflaschen. Nicht getestete Kombinationen sind in der Tabelle mit “-“ gekennzeichnet.

Tabelle 4.3. Anpresskraft F_K bei der an der Oberfläche einer Versuchsflasche unter verschiedenen Reibbedingungen und Kratzkörpern nach einer Minute erste Kratzer entstehen

Kratzkörper	Versuchsflasche	Anpresskräfte F_K in N für verschiedene Schmiermittel			
		trocken	nass	Schmutzwasser (2,0 %)	Kettengleitmittel (0,5 %)
NRW* neu	NRW neu	36,5	2,3	1,9	6,2
NRW* zerkratzt	NRW neu	30,2	1,8	1,8	2,3
Ale** neu	Ale neu	30,0	3,6	2,9	-
Ale** zerkratzt	Ale neu	26,8	4,1	2,6	11,2
GDB*** neu	GDB neu	63,0	6,3	3,9	-
GDB*** zerkratzt	GDB neu	37,5	6,5	2,5	9,2
Edelstahl 1.4301	NRW neu	17,4	6,5	5,9	8,2
PE	NRW neu	>60	>20	12,0	-
PET	PET	1,0	4,6	0,04	-
PEN	PEN	1,1	6,5	5,0	-
PE	PET	2,7	2,4	1,9	-
Edelstahl 1.4301	PET	3,4	6,5	-	-

* 0,5-l-NRW-Flasche (Braunglas), ** 0,5-l-Ale-Flasche (Grünglas), *** 0,7-l-GDB-Flasche (Weißglas)

Beim Kratzversuch Glas gegen Glas war bei nasser Oberfläche im Vergleich zum trockenen Zustand nur eine sehr viel kleinere Anpresskraft notwendig, um Zerkratzen an der Versuchsflasche hervorzurufen. Dieses Ergebnis korreliert mit den höheren Haft- und Gleitreibungskoeffizienten (Glas/Glas) zwischen nassen gegenüber trockenen Flaschen (Kapitel 4.2.2). Beim Benetzen der Oberfläche mit Kettengleitmittel ist im Vergleich zu reinem Wasser eine etwas größere Kratzkraft notwendig, jedoch liegt auch dieser Wert weit unter dem für trockene Flaschen. Der Kratzeffekt verstärkt sich durch Benetzen mit Schmutz-

wasser. In der Abfüllanlage sollten Glasflaschen deshalb bevorzugt trocken und in sauberem Zustand gefördert werden, um mechanische Belastungen zu vermeiden.

Die kleinen Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Flaschentypen sind nicht der Glasfarbe zuzuschreiben. Die Farbpigmente im eingefärbten Glas machen nur wenige Massenprozent (0,5-2,0 %) in der Zusammensetzung des Glases aus und haben somit keinen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften. Die Unterschiede begründen sich zum einen in den verschiedenen Flaschenradien zum anderen in der möglicherweise geringfügig voneinander abweichenden Vergütung der Flaschen aus verschiedenen Glashütten.

Am wenigsten zerkratzt die Glasoberfläche durch Kunststoffe (Polyethylene), wie sie beispielsweise für Geländerführungen eingesetzt werden. Im Kratzversuch konnten bei trockenen Oberflächen bis zu Anpresskräften von 60 N und bei nassen Oberflächen bis zu 20 N keine Zerkratzen festgestellt werden. Bedingt durch den Versuchsaufbau konnten jedoch keine größeren Anpresskräfte aufgebracht werden. Aus den Versuchen mit Edelstahl als Kratzkörper geht hervor, dass die Glasoberfläche durch Edelstahl stärker angegriffen wird als durch PE. Geländerführungen und andere, die Glasflaschen berührende Bauteile in Abfüllanlagen für Glasflaschen sollten deshalb vorzugsweise aus Kunststoff gefertigt sein. Um jedoch nicht den gegenteiligen Effekt zu erreichen, ist eine regelmäßige Kontrolle der Kunststoffbauteile auf etwaige Verschmutzungen, wie beispielsweise Einschlüsse von Schmutz und Glasscherben, unbedingt erforderlich.

An Kunststoffflaschen entstehen Zerkratzen im Vergleich zu den Glasflaschen bereits bei kleineren Kräften. Bei benetzten Oberflächen (reines Wasser oder Kettengleitmittellösung) ist bei den Kunststoffflaschen (PET, PEN) untereinander eine geringere Zerkratzenneigung zu erkennen als bei trockener Oberfläche. Hier wirkt die Flüssigkeit auf der Oberfläche als reibungsreduzierendes Schmiermittel. Auf das Reibverhalten von PET-Flaschen mit PE-Führungsgeländer wirkt sich eine Benetzung der Oberflächen mit Wasser nicht signifikant aus. Schmutzwasser hingegen fördert die Zerkratzen für alle Reibpaare. Ein verschleißarmes Fördern von Kunststoffflaschen ist somit bei nasser und trockener Oberfläche möglich, jedoch muss an der Flaschenoberfläche anhaftender Schmutz entfernt werden. Im Kratzversuch mit Kunststoffflaschen weist Edelstahl gegenüber PE vor allem bei nasser Oberfläche Vorteile auf. Bauteile der Einzelaggregate oder Geländerführungen können unter Vermeidung scharfer Kanten aus dem vergleichsweise wartungsarmen Werkstoff Edelmetall gefertigt werden.

4.2.2 Einfluss der Reibungskoeffizienten

Um die in Abfüllanlagen auf Flaschen wirkenden Kräfte zu bestimmen, wurden die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten von Flaschen in verschiedenen tribologischen Systemen untersucht. Für das Beispiel des Transports von Flaschen auf einem Flaschenförderer wurden die mittleren Reibungskoeffizienten verschiedener Reibpaare untersucht. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Reibung von Glas auf Glas bestimmt:

- Flaschenglas/Flaschenglas: Haftreibung zwischen Flaschen (neue und gebrauchte Flaschen bei nasser und trockener Oberfläche),
- Flaschenglas/Flachglas: Gleitreibung von hüttenneuen Glasflaschen auf einer Glasplatte (bei nasser und trockener Oberfläche).

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Reibung zwischen Flaschenglas und anderen Reibpartnern gemessen:

- Glas/Kunststoff: beim Kontakt von Glasflaschen mit Geländerführungen und Bauteilen von Einzelaggregaten wie Einteilschnecken und Sternräder,
- Glas/Edelstahl: beim Kontakt von Glasflaschen mit Scharnierbandketten oder Metallführungen.

Tabelle 4.4. Mittlere Haftreibungskoeffizienten $\bar{\mu}$, Standardabweichungen s_{μ} und Variationskoeffizienten VK von NRW-Flaschen unterschiedlicher Scuffingklassen mit nasser und trockener Oberfläche

Oberflächenzustand		(0)	(0*)	(1)	(5)
trocken	$\bar{\mu}$	0,28	0,22	0,34	0,39
	s_{μ}	0,08	0,02	0,07	0,08
	VK in %	29,5	8,7	19,7	19,7
nass	$\bar{\mu}$	0,52	0,43	0,79	0,84
	s_{μ}	0,10	0,06	0,08	0,06
	VK in %	19,7	13,6	10,4	6,8

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe (Tabelle 4.4) zeigen, dass der Haftreibungskoeffizient neuer Flaschen (hüttenneu und einmal gereinigt) unterhalb der Werte gebrauchter Flaschen liegt. Dies lässt sich durch die aufgebrachte Heiß- und Kaltendvergütung erklären, durch die Unebenheiten in der Glasoberfläche ausgeglichen werden und somit für eine bessere Gleitfähigkeit sorgen. Die Kaltendvergütung ist nach etwa vier bis fünf Umläufen durch die Flaschenreinigungsmaschine vollständig abgewaschen, dann erst wird die darunter liegende Heißendvergütung angegriffen. Daher unterscheiden sich die Haftreibungskoeffizienten der hüttenneuen (0) und einmal gereinigten (0*) Flaschen nicht signifikant (t-Test). Da sich die Ergebnisse für Flaschen verschiedener Scuffingklassen nicht signifikant unterscheiden, wurde auf Messungen für jede Klasse verzichtet. In Tabelle 4.4 sind nur die Ergebnisse von Versuchsflaschen der Scuffingklasse (1) und (5) dargestellt. Bei Flaschen, die bereits Scuffing aufweisen, können sich die zerklüfteten Glasoberflächen der Reibringzonen (siehe REM-Aufnahmen Kapitel 5.2) ineinander verhaken, was zu höheren Haftreibungskoeffizienten führt.

Überraschend für den Praktiker sind die Ergebnisse für nasse Flaschen. Die Haftreibungskoeffizienten für die nassen Flaschen liegen etwa um den Faktor zwei über denen der trockenen. Vergleichbare Ergebnisse konnten auch an anderen Flaschenformen (0,5-l-Ale und 0,7-l-GDB) gewonnen werden. Aus diesem Grunde sollte eine Leergutabspritzung im Trockenteil von Abfüllanlagen zwischen Auspackmaschine und Flaschenreinigungsmaschine nur bei stark verschmutzten Flaschen eingesetzt werden. Wichtig ist dabei aber das vollständige Entfernen des Schmutzes von der Flaschenoberfläche. Wird der Schmutz lediglich angelöst vergrößert sich dadurch die Reibung der Flaschen untereinander.

Auch die Gleitreibungskoeffizienten nasser Glasoberflächen liegen über denen trockener. Bild 4.2 zeigt den Verlauf der Gleitreibungskraft F_{GR} einer liegend auf einer Glasplatte gezogenen, hüttenneuen Glasflasche (NRW) bei trockenen und nassen Oberflächen. Deutlich ist eine stark schwankende Gleitreibungskraft bei nasser Oberfläche zu erkennen. Die gezogene Flasche bewegte sich bei den Messungen ruckartig über die Glasplatte, was auf einen sprung-

haften Wechsel zwischen Gleit- und Haftreibung hindeutet. Der gesamte Kurvenverlauf liegt über dem der Gleitreibungskraft bei trockener Oberfläche.

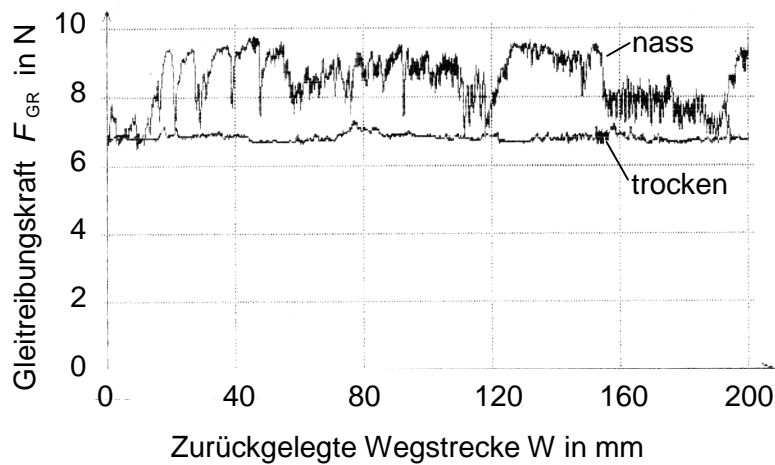


Bild 4.2. Gleitreibungskräfte F_{GR} hüttenneuer Flaschen auf einer Glasplatte bei trockener und nasser Oberfläche

Tabelle 4.5. Mittlere Haftreibungskoeffizienten $\bar{\mu}$ zwischen hüttenneuen (0) bzw. gebrauchten (3) Glasflaschen und verschiedenen Kunststoffbauteilen und Flaschenförderketten der Abfüllanlagen bei trockener bzw. nasser Oberfläche

Oberflächenzustand			Kunststoffbauteile				Flaschenförderketten	
			PA ⁽¹⁾ natur	PA ⁽²⁾ schwarz	PE ⁽³⁾ UHM	PE ⁽⁴⁾ HM	Edelstahl ⁽⁵⁾	Kunststoff ⁽⁵⁾
hüttenneu (0)	trocken	$\bar{\mu}$	0,18	0,16	0,14	0,18	0,19	0,12
		s_{μ}	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
		VK in %	3,0	5,5	3,2	3,0	7,8	4,4
	nass	$\bar{\mu}$	0,25	0,21	0,16	0,22	0,24	0,16
		s_{μ}	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
		VK in %	6,0	7,1	3,5	4,9	1,8	5,5
gebraucht (3)	trocken	$\bar{\mu}$	0,22	0,23	0,20	0,22	0,22	0,19
		s_{μ}	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01
		VK in %	5,9	11,1	7,9	4,0	8,1	2,9
	nass	$\bar{\mu}$	0,32	0,35	0,22	0,29	0,25	0,27
		s_{μ}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
		VK in %	6,4	4,8	9,0	6,5	2,8	1,7

⁽¹⁾ Polyamid für Einteilschnecken, ⁽²⁾ Polyamid für Drehsterne, ⁽³⁾ Ultrahochmolekulares Polyethylen für Geländerführungen, ⁽⁴⁾ Hochmolekulares Polyethylen für Geländerführungen ⁽⁵⁾ Flaschenförderketten

Eine zweite Versuchsreihe (Tabelle 4.5) zum Bestimmen der mittleren Haftreibungskoeffizienten $\bar{\mu}$ zeigt, dass die Reibwerte zwischen Glasflaschen und Kunststoffbauteilen generell geringer sind als die der Glasflaschen untereinander (erste Versuchsreihe). Auch die Standardabweichungen dieser Messungen sind im Vergleich zur Reibung von Glas auf Glas kleiner. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich bei zwei Glasflaschen, vor allem bei bereits zerkratzter Oberfläche, die Oberflächen in den Reibungsbereichen ineinander verhaken und die Flaschen meist ruckartig zu rutschen beginnen. Auf den Kunststoffbauteilen hingegen

rutschen die Flaschen gleichmäßig, was sich in den kleineren Standardabweichungen zeigt. Die Haftreibungskoeffizienten der Bauteile aus den verschiedenen Werkstoffen unterscheiden sich bei trockener Oberfläche kaum. Für nasse Oberflächen sind die Reibungskoeffizienten der Kunststoffbauteile größer als für trockene, analog zu den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe. Bei den Polyamiden ist der Einfluss der nassen Oberflächen größer als bei den hochmolekularen Polyethylenen.

Die Messung der Haftreibungskoeffizienten der Glasflaschen auf den Flaschenförderketten zeigen, dass bei Schmierung mit Wasser die Kunststoffketten den Edelstahlketten überlegen sind, da sie kleinere Reibwerte aufweisen.

Im Vergleich mit den Ergebnissen in Tabelle 4.4 wird deutlich, dass Glasflaschen durch Reibung an anderen Glasflaschen stärker beansprucht werden, als durch Reibung an Kunststoffbauteilen und Flaschenförderketten. Dies bestätigt auch das Ergebnis der Kratzversuche (Kapitel 4.2.1).

4.2.3 Mechanische Beanspruchung in den Einzelaggregaten

Vor allem in den Einzelaggregaten Abschraubmaschine, Leerflaschen-Inspektionsmaschine, Füll- und Verschließmaschine und Etikettiermaschine kommt es zu einer mechanischen Belastung der Flaschen. In diesen Aggregaten werden die Flaschen zuerst durch Einteilschnecken oder Sternräder vereinzelt und dann über Drehsterne, Klemmsterne oder Riemen weiter transportiert. Der Reibungskontakt der Flaschenoberfläche mit diesen Maschinenteilen kann zu Kratzspuren führen. Um diese mechanischen Beanspruchungen an den Glasflaschen zu quantifizieren, wurden Dummy-Flaschen (Herstellung siehe Kapitel 3) eingesetzt und deren Beschädigung nach einmaligem Durchlauf durch ein Einzelaggregat beurteilt.

Die in verschiedenen Abfüllanlagen eingesetzten Etagenförderer wurden ebenfalls untersucht. Dabei konnten jedoch keine Beschädigungen der Dummy-Flaschen festgestellt werden. Die Flaschen werden beim Transport fest eingespannt, so dass es nicht zum Rotieren der Flaschen kommen kann. Bei Aus- und Einpackmaschinen ist eine mögliche mechanische Belastung der Flaschen von der Bauweise der Maschine abhängig, generell sind hier Beschädigungsspuren jedoch eher selten. Bei der Ent- und Bepalettierung werden die Flaschen nicht durch die Bauteile der Aggregate und, im Unterschied zu den Kunststoffflaschen, auch nicht im Kasten durch Rütteln beschädigt.

An den Dummy-Flaschen wurden Kratzspuren und Druckstellen (Bild 4.3) vor allem im zylindrischen Teil der Flaschen, außerhalb der Reibringbereiche, beobachtet. Die Beschädigungen waren in ihrer Form und Ausprägung sehr unterschiedlich, so dass sich eine Einteilung in Beschädigungsklassen als nicht sinnvoll erwies. Innerhalb der Einzelaggregate kommen die Flaschen nie untereinander in Berührung, sondern hauptsächlich mit Kunststoffteilen wie Einteilschnecken und Drehsternen. Eine mit Glas/Glas-Kontakt vergleichbare Beschädigung der Flaschen kann im Kontakt mit Kunststoffteilen jedoch erst durch wesentlich höhere Kräfte (mindestens um den Faktor 2, vgl. Kapitel 4.2.1) hervorgerufen werden. So können die meisten an der PS-Folie der Versuchsflaschen entstandenen Druckstellen und Kratzspuren an Glasflaschen keine Zerkratzen hervorrufen. Auch eine Untersuchung beliebiger gebrauchter Mehrwegflaschen mit ausgebildetem Scuffing zeigt, dass diese Glasflaschen kaum Zerkratzen außerhalb der Reibringbereiche aufweisen.

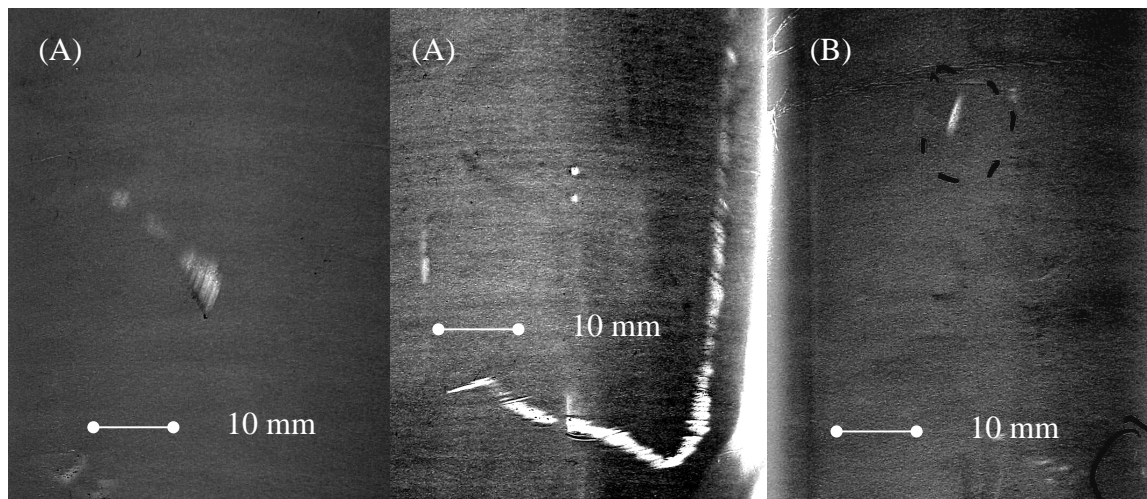


Bild 4.3. Typische Beschädigungsspuren an Dummy-Flaschen: (A) Kratzspuren Einteilschnecke, (B) Druckpunkt Drehstern (Aufnahmen im Dunkelfeld)

4.2.4 Mechanische Beanspruchung auf den Flaschenförderern

Die mechanische Beanspruchung beim Transport der Flaschen auf den Flaschenförderern wird vor allem durch Reibungskontakt der Flaschen untereinander hervorgerufen. Mit Hilfe der Dummy-Flaschen wurde diese Beanspruchung in einzelnen Förderabschnitten von Abfüllanlagen in Klasse von 0 bis 5 eingestuft. Pro Abschnitt wurden bis zu zehn Dummy-Flaschen eingesetzt. Die angegebenen Beschädigungsklassen \bar{B} in der Tabelle 4.6 stellen die arithmetischen Mittelwerte pro Förderabschnitt dar. Die Einzelwerte der Flaschen je Förderabschnitt schwankten maximal um $B \pm 1$, abhängig davon, inwieweit sich die Förderbedingungen auf den Flaschenförderern über dem Querschnitt (auf der gesamten Breite) bzw. auf parallelen Fördersträngen unterschieden.

Die Abfüllanlagen A bis R stellen Anlagen in Brauereien für NRW-Flaschen dar. Für NRW-Flaschen wurden Förderabschnitte mit Beschädigungsklassen $\bar{B} > 3$ als verbesserungsbedürftig eingestuft.

Die folgende Tabelle 4.6 stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse dar. In den ersten Spalten werden die mittleren Beschädigungsklassen \bar{B} der Dummy-Flaschen auf den fünf bzw. vier (Block) Förderabschnitten zwischen den Einzelaggregaten jeweils am unteren Reibring aufgelistet. In den letzten drei Spalten befinden sich Summen- und Mittelwerte der Beschädigungsklassen und Stauzonen, die jeweils die gesamte Abfüllanlage betreffen. Außerdem sind die Summe aller Beschädigungsklassen $\Sigma \bar{B}$ und der Mittelwert der Beschädigungsklasse $MW_{\bar{B}}$ pro Förderabschnitt sowie die Gesamtanzahl $\Sigma \bar{s}_t$ und der Mittelwert der Stauzonen $MW_{\bar{s}_t}$ jeder Abfüllanlage aufgeführt. Die Anzahl der Stauzonen der einzelnen Förderabschnitte jeder Abfüllanlage ist aus Tabelle 3.5 ersichtlich.

Ein proportionaler Zusammenhang zwischen Ausbringung einer Abfüllanlage und der Beschädigung der Dummy-Flaschen konnte nicht bestätigt werden. Vielmehr ist die gesamte Fördersituation auf den Flaschenförderern, nicht ausschließlich die Fördergeschwindigkeit, verantwortlich für die Beanspruchung der Flaschen.

Tabelle 4.6. Mittlere Beschädigungsklassen \bar{B} der Dummy-Flaschen am unteren Reibringbereich auf den Förderabschnitten und der gesamten Abfüllanlage sowie die Anzahl der Stauzonen je Abfüllanlage (NRW-Flaschen)

Abfüll- anlage	\bar{B} in den Förderabschnitten zwischen zwei Einzel- aggregaten					$\Sigma \bar{B}$ Gesamt- anlage	$MW \bar{B}$ Gesamt- anlage	$\Sigma \bar{s}_i$ Gesamt- anlage	$MW \bar{s}_i$ Gesamt- anlage
	AP-RM	RM-EBI	EBI-FM	FM-EM	EM-EP				
A	4,6	3,2	1,2	4,0	-	13,0	3,3	20	5,0
B	3,0	3,3	3,0	3,0	3,0	15,3	3,1	21	4,2
C	3,3	2,0	2,0	3,3	2,0	12,6	2,5	27	5,4
D	2,7	1,7	3,0	B	2,3	9,7	2,4	Bl 17	4,3
E	3,5	3,0	3,0	3,5	Gs 2,0	15,5	3,1	12	2,4
F	3,0	3,0	2,3	B	2,7	11	2,8	Bl 7	1,8
G	4,0	4,7	2,3	4,0	2,0	16,3	3,3	25	5,0
H	2,3	2,0	2,3	Bl	Gs 2,8	9,4	2,4	Bl 12	3,0
I	3,0	2,7	2,7	4,7	1,5	14,6	3,0	25	5,0
J	1,0	2,0	Bl	3,3	5,0	11,5	2,9	Bl 16	4,0
K	2,3	1,8	2,0	2,7	2,5	11,3	2,3	36	7,2
L	1,3	1,8	2,7	2,0	Gs 2,5	10,2	2,0	34	6,8
M	2,0	1,0	B	2,0	1,5	6,5	1,6	Bl 18	4,5
N	3,0	3,0	3,0	4,0	2,0	15,0	3,0	23	4,6
O	2,0	3,0	2,0	4,0	Gs 2,0	13,0	2,6	15	3,0
P	3,0	3,0	Bl	3,0	2,7	11,7	3,0	Bl 20	5,0
Q	1,8	0,8	0,4	1,4	1,2	4,8	1,0	5	1,0
R	3,3	3,3	2,0	5,0	3,7	17,3	3,5	16	3,2
$MW \bar{B}$	2,7	2,5	2,2	3,3	2,4/2,3*	12,1	2,6	21/16**	4,2
$s \bar{B}$	0,9	0,9	0,7	1,0	0,9	3,3	0,6	8,2	1,6
$VK \bar{B}$	32	36	30	29	37	27	24	42	38

Bemerkungen

* - Mittelwert für Gassenführung, ** - Mittelwert für Blockanlagen,

Abkürzungen der Einzelaggregate:

AP - Auspackmaschine, **RM** - Flaschenreinigungsmaschine, **EBI** - Leerflaschen-Inspektionsmaschine, **FM** - Füll- und Verschleißmaschine, **EM** - Flaschenausstattungsmaschine, **EP** - Einpackmaschine,

weitere Abkürzungen:

Bl - Mechanisch verblockte Aggregate, **Gs** - Gassen- bzw. Einzelführung der Flaschen von EM bis EP,

$MW \bar{B}$ - Mittelwert der Beschädigungsklassen aller Abfüllanlagen für diesen Förderabschnitt (senkrecht in Spalten gebildeter Mittelwert),

$\Sigma \bar{B}$ bzw. $MW \bar{B}_n$ Gesamtanlage - Summe bzw. Mittelwert der Beschädigungsklassen aller Förderabschnitte für eine Abfüllanlage (waagrecht den Einzelwerten einer Abfüllanlage gebildeter Wert),

$\Sigma_{Stauzone}$ bzw. $MW_{Stauzone}$ Gesamtanlage - Mittelwert der Beschädigungsklassen bzw. Stauzonen aller Förderabschnitte für eine Abfüllanlage.

Bei den Ergebnissen mit NRW-Flaschen (Tabelle 4.6) fällt auf, dass auf nahezu allen Förderabschnitten die unteren Reibringe stärker als die oberen beansprucht werden. Bei vergleichbaren Versuchen mit 0,7-l-GDB-Flaschen sind die Ergebnisse umgekehrt, die Beschädigungsklasse B am oberen Reibring ist meist größer. Bei diesem Flaschentyp sind die Unterschiede

der Radien an den beiden Reibringbereiche sehr klein, sie liegen bei $r_o = 24/24$ mm am oberen und $r_u = 24/40$ mm am unteren Reibringbereich.

Beim Vergleich der Mittelwerte der Beschädigungsklassen pro Förderabschnitt $MW_{\bar{B}}$ fällt das deutlich über den anderen Werten liegende Ergebnis zwischen Füll-/Verschließmaschine und Ausstattungsmaschine auf. Dies rührt zum einen daher, dass hier volle Flaschen gefördert werden und somit die herrschenden Reibkräfte der Flaschen untereinander größer sind als bei leeren Flaschen. Zum anderen werden die Flaschen in diesem Bereich nass gefördert (Flaschendusche am Auslauf Füll-/Verschließmaschine), was zu erhöhten Reibkräften zwischen den Flaschen führt. Außerdem konnte in vielen Abfüllanlagen beobachtet werden, dass die Puffer zwischen Füll-/Verschließmaschine und Flaschen-Ausstattungsmaschine sehr voll gehalten wurden, um Etikettierprobleme an der Flaschen-Ausstattungsmaschine durch Stillstandszeiten zu minimieren. Die Ausstattungsmaschine kann so bei Störungen vorangestellter Maschinen noch möglichst lange betrieben werden. Die Anzahl der Stauzonen in diesem Streckenabschnitt ist mit den Abschnitten Auspackmaschine zu Flaschenreinigungsmaschine und Flaschenreinigungsmaschine zu Leerflaschen-Inspektionsmaschine vergleichbar (Tabelle 3.5). Die Förderstrecke zwischen der Leerflaschen-Inspektionsmaschine und der Füll-/Verschließmaschine weist die besten Werte mit der kleinsten Standardabweichung auf. Hier wurden die Flaschen in den meisten Abfüllanlagen nur einsträngig oder mit einer kleinen Anzahl an Stauzonen geführt. Die Mittelwerte Beschädigungsklassen $MW_{\bar{B}}$ der restlichen drei Förderabschnitte von der Auspackmaschine bis zur Leerflaschen-Inspektionsmaschine und der Flaschen-Ausstattungsmaschine bis zur Einpackmaschine liegen im gleichen Bereich bei $2,4 \leq \bar{B} \leq 2,7$. Für die Förderabschnitte zwischen der Ausstattungsmaschine und der Einpackmaschine mit und ohne Gassenführung wurden vergleichbare mittlere Beschädigungsklassen erreicht. Bei den untersuchten vier Abfüllanlagen mit Gassenführung kam es stellenweise zum starken Rotieren der Flaschen in den Gassen, was zu Beschädigungsklassen zwischen 2,0 und 2,8 führte.

Beim Auswerten der einzelnen Abfüllanlagen wird deutlich, dass die mechanische Beanspruchung der Flaschen nicht nur von der Anzahl der Stauzonen abhängt. Bei allen Stauzonen in einer Abfüllanlage ergibt sich die Beanspruchung der Flaschen aus dem Füllungsgrad der Flaschenförderketten, der Regelung der Flaschenförderer, der Lage und Anzahl der Stauschalter, der Länge der Dosierstrecke und der Art der Antriebsregelung vor und nach der Stauzone. Beim geneigten Abwärtsfördern der Flaschen kann durch die zusätzliche Hangabtriebskraft ein höherer Staudruck im Flaschenpulk entstehen, was vor allem bei nachfolgenden Umlenkungen beachtet werden muss. An Überschublechen treten vorwiegend Schlagbeanspruchungen auf, die mit der Dummy-Flaschen-Methode nicht gemessen werden können.

Der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Stauzonen und der mechanischen Beanspruchung der Dummy-Flaschen in den untersuchten Abfüllanlagen ist in Bild 4.4 dargestellt. Außerdem wird der Einfluss der Regelungsart einer Abfüllanlage auf die mechanische Beanspruchung gezeigt. Auf der Abszisse ist der arithmetische Mittelwert aus den Beschädigungsklassen $MW_{\bar{B}}$ der Dummy-Flaschen der fünf bzw. vier Förderabschnitte bei geblockten Abfüllanlagen (drittletzte Spalte Tabelle 4.6) aufgetragen. Die Ordinate zeigt die mittlere Anzahl an Stauzonen $MW_{\bar{S}}$ aller Förderabschnitte der Abfüllanlage (letzte Spalte Tabelle 4.6) an. Dabei wird zwischen Abfüllanlagen mit und ohne Regelung sowie der

Regelungsart unterschieden. Die schwarz gefüllten Rauten zeigen die ausschließlich hinsichtlich des Anlagenwirkungsgrades optimierten, geregelten Anlagen. Die weiß hinterlegten Rauten zeigen drei Abfüllanlagen mit einer besonders flaschenschonenden Regelung. Nicht geregelte Anlagen sind mit einem weiß gefüllten Kreis dargestellt. Bei Abfüllanlagen mit einem mechanisch verblockten Teilstück wurde zusätzlich ein Sternchen hinter das jeweilige Symbol gelegt. Die senkrechte, gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert der Beschädigungsklassen aller untersuchter Abfüllanlagen.

Bei den Abfüllanlagen mit mechanisch geblockten Förderabschnitten wurden nur die vier nicht geblockten Teilstücke für die Berechnung der Mittelwerte der Beschädigungsklassen und Stauzonen herangezogen. Ein mechanisch geblocktes Teilstück weist keine Stauzone auf und die Flaschen werden durch die Maschinenbauteile der Einzelaggregate vernachlässigbar wenig mechanisch beansprucht. Ein Berücksichtigen dieser Förderabschnitte würde die Mittelwerte der Gesamtanlage senken. Eine Abfüllanlage bestehend aus nur einem mechanischen Block von Auspackmaschine bis Einpackmaschine mit einer Einzelflaschenführung ohne Pufferstrecken dazwischen würde kein Scuffing verursachen. Da jede Störung eines Aggregats zum Stillstand einer komplett verblockten Abfüllanlage führt, ist deren Anlagenwirkungsgrad unwirtschaftlich klein.

Die Abfüllanlagen A und G sowie I und P weisen für die Stauzonen und die Beschädigungsklassen jeweils gleiche Mittelwerte auf, so dass in Bild 4.4 deren Symbole aufeinanderliegen.

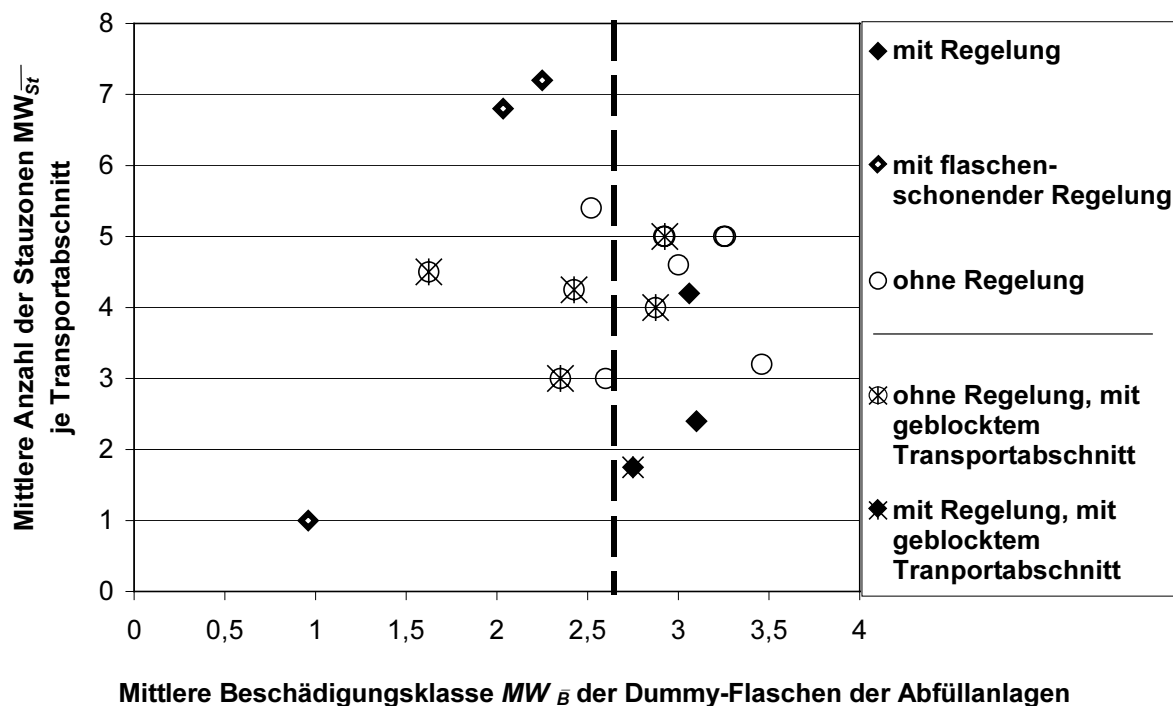


Bild 4.4. Zusammenhang zwischen mittlerer Anzahl an Stauzonen $MW_{\bar{St}}$ je Förderabschnitt und mittlerer Beschädigungsklasse $MW_{\bar{B}}$ der Dummy-Flaschen unterschiedlich geregelter Abfüllanlagen

Die mittleren Beschädigungsklassen $MW_{\bar{B}}$ der geregelten Anlagen befinden sich im Bereich der nicht geregelten Abfüllanlagen. In diesen Abfüllanlagen werden die Geschwindigkeiten

der Flaschenförderer in mehreren Stufen, je nach Stauzustand und evtl. zusätzlich nach der augenblicklichen Nennausbringung der vorangestellten und nachfolgenden Einzelaggregate, geregelt. Die flaschenschonendste Abfüllanlage Q stellt eine kombinierte Anlage für den Betrieb mit Glas- oder Kunststoffflaschen dar. So wird deutlich, dass eine bei Kunststoffflaschen vor allem aus physikalischen Gründen (Umfallen der leichten Flaschen) optimierte Regelung der Abfüllanlagen hinsichtlich der Flaschenschonung als Vorbild für Glasanlagen dienen kann.

Wie Bild 4.4 zeigt, kann mit einer abgestimmten Regelung die mechanische Beanspruchung der Flaschen reduziert werden. Des weiteren werden die Beschädigungen der Flaschen durch die Anzahl der Stauzonen beeinflusst. Die Belastung in den Stauzonen kann jedoch durch eine angepasste Lage bzw. durch eine entsprechende Regelung der Flaschenförderer minimiert werden.

Je größer der Staudruck in der jeweiligen Stauzone ist, um so stärker werden die Flaschen dadurch beansprucht. Speziell an 90°- und 180°-Umlenkungen kann bei hohem Staudruck durch das Springen der Flaschen in entstehende Lücken (Verwirbelungen) ein hoher Schalldruckpegel verursacht werden. Jedoch nicht in allen Bereichen mit großem Schädigungspotential für die Flaschen herrscht auch ein erhöhter Schalldruckpegel.

4.3 Online-Bestandsaufnahme des Zerkratzungszustandes in Abfüllbetrieben

In 15 Abfüllanlagen verschiedener Brauereien wurden mit den in Kapitel 3 beschriebenen Kamerasystemen der Scuffinggrad an NRW-Flaschen am oberen Reibring online gemessen und abgespeichert. Tabelle 4.7 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen über einen Zeitraum von sechs bis acht Stunden. In der zweiten und dritten Spalte sind die prozentualen Anteile P_2 und P_3 am Flaschenpool mit einer Reibringhöhe von >2 (P_2) und >3 mm (P_3) am oberen Reibring angegeben. In der Spalte *Ausscheidung in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine (EBI) A in %* ist die mittlere Ausscheiderate während der gesamten Versuchszeit aufgelistet. Die nächste Spalte, der Anteil *davon an Scuffingflaschen A_S in %*, gibt die durch ein spezielles Scuffingmodul in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine ausgeschiedenen Flaschen an. Bei der Auswertung wurde hier zwischen einer Kameraaufstellung vor bzw. nach der EBI unterschieden. Die prozentualen Anteile P_2 bzw. P_3 an Flaschen mit einer Reibringhöhe >2 bzw. >3 mm wurden immer auf die zugeführte Flaschenzahl bezogen. Für eine Aufstellung des Kamerasystems nach der Leerflaschen-Inspektionsmaschine ergeben sich die Anteile P_2 und P_3 nach folgenden Gleichungen:

$$P_2 = P_{2\text{ gemessen}} + A - A_S \quad (4.1)$$

$$P_3 = P_{3\text{ gemessen}} + A_S \quad (4.2)$$

Je nach Ausbringung, Anzahl der EBI und Störzeiten der Abfüllanlage während der Versuchszeit wurden am Versuchstag die Scuffingdaten von 78.000 bis zu 232.000 Flaschen aufgenommen.

Der Wert für P_2 schwankt zwischen 13 und 53 %, der für P_3 zwischen 4 und 32 %. Die arithmetischen Mittelwerte für alle Abfüllanlagen liegen bei 30 % für eine Reibringhöhe >2 mm und 14 % für eine Reibringhöhe >3 mm. Die Gesamtausscheideraten A an den EBI der Abfüllanlagen betragen, unabhängig vom Alter der Abfüllanlage bzw. der EBI, zwischen 0,8 und 2,3 %, der Mittelwert liegt bei 1,4 %. Beobachtet man die Gesamtausscheideraten

eines Abfüllbetriebes in der EBI, insbesondere den Anteil A_S ausgeschiedener Scuffingflaschen über einen längeren Zeitraum, sind diese nicht nur von der Flaschenqualität des jeweiligen Flaschenpools abhängig, sondern spiegeln den Qualitätsanspruch eines Abfüllbetriebes an das äußere Erscheinungsbild ihrer Flaschen wider.

Tabelle 4.7. Online-Bestandsaufnahme der Flaschenpools in verschiedenen Flaschenabfüllanlagen

Abfüllanlage	oberer Reibring P_2 in %	oberer Reibring P_3 in %	Ausscheidung in der EBI ⁽³⁾ A in %	davon Scuffing in der EBI ⁽³⁾ A_S in %	Gesamtzahl Flaschen n
A	53	25	0,9	⁽²⁾ -	109.899
B	49	32	1,2	0,45	126.939
C	48	27	0,9	- ⁽²⁾	145.419
D	45	23	1,8	⁽²⁾ -	115.332
E	40	24	1,3	⁽²⁾ -	232.580
F	34	13	0,8	⁽²⁾ -	107.848
G	33	5	2,0	0,20	128.693
H	31	18	1,6	⁽²⁾ -	108.477
I	31	14	1,4	0,04	169.465
J	28	10	0,8	⁽²⁾ -	117.253
K	18	6	1,4	0,10	228.521
L	14	4	2,2	0,40	146.929
M	14	8	2,3	⁽²⁾ -	182.896
N	14	6	1,3	0,05	78.094
O	13	5	1,4	⁽²⁾ -	183.027
<i>MW</i>⁽¹⁾	⁽¹⁾30	⁽¹⁾14	⁽¹⁾1,4	Σ	2.087.790
<i>s</i>	14,0	9,4	-		-
<i>VK</i> in %	45,3	64,4	-		-

⁽¹⁾ *MW* - Arithmetischer Mittelwert aller untersuchter Abfüllanlagen

⁽²⁾ Kein spezielles Auswertemodul für Scuffing in der EBI vorgesehen

⁽³⁾ EBI – Leerflaschen-Inspektionsmaschine

Eine graphische Auftragung der Ergebnisse zeigt Bild 4.5. Auf der Abszisse sind die Abfüllanlagen A bis O, auf der linken Ordinate die prozentualen Anteile der Flaschen am Flaschenpool mit einer Reibringhöhe >2 und >3 mm bzw. auf der rechten die Ausscheiderate A in der EBI am Versuchstag aufgetragen. Die Abfüllanlagen sind auf der Abszisse nach absteigendem Anteil P_2 geordnet.

Aus Bild 4.5 kann kein Zusammenhang zwischen hohen Ausscheideraten in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine und somit anzunehmenden hohen Neugläseinspeisungen und dem

Zustand des Flaschenpools eines Abfüllbetriebes gefunden werden. Jedoch wird die große Streuung der Messwerte für die prozentualen Anteile P_2 und P_3 deutlich.

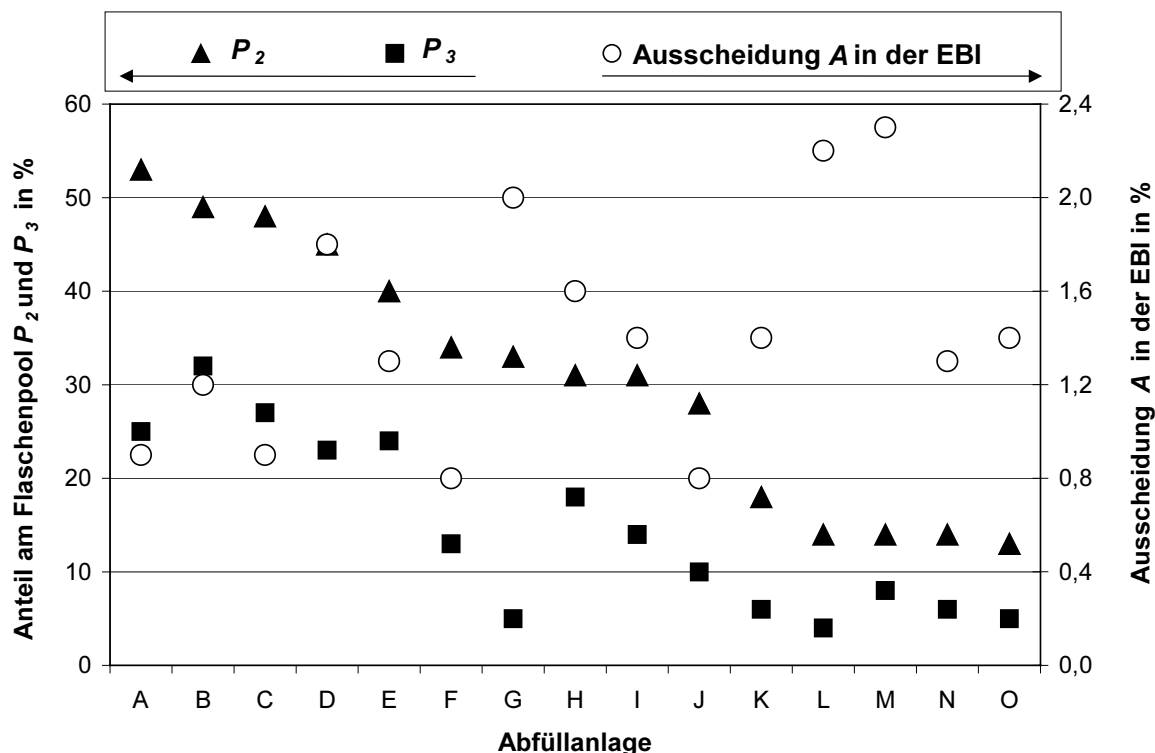


Bild 4.5. Graphische Auftragung der online-Messungen

Zur Zeit ist etwa ein Drittel der Flaschen im NRW-Pool am oberen Reibringbereich bereits stärker zerkratzt als die in der Poolvereinbarung [25] zwischen den deutschen Brauereien und dem Deutschen Brauer-Bund maximal vorgesehenen 2 mm. Etwa ein Siebtel der Flaschen im Pool besitzt am oberen Reibring eine Reibringhöhe >3 mm. Eine Reibringhöhe von 2 mm ist unter der Annahme einer linearen Zunahme der Zerkratzung mit dem Flaschenalter von 0,4 mm pro Jahr und fünf Umläufen pro Jahr bereits nach 20 Umläufen erreicht [56]. Daraus ergäbe sich eine theoretisch notwendige Neuglaseinspeisung von 5 %, die jedoch aus ökonomischen Gründen von keiner Brauerei erreicht wird.

4.4 Zeitliche Weiterentwicklung des Poolzustandes

In einzelnen Brauereien wurden über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren mehrere Online-Bestandsaufnahmen von NRW-Flaschen aufgenommen. Tabelle 4.8 zeigt die Entwicklung des Poolzustandes am Beispiel zweier ausgewählter Brauereien A und B. Diese Ergebnisse zeigen, dass der mittlere Scuffinggrad der NRW-Flaschen in der Zeitspanne zwischen den Messungen stark angestiegen ist.

Aus Untersuchungen zur Korrelation von Flaschenalter und Scuffinggrad ergibt sich, unter Annahme eines linearen Zusammenhanges, eine mittlere Zunahme des Scuffinggrades pro Flasche und Jahr um $7,6 \text{ mm}^2$ im Standardmessfeld von 20 mm Breite [56]. In 17 bzw. 19 Monaten bedeutet dies eine mittlere Zunahme des Scuffinggrades um $10,8 \text{ mm}^2$ für Abfüllanlage A bzw. $12,0 \text{ mm}^2$ für Abfüllanlage B. In den Summenhäufigkeitsverteilungen ergäbe sich daraus ein vertikales Verschieben der Kurven um $10,8$ bzw. $12,0 \text{ mm}^2$. Umgerechnet auf die mittlere Reibringhöhe bedeutet dies eine Zunahme um 0,4 mm pro Jahr, also alle Flaschen

mit einer Reibringhöhe $>2,0$ mm der Messungen vor 17 bzw. 19 Monaten weisen jetzt Reibringhöhen $>2,6$ mm auf.

Tabelle 4.8. Zunahme der Zerkratzung im NRW-Pool innerhalb von 17 bzw. 19 Monaten am Beispiel zweier Brauereien A und B

A			B		
Messung	Anteil >2 mm	Anteil >3 mm	Messung	Anteil >2 mm	Anteil >3 mm
17	4 %	1 %	19	23 %	4 %
Monate	14 %	6 %	Monate	48 %	27 %
Zunahme	10 %	5 %	Zunahme	25 %	23 %

Diese rechnerisch ermittelten Werte können bei der Abfüllanlage der Brauerei A (Bild 4.6) bestätigt werden. Bei der Abfüllanlage der Brauerei B (Bild 4.7) nimmt der Scuffinggrad im betrachteten Zeitraum noch stärker zu. Im rechnerischen Beispiel wurde von einem statischen Flaschenpool ausgegangen. In beiden Abfüllanlagen wurde jedoch der Flaschenpool in der Zwischenzeit durch das Einspeisen von Neuglas und das Aussortieren beschädigter Flaschen, unabhängig vom Alter oder dem Scuffinggrad, in den Leerflaschen-Inspektionsmaschinen verändert. Bei beiden Abfüllanlagen kann eine Abnahme des Anteils an leicht zerkratzten Flaschen festgestellt werden. Durch die lineare Zunahme der Zerkratzung mit dem Flaschenalter und das dynamische Verhalten des Flaschenpools lässt sich der Anstieg der Scuffinggrade der NRW-Flasche innerhalb der Zeitspanne von 17 bzw. 19 Monaten erklären.

Aufgrund der unterschiedlichen Messbedingungen, nahezu trockene Flaschen Abfüllanlage A und nasse Flaschen Abfüllanlage B, wiesen die verwendeten Kalibrierflaschen mit 2 und 3 mm Reibringhöhe am Kamerasystem unterschiedliche Scuffinggrade auf. Bei nasser Glasoberfläche ist der Kontrast zwischen Scuffing und unverletzter Glasoberfläche und somit der auch der bestimmte Scuffinggrad kleiner.

Die in Abfüllanlagen von Brauereien angetroffenen Ausscheideraten in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine (Tabelle 4.7) zwischen 0,8 und 2,3 % (bei einem Mittelwert von $\bar{A} = 1,4$ %) können die Zunahme des mittleren Scuffinggrades im Pool nicht ausgleichen. Nur in der Hälfte der untersuchten Abfüllanlagen wurden in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine stark zerkratzte Flaschen ausgeschiedenen. Die Ausscheideraten waren mit Werten zwischen 0,03 und 0,45 % klein. In den Abfüllanlagen wurden diese Ausscheideraten in der Leerflaschen-Inspektionsmaschine häufig fest vorgegeben und die Empfindlichkeit des Inspektionsmoduls für den auszuschheidenden Scuffinggrad entsprechend dynamisch nachgeregelt. Diese Regelung ist dann nicht sinnvoll, wenn nur leicht zerkratzte Flaschen eingespeist werden. Zu bevorzugen ist daher eine fest eingestellte Empfindlichkeit für die Ausscheidung von ausschließlich stark zerkratzten Flaschen ab einem vorgegebenen Scuffinggrad. Dabei kann eine, an die Anlagenausbringung angepasste, obere Begrenzung der Ausscheidungsrate durchaus empfehlenswert sein.

Analoge, jedoch nicht so zahlreiche Messungen, die zu ähnlichen Ergebnissen führten, wurden auch an anderen Flaschenpools (Euro-, GDB-Flaschen) durchgeführt. So wurde deutlich, dass die an den NRW-Flaschen gewonnen Erkenntnisse auf andere Flaschentypen übertragbar sind.

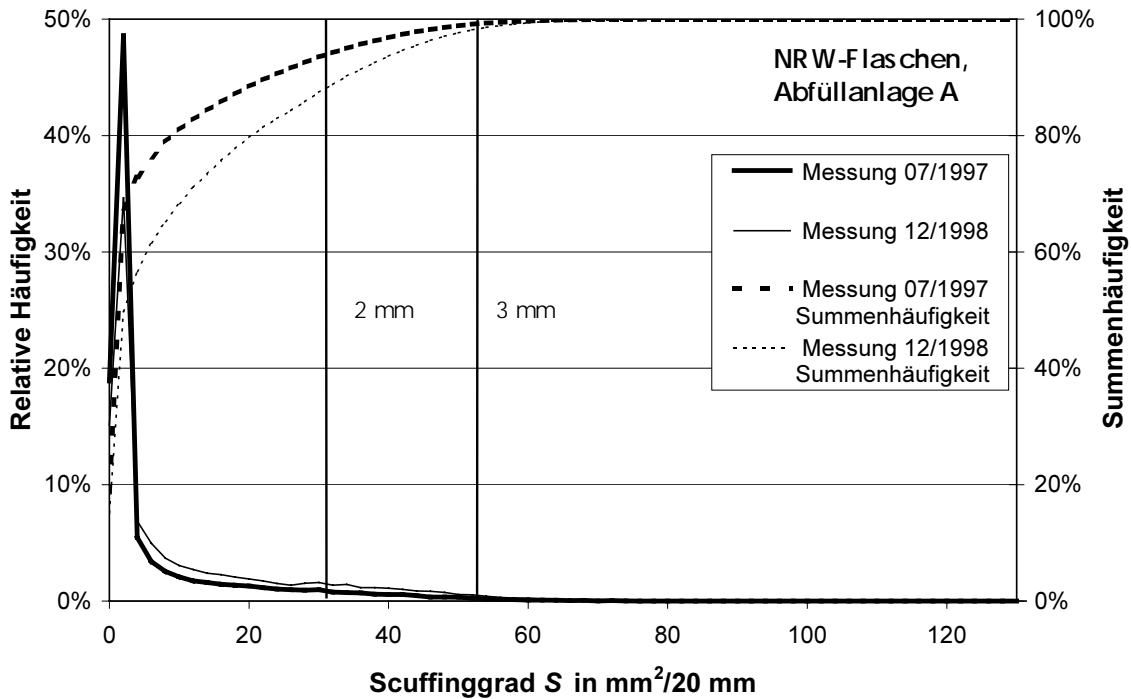


Bild 4.6. Veränderung der Verteilungsfunktionen innerhalb von 17 Monaten am Beispiel einer Abfüllanlage der Brauerei A

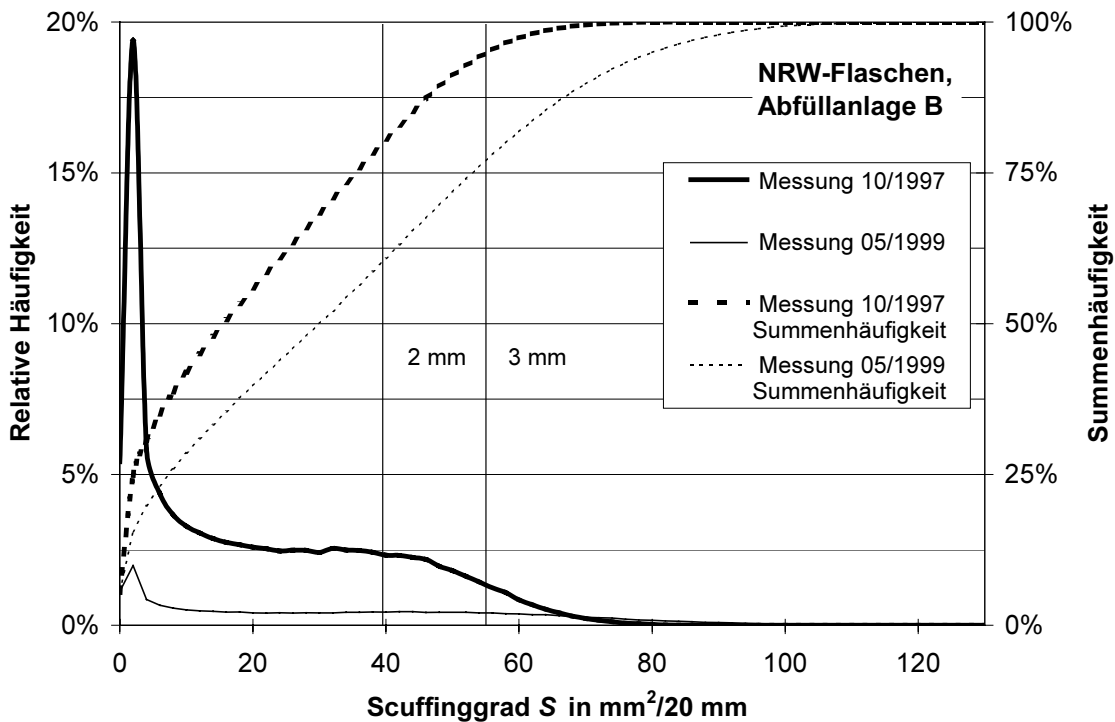


Bild 4.7. Veränderung der Verteilungsfunktionen innerhalb von 19 Monaten am Beispiel einer Abfüllanlage der Brauerei B

Wie aus einer Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Scuffinggrad und Nutzungszeit für Glasflaschen von DUFFY und LANGFORD [30] bei South African Breweries festgestellt wurde gibt es für den Scuffinggrad an einer Glasflasche eine obere Grenze. Nach Erreichen dieses maximalen Scuffinggrades nimmt die Zerkratzung von Mehrweg-Glasflaschen nicht

mehr merklich zu. In diesem Stadium ist der Scuffingbereich am Reibring der Flasche bereits so groß, dass sehr viel Glasmaterial abgetragen werden müsste, um den Scuffinggrad weiter zu erhöhen. Jede Glasflasche mit ausgebildeten Reibringbereichen wird ein solches Verhalten zeigen. Der maximale Scuffinggrad ist abhängig von der Geometrie der Reibringbereiche. Wie sich aus den Versuchen zeigt, werden bei gleicher Beanspruchung bei kleinen Radien im Reibringbereich Zerkratzen schneller sichtbar, ein Plateau in der Scuffinggrad-Nutzungszeit-Funktion wird bereits bei kleineren Scuffinggraden erreicht. Bei zu kleinen Radien kann es jedoch nach Abtragen des gesamten Reibringwulstes zu vollflächigem Scuffing der Flasche kommen. Dies bedeutet, dass der maximal erreichbare Scuffinggrad sicher immer größer als der ästhetisch vertretbare ist.

4.5 Eigenflaschenanteil im Rücklaufleergut

In 17 Abfüllanlagen von Brauereien wurde anhand von Stichproben aus dem Rücklaufleergut der Eigenanteil der der Abfüllanlage zugeführten NRW-Flaschen bestimmt. Hierzu wurde möglichst von jeder Leergutpalette ein Kasten untersucht, d. h. etwa jeder vierzigste Kasten vom Flaschenförderer genommen und beurteilt. Notiert wurde die Herkunftsbrauerei aller entnommenen NRW-Flaschen anhand des Etiketts.

In fünf Abfüllanlagen wurde der Eigenflaschenanteil in zwei Stichproben am gleichen Versuchstag vormittags (1) und nachmittags (2) bestimmt. Tabelle 4.9 zeigt die Ergebnisse der Abfüllanlagen A bis Q. Die Spalte Kistenanzahl gibt die Anzahl der pro Abfüllanlage untersuchten Kästen an. In der Spalte Flaschenanzahl n wurden nur die in den Kästen enthaltenen NRW-Flaschen, keine Flaschen anderer Flaschentypen oder fehlende Flaschen berücksichtigt. Beim Berechnen des Mittelwertes für den Eigenflaschenanteil wurden die zwei Stichproben einer Abfüllanlage vereinigt.

Tabelle 4.9. Eigenflaschenanteil E_F der NRW-Flaschen im Rücklaufleergut

Abfüllanlage	Kistenanzahl	Flaschenanzahl n	E_F in %	Abfüllanlage	Kistenanzahl	Flaschenanzahl n	E_F in %
A	100	1.965	69,3	I2	90	1.634	54,3
B	140	2.506	47,6	J	80	1.443	74,7
C	100	1.908	67,9	K	100	2.000	92,8
D	100	1.957	72,2	L1	100	1.997	88,5
E1	100	1.883	60,2	L2	100	1.982	87,7
E2	100	1.976	70,1	M	100	1.988	72,7
F	100	2.000	60,2	N	19	367	73,8
G1	100	1.726	66,5	O1	100	1.997	25,4
G2	100	1.987	60,8	O2	44	886	72,4
H	100	1.998	70,6	P	103	1.938	68,5
I1	88	1.694	69,5	Q	82	1.624	73,2
gewichteter Mittelwert \bar{E}_F in %			68,4				

Die Auswertung zeigt, dass der Eigenflaschenanteil E_F in den Brauereien stark schwankt (Minimum: 25,4 % und Maximum: 92,8 %). Aus den Ergebnissen an den Abfüllanlagen, bei denen zwei Stichproben gezogen wurden, wird die wichtige Rolle der Leergutlieferanten oder

Getränkeverleger deutlich. Beispielsweise weisen Anlage O1 und O2 stark unterschiedliche Ergebnisse auf.

Der arithmetische Mittelwert der Eigenflaschenanteile aller Messungen liegt bei $\bar{E}_F = 68,4\%$. Dies bedeutet, dass im Durchschnitt nur etwa zwei Drittel der eingesetzten Flaschen aus Vorabfüllungen des eigenen Betriebes stammen. Bei fünf Umläufen im Jahr ergibt sich nach einem Jahr nur noch ein Anteil an eigenen Flaschen von 15 %. Dabei wurden eigene Flaschen, die nach mehreren Umläufen in eine Abfüllanlage wieder zurückkommen, nicht berücksichtigt. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass eine gute Flaschenqualität im Pool nur dann erhalten werden kann, wenn möglichst viele Abfüllbetriebe an der Vermeidung von Scuffing im eigenen Abfüllbetrieb mitwirken.

4.6 Chemische Beanspruchung der Glasflaschen in Flaschenreinigungsmaschinen

Um die chemische Beanspruchung der Glasflaschen in Flaschenreinigungsmaschinen zu beurteilen, wurden in 17 Flaschenabfüllanlagen drei Reinigungsparameter aufgenommen: die maximale Temperatur der Lauge ϑ_L , die gesamte Laugenkontaktzeit t_L und die NaOH-Konzentration c_L (Tabelle 4.10).

Bei den Messungen mit dem Temperaturlogger wurde die Verweilzeit t_L im gesamten Laugenbereich vom Eintauchen in die Weichlauge bis zum Erreichen der ersten Behandlung in den nachfolgenden Wasserzonen bestimmt. Die gemessenen Zeiten für den Laugenkontakt t_L in den Flaschenreinigungsmaschinen liegen zwischen 7,23 und 19,03 min, der Mittelwert aller Flaschenreinigungsmaschinen bei $t_L = 11,25$ min. Für hartnäckige Verschmutzungen werden reine Laugentauchzeiten von 12-14 min empfohlen [5]. Die reine Tauchzeit konnte mit dem verwendeten Temperaturlogger aber nicht direkt erfasst werden, sondern nur in der Summe der gesamten Laugenkontaktzeit t_L . Bei elf Abfüllanlagen liegen die gesamten Laugenkontaktzeiten unter 12 min, bei sechs Abfüllanlagen zwischen 12 und 14 min. Bei den Abfüllanlagen O, P und Q liegen zwar die Laugenkontaktzeiten über 14 min, jedoch kam es während der drei Durchläufe bei den Aufnahmen der Temperaturprofile immer wieder zu Stillstandszeiten, so dass hier normalerweise ohne Stillstand kürzere Zeiten eingehalten werden. Bei diesen drei Anlagen liegt auch die Gesamtverweilzeit sehr hoch. Aus den Ergebnissen für die gesamten Laugenkontaktzeiten t_L kann also abgeleitet werden, dass die vorgegebenen Laugentauchzeiten von keiner der untersuchten Flaschenreinigungsmaschinen überschritten werden.

Die Verweilzeiten in der Flaschenreinigungsmaschine für bereits bestehende Abfüllanlagen sind die Anlagenausbringung und die Bauart vorgegeben und lassen sich nicht beeinflussen. Bei einer Neuplanung einer Flaschenreinigungsmaschine könnte jedoch für starke Verschmutzungen eine zweimalige Reinigung der Flaschen, nach Ausschleusen dieser Flaschen an der Leerflaschen-Inspektionsmaschine, mit einkalkuliert werden. Diese Alternative setzt eine Leerflaschen-Inspektionsmaschine nach dem heutigen Stand der Technik voraus, dies ist jedoch auch für das Erfüllen Lebensmittelhygieneverordnung und der dort verankerten HACCP notwendig [54]. Für die höhere Anzahl von zur Flaschenreinigungsmaschine zurückgeführten Flaschen müssen zusätzlich entsprechende organisatorische Maßnahmen in der jeweiligen Abfüllanlage berücksichtigt werden.

Die maximalen Temperaturen ϑ_L in den Laugenzonen der Flaschenreinigungsmaschine betragen zwischen 78,1 und 88,1 °C. In zehn Abfüllanlagen blieben die Temperaturen unter den empfohlenen 83 °C, in fünf Betrieben wurden die Laugenbäder auf über 85 °C aufgeheizt. Die NaOH-Konzentrationen liegen zwischen 1,6 und 2,1 %. In dreizehn Laugenbädern wurden NaOH-Konzentrationen von $c_L > 1,8$ % eingesetzt, jedoch werden außer in einem Betrieb die empfohlenen Werte von maximal 2,0 % eingehalten.

Tabelle 4.10. Bedingungen in den Flaschenreinigungsmaschinen der untersuchten Flaschenabfüllanlagen: gesamte Laugenkontaktzeit t_L , maximale Laugentemperatur ϑ_L und NaOH-Konzentration c_L

Abfüllanlage	Laugenkontaktzeit t_L in min	max. Laugen- temperatur ϑ_L in °C	NaOH-Konzentration c_L in %
A	7,23	78,1	2,0
B	7,66	88,1	2,0
C	7,95	85,4	2,0
D	8,68	79,2	1,8
E	8,90	85,4	2,0
F	9,36	85,0	1,6
G	9,85	80,7	2,0
H	11,00	80,0	2,0
I	11,28	80,9	2,1
J	11,63	82,7	2,0
K	11,87	80,4	1,8
L	12,05	79,6	2,0
M	12,72	87,4	2,0
N	13,78	84,5	1,9
O	14,15	82,7	1,8
P	16,57	85,2	2,0
Q	19,03	78,6	1,9
MW	11,25	82,7	1,9

Bild 4.8 zeigt die in den einzelnen Abfüllanlagen vorgefundenen Reinigungsbedingungen. Auf der Abszisse sind die Laugenkontaktzeiten t_L , auf den Ordinaten die maximalen Laugentemperaturen ϑ_L und NaOH-Konzentrationen c_L aufgetragen. Zur besseren Übersicht verbindet eine vertikale Linie die zu einer Flaschenreinigungsmaschine gehörenden Daten. Bei den in der Literatur angegebenen Orientierungswerten für ausreichende Laugentemperaturen (83 °C) und NaOH-Konzentrationen (1,8 %) ist eine horizontale, gestrichelte Linie in das Diagramm eingezeichnet.

Aus den Versuchen lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen maximaler Laugentemperatur und NaOH-Konzentration herausarbeiten. Besonders glasschonende Bedingungen sind nur durch ein Minimieren aller drei Reinigungsparameter zu erreichen. Wenige der untersuchten Flaschenreinigungsmaschinen arbeiten bei vergleichsweise milden Reinigungsbedingungen entsprechend der Vorgaben. In den meisten Flaschenreinigungsmaschinen wurde zumindest einer der Grenzwerte überschritten. Die Laugentemperatur und

die NaOH-Konzentration können in vielen Betrieben noch reduziert werden um die Glasoberflächen zu schonen.

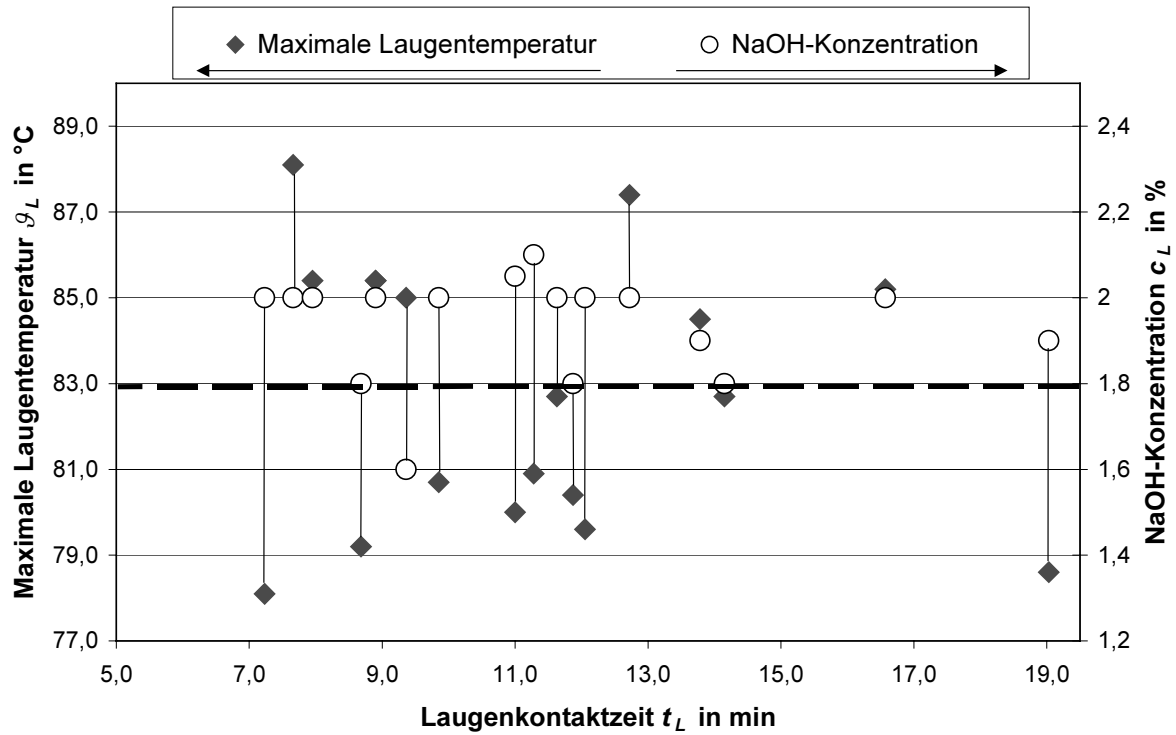


Bild 4.8. Auftragung der maximalen Laugentemperatur und NaOH-Konzentration über der gesamten Laugenkontaktzeit der untersuchten Abfüllanlagen

5 Einfluss von Scuffing auf die Qualitätseigenschaften von Mehrweg-Glasflaschen

Kapitel 5 zeigt die Ergebnisse der Versuche zum Einfluss des Scuffings auf die Qualitätseigenschaften von Glasflaschen. Dabei wurden vor allem die Festigkeitseigenschaften wie Innendruck- und Schlagfestigkeit sowie Oberflächenveränderungen durch die chemische und mechanische Beanspruchung untersucht.

5.1 Festigkeit von Glasflaschen

Im Folgenden wird der Einfluss von Scuffing auf die Festigkeit von Glasflaschen diskutiert. Dabei werden die Ergebnisse von Untersuchungen zur

- Innendruckfestigkeit und
- Schlagfestigkeit

an verschiedenen Flaschentypen (NRW, GDB, Ale) vorgestellt. Ein Teil der Ergebnisse befindet sich im Anhang. Besonders beim Abfüllen von carbonisierten Getränken in Mehrweg-Glasflaschen spielt die Festigkeit aus Gründen der Produkthaftung [110] eine sehr große Rolle.

5.1.1 Allgemeines

Bei den Versuchen wurde zunächst der mittlere Scuffinggrad \bar{S} jeder einzelnen gebrauchten^(*) Flasche am oberen bzw. bei den Schlagfestigkeitsmessungen auch am unteren Reibring ermittelt. Basierend auf \bar{S} wurden die Flaschen in sechs Scuffingklassen mit der Bezeichnung (1) bis (6) mit steigendem Scuffinggrad eingeteilt. Zur Veranschaulichung der Scuffingklassen (1) bis (6) ist in Tabelle 3.3 beispielhaft für die 0,7-l-GDB-Flaschen zusätzlich eine visuelle Beurteilung und die manuell gemessene Reibringhöhe gegenüber gestellt. Neben gebrauchten Flaschen wurden hüttenneue (0), einmal in der Flaschenreinigungsmaschine gewaschene (0*) und in heißer Reinigungslauge gelagerte (0') Flaschen in die Untersuchungen mit aufgenommen.

In nahezu allen Versuchen konnten die in den SPEZIELLEN TECHNISCHEN LIEFER- UND BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR BIERFLASCHEN (STLB) des DEUTSCHEN BRAUER-BUNDES UND DES BV GLAS UND MINERALFASER [102] verlangte Anzahl an Versuchsflaschen $n = 45$ pro Klasse weit überschritten werden. Ausnahmen bildeten zumeist die Klassen der stark zerkratzten Flaschen (6), da hier Versuchsflaschen nur schwer zu finden waren und die Klasse (0'), bei der die Versuchsdurchführung die Anzahl der Flasche limitierte.

In zerstörenden Materialprüfungen wurden die Mittelwerte und statistische Streuungen für die Innendruck- oder Schlagfestigkeit jeder Klasse bestimmt. Die Messwerte für die Innendruckfestigkeit sind als 1-Minuten-Druckfestigkeit p_{60} in bar Überdruck, für die Schlagfestigkeit als maximal erzielter Schlagimpuls I in kg m/s angegeben. Die Standardabweichung s und die Spannweite w beschreiben die Streuungen innerhalb jeder Klasse. Die prozentualen Anteile $p\%$ und $I\%$ der jeweiligen Klasse beziehen sich auf die Anfangsfestigkeit der hüttenneuen Flaschen (0).

(*) Unter gebrauchten Flaschen werden Flaschen aus dem Rücklaufleergut eines Abfüllbetriebs verstanden, die mindestens einmal umgelaufen sind (Abfüllbetrieb-Handel-Verbraucher und zurück). Diese Flaschen wiesen unterschiedlich starkes, jedoch visuell sichtbares Scuffing auf.

Speziell bei den Messungen der Innendruckfestigkeit wurde das Erfüllen flaschenspezifischer Festigkeitsvorgaben der STLB [102] überprüft. Hierzu wurden aus den Messergebnissen der Innendruckfestigkeit nach der Gleichung (5.1) die unteren Grenzwerte G_p je Klasse berechnet und mit der vorgegebenen unteren Toleranzgrenze T_{Up} der STLB verglichen.

$$G_p = \overline{p_{60}} - k \cdot s_p \geq T_{Up}, \quad (5.1)$$

wobei: k Wert aus der Studentverteilung für gewähltes Vertrauensniveau und Stichprobenanzahl (z. B. $k = 1,66$; für $n = 100$ und Vertrauensniveau 95 %),
 s_p Standardabweichung aus den Messungen der Innendruckfestigkeit.

5.1.2 Innendruckfestigkeit

Der Zusammenhang zwischen dem Scuffinggrad S und der Innendruckfestigkeit p_{60} wird im Folgenden an der NRW-Flasche dargestellt. Analoge Versuche an anderen Flaschentypen, wie den 0,5-l-Ale- und den 0,7-l-GDB-Flaschen, führten zu ähnlichen Ergebnissen [55]. Die Innendruckfestigkeit wurde mit dem in Kapitel 3 beschriebenen AGR Ramp Pressure Tester bestimmt.

Tabelle 5.1 gibt die Messergebnisse wieder. Es sind die wichtigsten Messgrößen, wie die Grenzen der Scuffinggrade S jeder Klasse, die Stichprobengröße n , die Mittelwerte der Scuffinggrade \overline{S} und der Innendruckfestigkeit $\overline{p_{60}}$ jeder Klasse, die Standardabweichung s_p , die Spannweite w , der prozentuale Anteil der Innendruckfestigkeit $p\%$ jeder Klasse bezogen auf hüttenneue Flaschen, die jeweils kleinste gemessene Innendruckfestigkeit je Klasse p_{min} sowie die berechneten unteren Grenzwerte G_p aufgelistet. Insgesamt wurden 100 hüttenneue (0), 32 nahezu nur chemisch beanspruchte (0'), 100 einmal gereinigte (0*) sowie 635 Flaschen unterschiedlich starkes Scuffing (1)-(6) aufweisende Versuchsflaschen untersucht.

Tabelle 5.1. Klasseneinteilung und statistische Größen für die Messungen der Innendruckfestigkeit an NRW-Flaschen

Prüfgröße in		Scuffingklasse								
		(0)	(0')	(0*)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
S	mm ²	-	-	-	0,0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	40,1-50,0	≥50,1
n	-	104	32	118	227	88	131	81	70	38
\overline{S}	mm ²	0	0	0	1,9	15,2	25,5	34,6	44,8	55,8
$\overline{p_{60}}$	bar	40,7	30,6	25,2	15,3	15,1	15,2	14,6	14,8	14,6
s_p	bar	10,3	7,2	4,2	3,5	2,6	2,6	2,6	2,2	2,0
w	bar	41,4	27,3	21,6	38,9	13,3	15,4	15,4	12,0	8,4
$p\%$	%	100	75	62	38	37	37	36	36	36
p_{min}	bar	14,6	16,6	12,5	7,7	8,8	8,7	7,9	9,6	10,4
G_p	bar	23,6	18,4	18,2	9,5	10,8	10,9	10,3	10,5	11,2

Bei den Klassen mit hohen Festigkeitswerten wie (0), (0*) und (0') liegen große Streuungen, bei niedrigen Innendruckfestigkeiten der Klassen (2) bis (6) kleine Streuungen vor (siehe auch Bild 5.2). Die Klasse (1) liegt im Übergangsbereich zwischen einmal gereinigten und deutlich Scuffing aufweisenden Flaschen. Gerade in diesem Bereich nimmt die Festigkeit der Flaschen, beispielsweise durch einen weiteren Umlauf in der Abfüllanlage, stark ab. Klasse

(1) enthält Flaschen, die noch kein Scuffing bis erste sichtbare Spuren von Scuffing zeigen. So ergibt sich hier bei den Messwerten innerhalb der Klasse im Vergleich zu den anderen Klassen (2) bis (6) eine große Streuung. Diese Besonderheit der Klasse (1) spiegelt sich auch in ihrem Grenzwert G_p wider, der mit 9,5 bar unterhalb der Toleranzgrenze der STLB für NRW-Flaschen liegt ($T_{Up} = 10$ bar Überdruck). Bei allen anderen Klassen wird die untere Toleranzgrenze eingehalten.

Bild 5.1 stellt die Ergebnisse graphisch dar. Die Messpunkte sind am jeweiligen Mittelwert des Scuffinggrades \bar{S} und der 1-Minuten-Druckfestigkeit \bar{p}_{60} jeder Klasse eingetragen. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichungen der Innendruckfestigkeit s_p innerhalb der einzelnen Klassen dar.

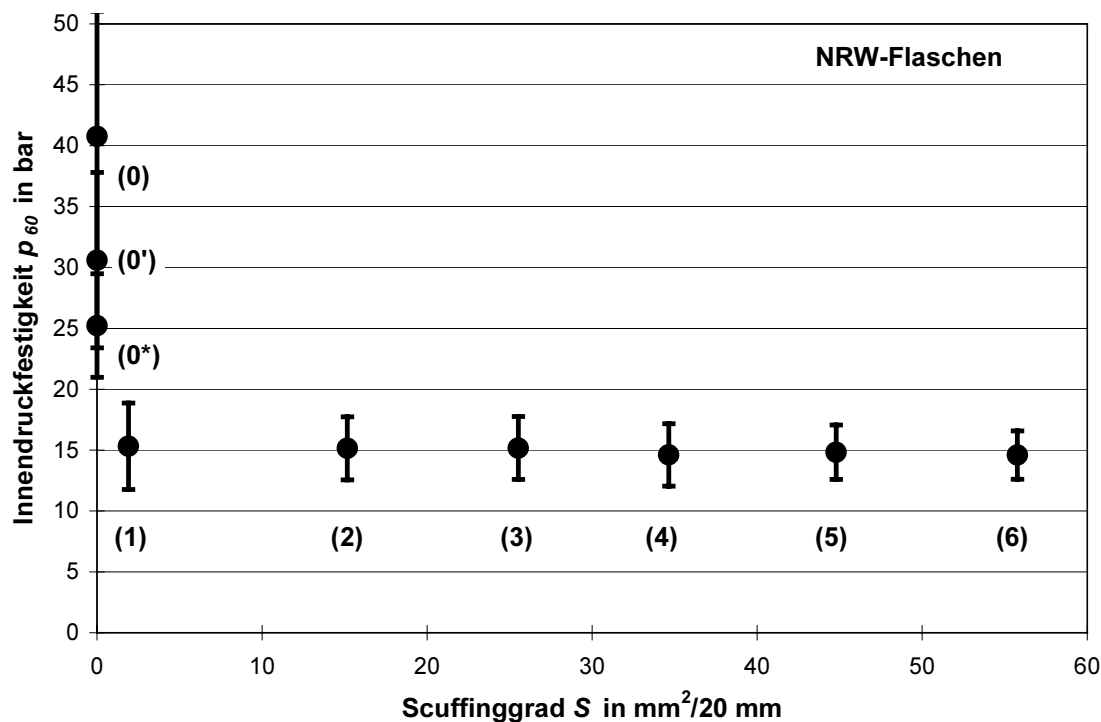


Bild 5.1. Zusammenhang zwischen Scuffinggrad und Innendruckfestigkeit (NRW-Flaschen)

Bild 5.1 zeigt, eine Abnahme der mittleren 1-Minuten-Druckfestigkeit von $p_{60} = 41 \pm 10$ bar bei hüttenneuen (0) auf $p_{60} = 25 \pm 4$ bar bei einmal gereinigten Flaschen (0*). Die vorwiegend chemisch beanspruchten Flaschen (0') liegen mit $p_{60} = 30 \pm 7$ bar zwischen den oben genannten Klassen. Bei den Flaschen mit leichtem Scuffing (1), sinkt der Mittelwert der 1-Minuten-Druckfestigkeit auf $p_{60} = 15 \pm 4$ bar, was in etwa einem Drittel der Ausgangsfestigkeit hüttenneuer Flaschen entspricht. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der 1-Minuten-Druckfestigkeit der Flaschen mit Gebrauchsspuren (1)-(6) unterscheiden sich bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ nicht signifikant, so dass ein zunehmender Scuffinggrad keinen weiteren festigkeitsmindernden Einfluss auf die NRW-Flaschen ausübt.

Wie bereits erwähnt, sind bei allen Flaschentypen die Streuungen der Druckfestigkeiten bei den Neuglasflaschen (0, 0*, 0') im Vergleich zu den Flaschen mit deutlichen Gebrauchs-

spuren auffällig groß. Die Auswirkung dieses Phänomens zeigt Bild 5.2 am Beispiel der GDB-Flaschen. Hier wurde die Summenhäufigkeit der Druckfestigkeit der Flaschen für jede Scuffingklasse aufgetragen. Bei den GDB-Flaschen unterscheiden sich die Mittelwerte der Druckfestigkeit der Scuffingklassen (3) und (4) sowie (5) und (6) nicht signifikant, daher wurden diese vier Scuffingklassen im folgenden Diagramm zu zwei Kurven zusammengefasst.

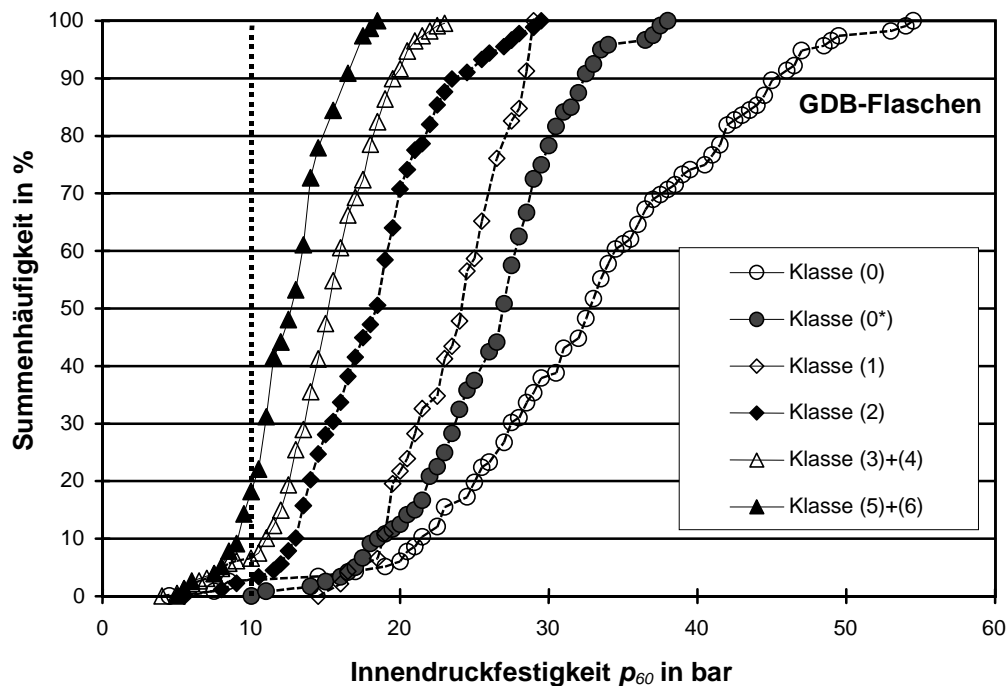


Bild 5.2. Summenhäufigkeitsverteilung von GDB-Flaschen der Scuffingklassen (0)-(6)

Tabelle 5.2 zeigt die Messergebnisse der GDB-Flaschen analog zu Tabelle 5.1. Bei diesen Messungen wurden keine Flaschen der Klasse (0') untersucht. Zusätzlich ist in der letzten Zeile der Tabelle 5.2 die Anzahl der Flaschen mit einer Innendruckfestigkeit $p_{60} < 10$ bar aufgelistet. Es wird deutlich, dass sechs der acht Scuffingklassen Flaschen enthielten, deren Druckfestigkeit im kritischen Druckbereich $p_{60} < 10$ bar (siehe gestrichelte Linie in Bild 5.2) lag. Dieser Druckbereich ist besonders interessant, da er typisch für durch inneren Überdruck spontan platzende Flaschen ist. Hierunter waren auch die Klassen mit nur leichtem Scuffing und hüttenneue Flaschen. Das Aussortieren von Flaschen mit starkem Scuffing beim Abfüller ist demnach keine wirkungsvolle Sicherungsmaßnahme gegen das Platzen von Flaschen bei bereits kleineren Drücken.

Für hüttenneue GDB-Flaschen sind in den QUALITÄTS- UND PRÜFBESTIMMUNGEN FÜR BRUNNEN-EINHEITSFLASCHEN DER GENOSSENSCHAFT DEUTSCHER BRUNNEN [41] verschiedene Grenzwerte festgelegt. Die untere Toleranzgrenze für die Innendruckfestigkeit hüttenneuer Flaschen beträgt $T_{Up} = 18$ bar, sie wurde für die hüttenneuen Flaschen bei diesen Messungen mit $G_p = 16,6$ bar unterschritten. Auch die Forderung, gemäß der alle gemessenen Einzelwerte $p_{60} > 16$ bar betragen sollen, wurde nicht erfüllt. Die kleinste Innendruckfestigkeit der Klasse (0) wurde mit $p_{60} = 4,7$ bar bestimmt. Bei einer Rücksprache mit der zuständigen Glashütte ergaben sich keine auffälligen Befunde bei den Qualitätskontrollen dort. Entweder

wurden diese zu kleinen Festigkeiten durch eine Vorschädigung einiger Flaschen beim Transport der Flaschen an unser Institut oder Glasfehler verursacht. Zumindest die Bedingung Mittelwert der Innendruckfestigkeit $\bar{p}_{60} \geq 30$ bar konnte erfüllt werden. Eine untere Toleranzgrenze für gebrauchte Flaschen wird hier nicht genannt, der Vollständigkeit halber sind aber alle ermittelten Grenzwerte G_p in der Tabelle angegeben.

Bei Flaschen, deren Druckfestigkeit unter 7 bar lag, zerbarst der Flaschenkörper nicht vollständig, wie es bei höheren Drücken der Fall ist. Hier kam es lediglich zu einem Zersplittern der Flaschen im Mündungs- und Halsbereich.

Tabelle 5.2. Klasseneinteilung und statistische Größen für die Messungen der Innendruckfestigkeit an GDB-Flaschen

Prüfgröße in		Scuffingklasse							
		(0)	(0*)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
S	mm ²	-	-	0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	40,1-50,0	≥50,1
n	-	116	120	50	90	140	88	55	22
\bar{S}	mm ²	-	-	3,9	15,9	25,7	34,5	44,5	54,7
\bar{p}_{60}	bar	32,7	27,1	24,3	18,0	15,6	14,6	12,6	12,2
s_p	bar	9,7	5,4	4,4	4,5	3,7	3,5	2,8	2,7
w	bar	49,4	27,3	20,3	23,8	22,1	16,7	12,9	10,9
$p\%$	%	100	83	74	55	48	45	39	37
p_{min}	bar	4,7	10,3	14,7	5,7	4,4	5,5	5,1	5,7
G_p	bar	16,6	18,1	16,9	10,5	9,5	8,8	7,9	7,6
n mit $p_{60} < 10$ bar	-	4	0	0	3	8	7	8	5

Im Vergleich zu den NRW-Flaschen tritt bei den GDB-Flaschen eine Stagnation der Innendruckfestigkeit erst bei höheren Scuffinggraden, ab etwa $\bar{S} = 35$ mm² ein. Trotz einer größeren theoretischen Wandstärke ist die Innendruckfestigkeit der GDB-Flaschen generell kleiner. Dies kann durch den deutlich größeren Flaschendurchmesser und die spannungsverursachende Einschnürung oberhalb des zylindrischen Bereichs begründet werden. Ale-Flaschen wiesen im Vergleich zu den GDB- und NRW-Flaschen höhere Scuffinggrade auf. Ihre Messwerte für die Innendruckfestigkeit sind den Messwerten der NRW-Flaschen ähnlich. Auch die Flaschengeometrie und die Glasdicken der beiden Flaschentypen sind vergleichbar. Tabelle 3.6 zeigt eine Übersicht der Flaschendaten (NRW, GDB, Ale) Zeichnungen der drei Flaschentypen befinden sich im Anhang: Bild 8.1-8.3.

5.1.3 Schlagfestigkeit

Die Schlagfestigkeit wurde mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Schlagpendelmessgerät am oberen und unteren Reibring der Glasflaschentypen NRW und 0,7-l-GDB bestimmt. Nach Ermitteln des Scuffinggrades S am jeweiligen Reibring wurde eine zerstörende Schlagfestigkeitsprüfung vorgenommen. Klasseneinteilung und Auswertung erfolgten wie bei der Innendruckprüfung beschrieben. Die nachfolgenden Tabelle 5.3 und 5.4 zeigen die Ergebnisse für NRW-Flaschen getrennt für den oberen und unteren Reibring nach Scuffinggraden, klassiert analog zu den Messungen der Innendruckfestigkeit. Die Messergebnisse werden in Bild 5.3

dargestellt. Bild 5.4. zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen am oberen und unteren Reibring. An 0,7-l-GDB-Flaschen wurden vergleichbare Ergebnisse erhalten [55].

Tabelle 5.3. Oberer Reibring: Klasseneinteilung, Stichprobengrößen n , Anfangsschlagimpuls I_0 , jeweilige Erhöhung des Impulses ΔI , mittlere Schlagfestigkeit \bar{I} , Standardabweichung s_I , Spannweite w und prozentuale Festigkeit $I\%$ der NRW-Flaschen

Prüfgröße in		Scuffingklasse								
		(0)	(0*)	(0')	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
S	mm ²	-	-	-	0,0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	40,1-50,0	≥50
n	-	100	100	67	148	103	92	99	125	113
I_0	kg m/s	1,18	1,18	1,06	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ΔI	kg m/s	0,27	0,27	0,27	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
\bar{I}	kg m/s	3,03	1,64	2,33	1,23	1,17	1,17	1,15	1,12	1,13
s_I	kg m/s	0,29	0,11	0,39	0,16	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11
w	kg m/s	0,90	0,46	1,03	0,80	0,40	0,50	0,50	0,70	0,50
$I\%$	%	100	54	77	41	39	39	38	37	37

Tabelle 5.4. Unterer Reibring: Klasseneinteilung, Stichprobengrößen n , Anfangsschlagimpuls I_0 , jeweilige Erhöhung des Impulses ΔI , mittlere Schlagfestigkeit \bar{I} , Standardabweichung s_I , Spannweite w und prozentuale Festigkeit $I\%$ der NRW-Flaschen

Prüfgröße in		Scuffingklasse								
		(0)	(0*)	(0')	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
S	mm ²	-	-	-	0,0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	40,1-50,0	≥50
n	-	100	100	67	132	93	121	129	136	89
I_0	kg m/s	1,99	1,30	1,06	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
ΔI	kg m/s	0,27	0,27	0,27	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
\bar{I}	kg m/s	2,18	1,57	1,67	1,14	0,99	0,98	0,94	0,95	0,94
s_I	kg m/s	0,27	0,26	0,44	0,26	0,15	0,16	0,15	0,15	0,13
w	kg m/s	0,82	0,88	1,31	1,25	0,50	0,37	0,37	0,50	0,37
$I\%$	%	100	72	77	52	45	45	43	44	43

Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Innendruckfestigkeit. Von einer sehr hohen Schlagfestigkeit der hüttenneuen Flaschen mit $\bar{I} = 3,03 \pm 0,29$ am oberen Reibring bzw. $\bar{I} = 2,18 \pm 0,27$ kg m/s am unteren Reibring kam es zu einer starken Abnahme über die vorwiegend chemisch beanspruchten und einmal gewaschenen Flaschen auf 54 % der Ausgangsfestigkeit oben und 72 % unten. Die Flaschen mit nur leichtem Scuffing (1) zeigten eine noch kleinere Schlagfestigkeit mit 41 % oben bzw. 52 % unten. Eine weitere Abnahme war noch von Klasse (1) zu (2) zu verzeichnen, dann jedoch pendelten sich die Mittelwerte für den Schlagimpuls der Klassen (2) bis (6) am oberen Reibring bei etwa $\bar{I} = 1,14 \pm 0,11$ kg m/s und am unteren Reibring bei etwa $\bar{I} = 0,94 \pm 0,15$ kg m/s ein. Dies entspricht am oberen Reibring 38 %, am unteren 43 %, der Ausgangsfestigkeit bei hüttenneuen Flaschen (0). Die Abnahme der Schlagfestigkeit am unteren Reibring entspricht mit 38 % in etwa der bei der Innendruckfestigkeit mit 37 %.

Bild 5.3 zeigt die oben geschilderte Stagnation der Festigkeit an beiden Reibringbereichen im Diagramm analog zur Innendruckfestigkeit. Ein statistischer Vergleich der Mittelwerte der Klassen (2) bis (6) ergab für $\alpha = 0,05$ keinen signifikanten Unterschied der Mittelwerte.

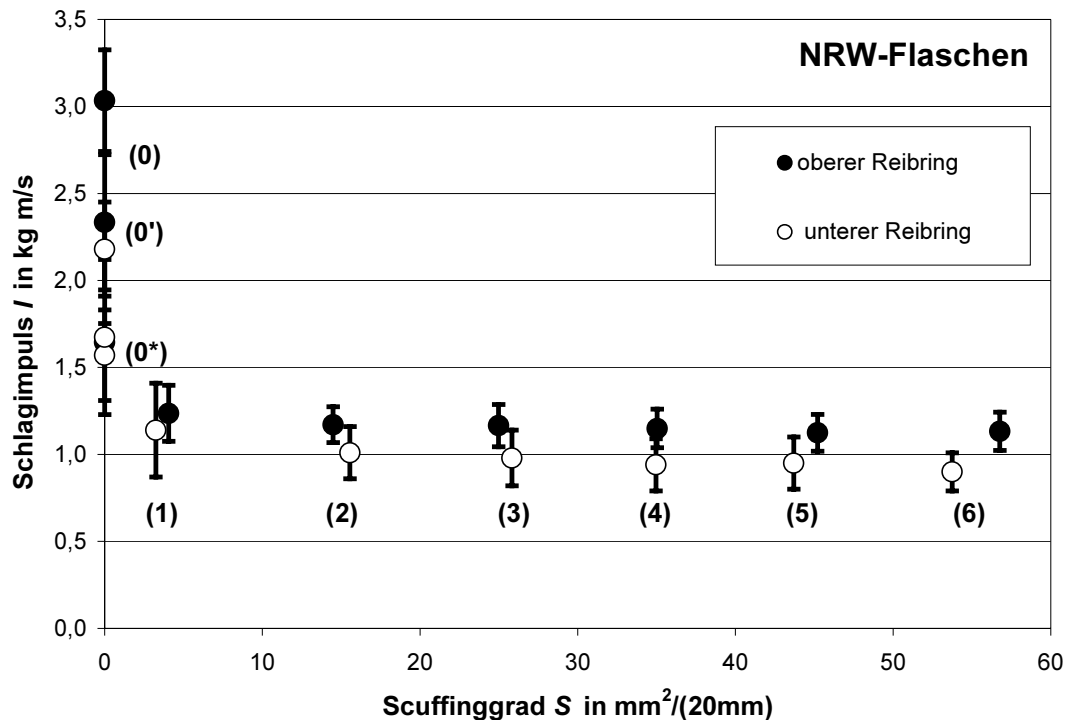


Bild 5.3. Zusammenhang zwischen Scuffinggrad und Schlagfestigkeit bei NRW-Flaschen

Die Schlagfestigkeit der Flaschen am unteren Reibring ist kleiner als am oberen Reibring, da im Übergangsbereich von der Zarge zum Boden kein elastisches Ausweichen möglich ist. Eine weitere Ursache sind auch herstellungsbedingte Restspannungen in der Flaschenwand.

Nach Gleichung 2.12 in Kapitel 2 wird der beim Stoß zweier Einzelflaschen übertragene Impuls I aus dem Produkt der Flaschenmasse und der Differenzgeschwindigkeit der Flaschen berechnet. Die Tabellen 5.5 und 5.6 zeigen die, aus den mittleren Schlagimpulsen \bar{I} berechneten, maximalen Differenzgeschwindigkeiten für volle und leere NRW- und 0,7-l-GDB-Flaschen. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich beim Schlag der Impuls auf zwei Schlagpunkte (oberer und unterer Reibring) verteilt.

Normalerweise sollten zwischen zwei parallelen Flaschenförderketten, um das Umfallen von Flaschen beim Überschub zu verhindern, Differenzgeschwindigkeiten $\Delta v > 0,3$ m/s vermieden werden. In der Praxis werden jedoch häufig Differenzgeschwindigkeiten bis zu $\Delta v = 0,5$ m/s angetroffen, speziell an Auseinanderführungen und Zusammenführungen von Flaschen. Bei einer Ausbringung heute üblicher Abfüllanlagen von 60.000 FI/h treten in der Einzelflaschenführung Förderbandgeschwindigkeiten bis $v_B = 1,1$ m/s (NRW-Flaschen) bzw. $v_B = 1,3$ m/s (0,7-l-GDB-Flaschen) auf. So kann durchaus eine höhere Differenzgeschwindigkeit zwischen einer Einzelflasche und einem stehenden oder mit Schlupf geförderten Flaschenpulk auftreten.

Tabelle 5.5. Berechnete Differenzgeschwindigkeit die für 0,5-l-NRW-Flaschen zum Bruch der Flaschen führt ($m_{Fl, voll} = 0,89$ kg; $m_{Fl, leer} = 0,39$ kg).

Schlagpunkt	oberer Reibring		unterer Reibring	
	hüttenneu (0)	gebraucht (3)	hüttenneu (0)	gebraucht (3)
\bar{I} in kg m/s	3,0	1,2	2,2	0,9
Δv_{voll} in m/s	6,7	2,7	4,9	2,0
Δv_{leer} in m/s	15,4	6,2	11,2	4,6

Tabelle 5.6. Berechnete Differenzgeschwindigkeit die für 0,7-l-GDB-Flaschen zum Bruch der Flaschen führt; ($m_{Fl, voll} = 1,285$ kg; $m_{Fl, leer} = 0,585$ kg)

Schlagpunkt	oberer Reibring		unterer Reibring	
	hüttenneu (0)	gebraucht (3)	hüttenneu (0)	gebraucht (3)
\bar{I} in kg m/s	2,6	1,4	1,7	1,0
Δv_{voll} in m/s	4,0	2,1	2,6	1,6
Δv_{leer} in m/s	8,9	4,8	5,8	3,4

Aus den in den Tabellen 5.5 und 5.6 für die zwei Flaschentypen berechneten, nicht zu überschreitenden Differenzgeschwindigkeiten geht hervor, dass in aller Regel nur bereits gebrauchte Flaschen beim Zusammenstoßen auf den Flaschenförderketten bruchgefährdet sind. Jedoch können die Flaschen durch einen Zusammenstoß beschädigt werden (Mikrorisse). Die GDB-Flaschen können bereits bei kleineren Differenzgeschwindigkeiten zu Bruch gehen, da im Vergleich zu den NRW-Flaschen ihre Schlagfestigkeit kleiner, das Flaschengewicht und der Flaschendurchmesser größer sind.

5.1.4 Einfluss mechanischer und chemischer Beanspruchung auf die Festigkeit

Die Versuchsreihe der Klasse (0⁺) sollte klären, ob die Abnahme der Festigkeit von hüttenneuen Flaschen (0) im Vergleich zu den einmal im normalen Betrieb durch die Flaschenreinigungsmaschine gefahrenen Flaschen (0*) ein rein chemisches (Glaskorrosion) oder mechanisch bewirktes Phänomen ist. Für die Klasse (0⁺) wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die Versuchsflaschen wurden vorsichtig von Hand in die Kabinette einer Flaschenreinigungsmaschine eingeschoben und nach der Abgabe der Flaschen von Hand in Kästen eingestellt. So wurde der Kontakt der Flaschen untereinander minimiert. Die Verweildauer im Laugenbad der Flaschenreinigungsmaschine betrug 18 bzw. 960 min.

Die Ergebnisse für die Schlagfestigkeit dieser Versuchsreihen unterschieden sich weder am unteren, noch am oberen Reibringbereich signifikant voneinander (für $\alpha = 0,05$). Auch die in den Bildern 5.4.1 und 5.4.2 dargestellten Summenhäufigkeitskurven weichen kaum voneinander ab, so dass ein Einfluss der Verweilzeit auf die Abnahme der Festigkeit ausgeschlossen werden kann. Die Flaschen (0⁺) weisen jedoch im Vergleich zu den hüttenneuen Flaschen (0) kleinere Schlagfestigkeiten auf.

Der parallele Verlauf im oberen Teil der Summenhäufigkeitskurven mit dem der hüttenneuen Flaschen in Bild 5.4 in Verbindung mit den auffällig hohen Standardabweichungen dieser Versuche im Vergleich zu allen anderen Messungen legt nahe, dass die herabgesetzte Festigkeit durch eine mechanische Beanspruchung einzelner Flaschen hervorgerufen wurde. So erlitten offensichtlich trotz einer ausgesprochen schonenden Behandlung der Flaschen bei

den Versuchen manche Flaschen bereits erste Oberflächenbeschädigungen, die die Festigkeit herabsetzten. Das Flaschenmaterial der Klasse (0') dieser beiden Versuche kann als eine Mischung hüttenneuer und mechanisch beschädigter Flaschen angesehen werden. Durch die Korrosion der Glasoberfläche wird die Festigkeit also nicht herabgesetzt. Auch wurde im theoretischen Teil der Arbeit eher eine Erhöhung der Festigkeit durch die ungezielte Korrosion an der Oberfläche, durch das Aufweiten von bereits in der Glasoberfläche vorhandener Risse, beschrieben. Da sich die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen (0') unterschiedlicher Verweilzeiten nicht unterschieden, konnte ein solcher festigkeitserhöhender Effekt nicht nachgewiesen werden. Analoge Kurvenverläufe konnten auch bei der Innendruckfestigkeit erhalten werden.

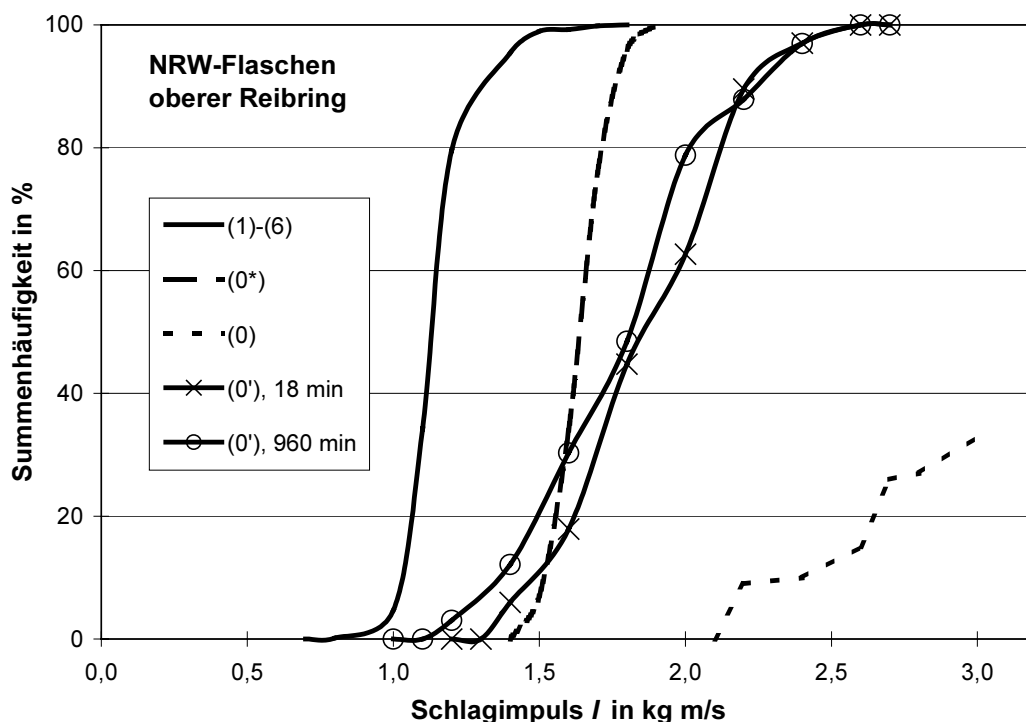


Bild 5.4.1. Summenhäufigkeitsverteilungen der Schlagfestigkeit von neuen, einmal gereinigten, chemisch beanspruchten und gebrauchten NRW-Flaschen am oberen Reibring

Die Summenhäufigkeitsverteilung für die hüttenneuen Flaschen (0) bricht bei einem maximalen Schlagimpuls von 3,03 kg m/s ab (Bild 5.4.1). Dieser Impuls entsprach einer Auslenkung des Schlagpendels von 180° und somit dem maximal übertragbaren Impuls des verwendeten Schlagpendelmessgerätes. Bei den hüttenneuen Flaschen besaßen 67 % der Flaschen eine höhere Schlagfestigkeit.

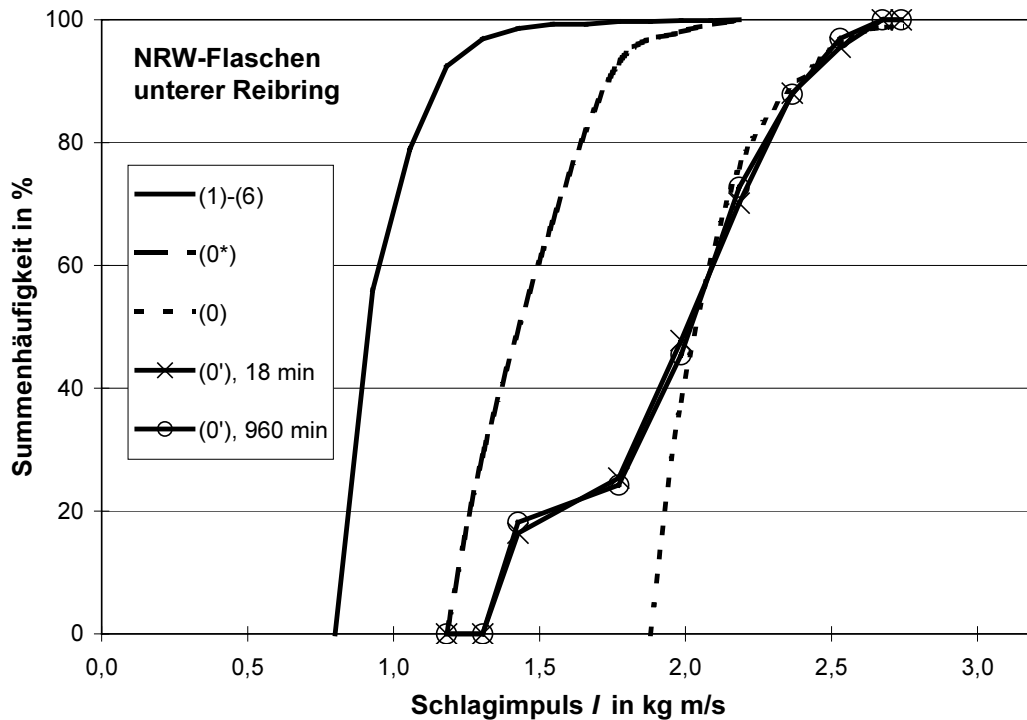


Bild 5.4.2. Summenhäufigkeitsverteilungen der Schlagfestigkeit von neuen, einmal gereinigten, chemisch beanspruchten und gebrauchten NRW-Flaschen am unteren Reibring

5.1.5 Zusammenfassung Festigkeitsverhalten

Diese Messungen zum Festigkeitsverhalten der Glasflaschen mit einer Differenzierung von Flaschen in unterschiedliche Scuffingklassen zeigen im Vergleich zu den in Kapitel 2 aufgeführten früheren Festigkeitsmessungen an Glasflaschen [93, 108, 109] weiterführende Ergebnisse. Übereinstimmend mit den früheren Messungen nimmt die Anfangsfestigkeit hüttenneuer Flaschen gegenüber gebrauchten Flaschen sehr stark ab. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass bereits nach wenigen Umläufen ein Grenzwert für die Festigkeit erreicht wird, der jeweils noch etwa ein Drittel der Ausgangsfestigkeit hüttenneuer Flaschen bei der Innendruckfestigkeit und der Schlagfestigkeit am oberen Reibring beträgt. Für die Innendruckfestigkeit erfüllt der erreichte Grenzwert die untere Toleranzgrenze der STLB für gebrauchte Flaschen. Die Schlagfestigkeit gebrauchter Flaschen kann durch eine Schlagbeanspruchung der Flaschen in einer Flaschenabfüllanlagen allenfalls beim Fördern voller Flaschen bei besonders hohen Fördergeschwindigkeiten am unteren Reibring überschritten werden.

Aus den Messungen zum Festigkeitsverhalten kann zwar eine statistische Aussage über die erwarteten Mittelwerte der Festigkeiten der einzelnen Klassen, jedoch nur eine unsichere Festigkeitsvorhersage einer einzelnen Flasche gemacht werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass Messungen an unterschiedlichen Flaschentypen jeweils zu ähnlichen Ergebnissen bei der Innendruck- und Schlagfestigkeit führen.

5.2 REM-Aufnahmen unterschiedlich beanspruchter Glasoberflächen

Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) der äußeren Glasoberfläche von hüttenneuen, gebrauchten, ausschließlich chemisch oder mechanisch beanspruchter Flaschen zeigen deutliche Unterschiede. Der jeweilige Vergrößerungsmaßstab ist in jedem Bild angegeben. Auf der linken Seite in Bild 5.5 ist ein Staubpartikel zu sehen, das mit aufgenommen wurde, um sicherzustellen, dass die Oberfläche scharf abgebildet wird.



Bild 5.5.

Unzerkratzte Glasoberfläche einer hüttenneuen Flasche mit Staubpartikel

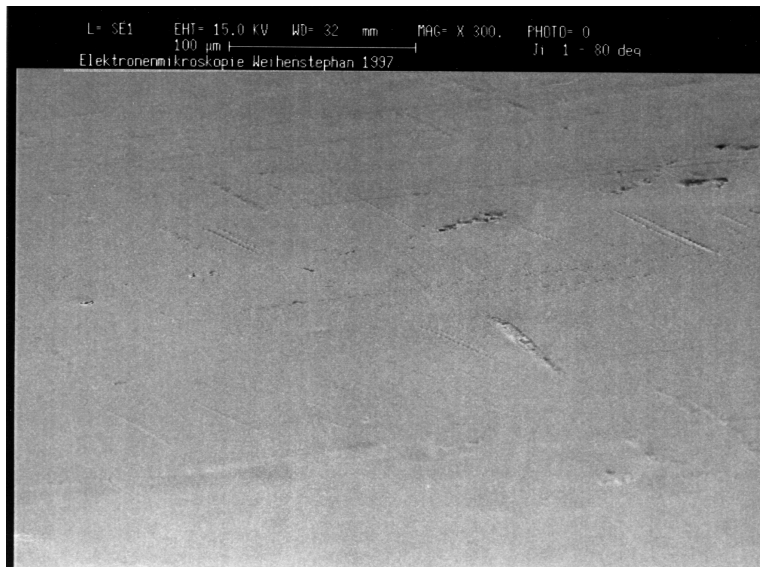


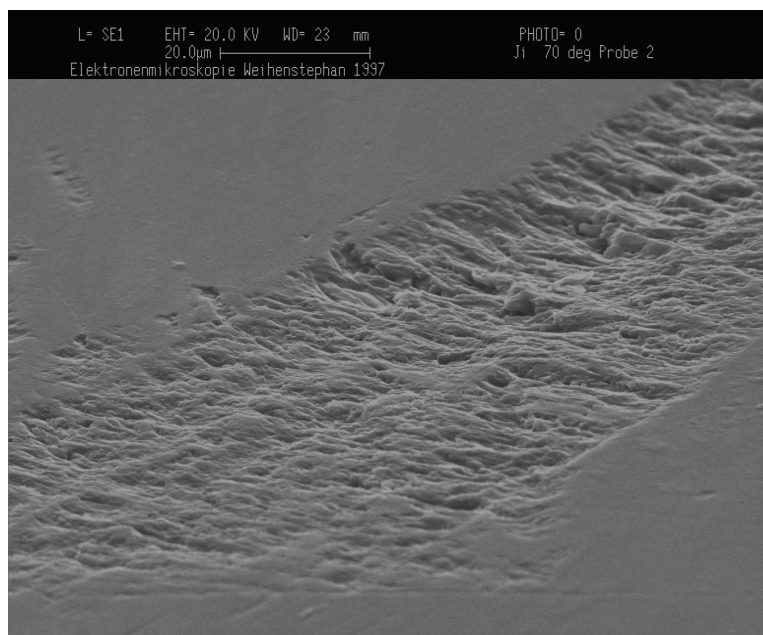
Bild 5.6.

Visuell unzerkratzter Bereich der Glasoberfläche einer bereits gebrauchten Flasche

Für die REM-Aufnahmen der Bilder 5.6 bis 5.11 wurden Flaschen aus dem Rücklaufleergut eines Abfüllbetriebs mit bereits erkennbarem Scuffing im Reibringbereich verwendet. In Bild 5.6 wurde ein Probenstück einer visuell noch unzerkratzt erscheinenden Oberfläche aufgenommen. Die REM-Aufnahme zeigt bereits in diesem Bereich deutliche Gebrauchsspuren. Für Bild 5.7 wurde ein Probenstück mit einzelnen, visuell sichtbaren Kratzern ausgewählt. Bild 5.8 zeigt eine weitere Vergrößerung des gleichen Bildausschnitts. Hier können die Gebrauchsspuren als Vertiefungen in der Oberfläche noch deutlicher ausgemacht werden.

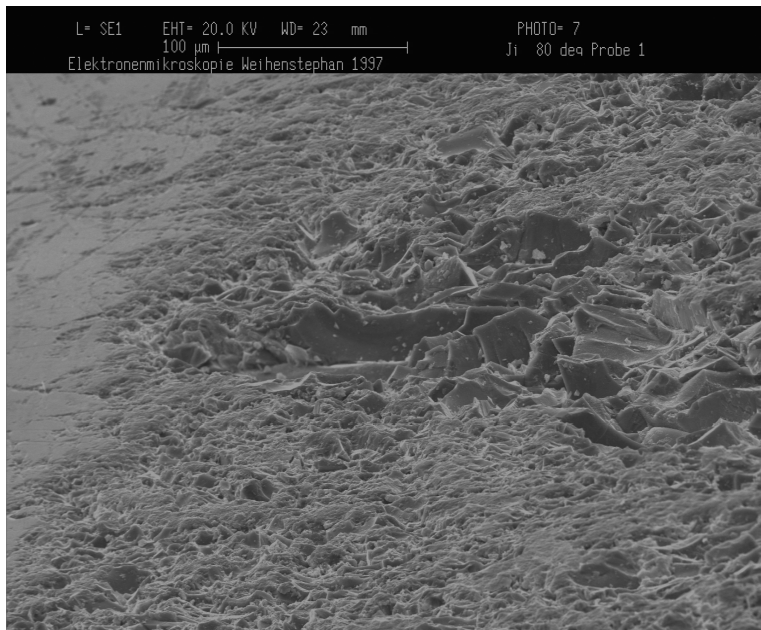
**Bild 5.7.**

Einzelne, visuell sichtbare Kratzer auf sonst unverletzter Glasoberfläche

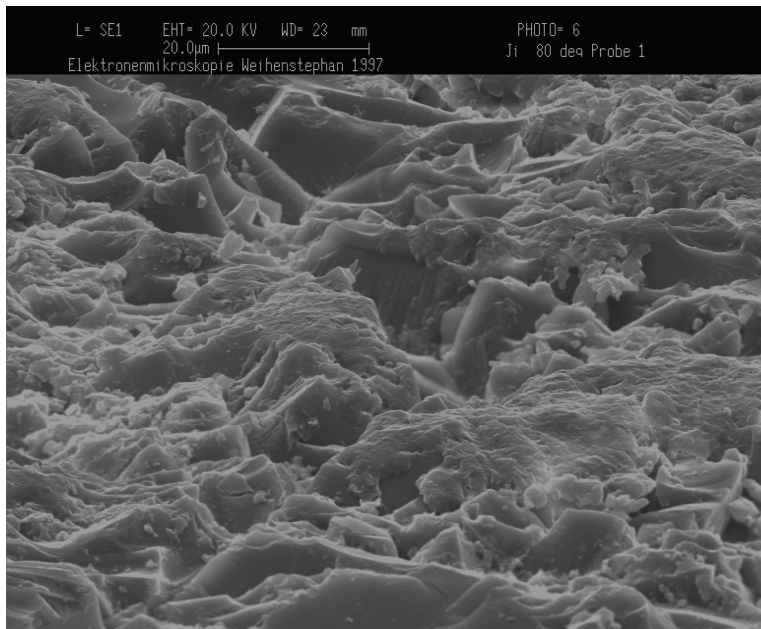
**Bild 5.8.**

Einzelne Kratzer auf sonst unverletzter Glasoberfläche Glasoberfläche, weitere Vergrößerung von Bild 5.7

Bild 5.9 zeigt einen Ausschnitt der Oberfläche im Reibringbereich einer Flasche mit visuell erkennbarem Scuffing (Reibringhöhe 2 mm). Bild 5.10 stellt eine weitere Vergrößerung des gleichen Bildausschnitts dar, hier ist die Zerklüftung der Glasoberfläche und der Materialabtrag besonders gut sichtbar. Die Kratzspuren von ausschließlich mechanisch beanspruchten und „normal“ gebrauchten Flaschen unterscheiden sich im elektronenmikroskopischen Bild nicht. Die Vergrößerung reicht aus, um auch die noch nicht aufgeweitete Kratzer sichtbar zu machen. Eine genaues Vermessen der Kratzerbreite war mit dem verwendeten Elektronenmikroskop nicht möglich.

**Bild 5.9.**

Visuell stark zerkratzte Glasoberfläche am Rand eines Reibrings (2 mm Breite)

**Bild 5.10.**

Zerkratzung innerhalb eines Reibrings, weitere Vergrößerung von Bild 5.9

Die folgenden Bilder 5.11 bis 5.14 zeigen Ausschnitte ausschließlich chemisch beanspruchter Flaschen. Die Probe für Bild 5.11 wurde 25 Reinigungszyklen in der Flaschenreinigungsmaschine unterzogen, was in etwa einer Verweildauer in der Reinigungslauge von sechs Stunden entspricht. Bild 5.12 zeigt eine Ausschnittvergrößerung von Bild 5.11. In beiden Aufnahmen sind keine Veränderungen der Oberfläche wie beispielsweise Materialabtrag erkennbar. Aus der Schattenbildung der Spuren auf der Glasoberfläche kann auf Erhöhungen geschlossen werden, es könnte sich dabei um Ablagerungen aus der Lauge handeln. ASSELMAYER und BARTSCHERER [1] kommen in ihren elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Innenwände von Flaschen ebenfalls zu diesem Ergebnis.

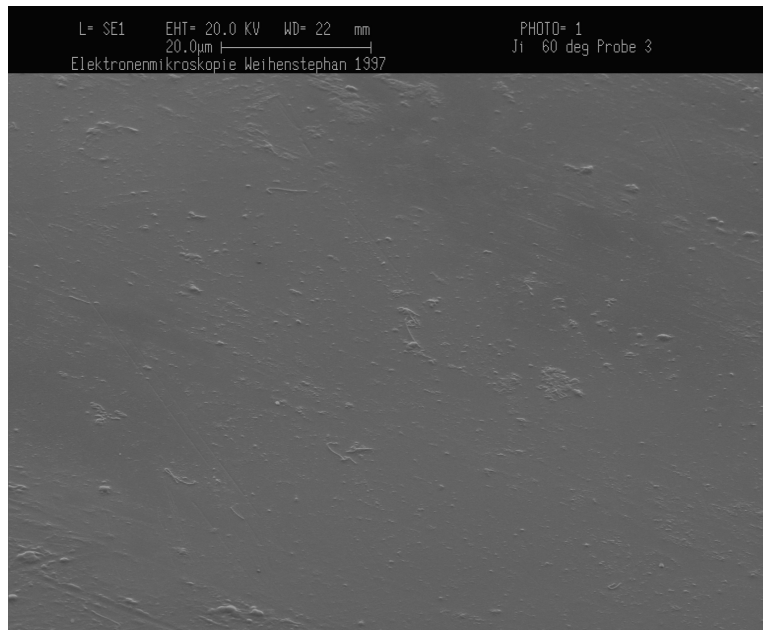


Bild 5.11.

Ausschließlich chemisch beanspruchte Glasoberfläche mit Ablagerungen der Reinigungslauge

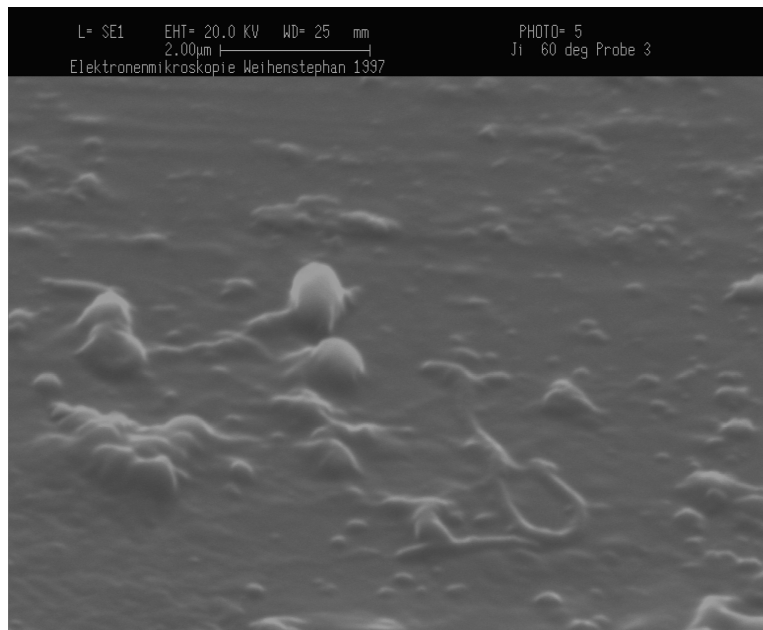
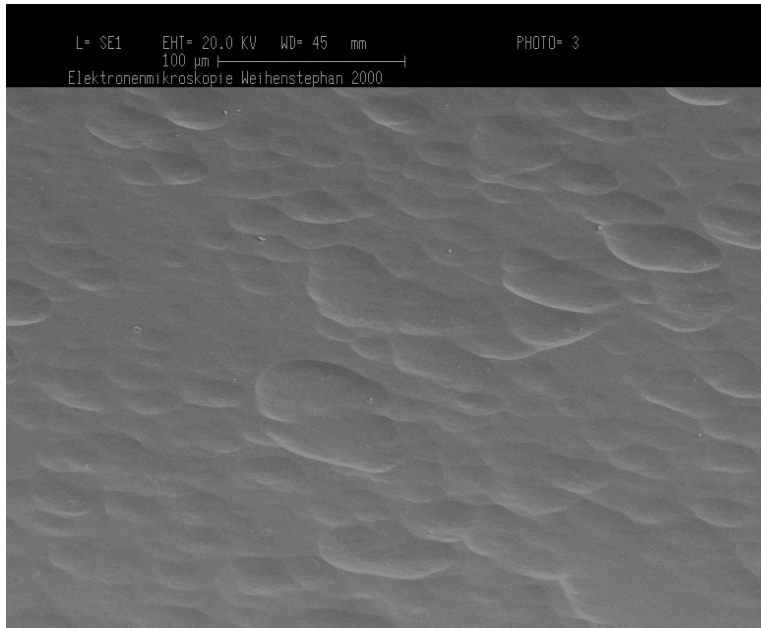


Bild 5.12.

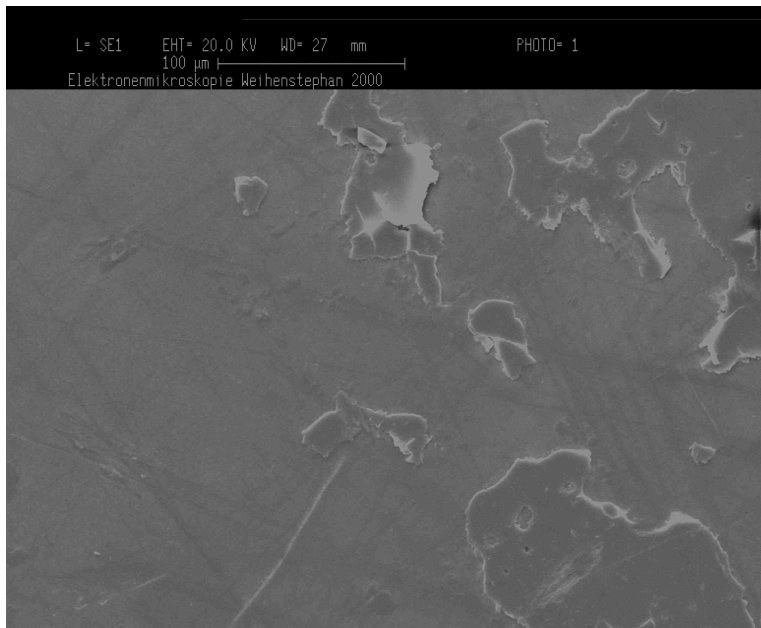
Chemisch beanspruchte Glasoberfläche, weitere Vergrößerung von Bild 5.11

Nach längeren Verweilzeiten der Glasproben in Reinigungslauge und destilliertem Wasser können in REM-Aufnahmen Oberflächenveränderungen sichtbar gemacht werden. Bild 5.13 zeigt die Glasoberfläche einer für die Dauer von 14 Tagen in Reinigungslösung (2 %ige NaOH bei 80 °C) getauchten Flasche. Deutlich können hier dellenförmige Täler erkannt werden, d.h. die Rauigkeit der Glasoberfläche hat sich erhöht.

Bild 5.14 zeigt die REM-Aufnahme einer Glasprobe, die für 14 Tage bei 80 °C in destilliertem Wasser bei pH 7 gelagert wurde. Auch hier zeigen sich deutliche Veränderungen an der Oberfläche. Die Kaltendvergütung hat sich großflächig abgelöst, nur noch einzelne Bruchstücke haften an der Glasoberfläche.

**Bild 5.13.**

Ausschließlich chemisch beanspruchte Glasoberfläche (14 Tage, 80°C, 2 %ige NaOH)

**Bild 5.14.**

Ausschließlich chemisch beanspruchte Glasoberfläche (14 Tage, 80°C, destilliertes Wasser)

6 Zusammenfassung

Unter Scuffing werden im trockenen Zustand meist weiß erscheinende Gebrauchsspuren an Mehrwegflaschen verstanden. Scuffing tritt nach je nach Beanspruchung der Flaschen im Kreislauf nach mehr oder weniger zahlreichen Umläufen an jeder Mehrwegflasche auf. Der Begriff Scuffing stammt vom englischen Verb to scuff, das mit schleifen oder auch in weitestem Sinne verschleifen übersetzt werden kann. Da sich die Mechanismen bei der Entstehung sowie die Auswirkungen des Scuffings auf die Glas- und Kunststoffflaschen erheblich unterscheiden wurde diese Arbeit auf die Glasflaschen begrenzt.

In dieser Arbeit sollten zum einen die Ursachen für die Entstehung des Scuffings in den Flaschenabfüllanlagen untersucht werden. Hierzu wurden zahlreiche Versuche im Labor- und Technikumsmaßstab sowie in Abfüllbetrieben mit unterschiedlicher Fragestellung zur Entstehung von Scuffing durchgeführt. Dabei konnte deutlich nachgewiesen werden, dass Scuffing aus einer Kombination mechanischer und chemischer Beanspruchung entsteht. Die mechanische Beanspruchung führt zu Oberflächenverletzungen im Flaschenglas, die chemische Beanspruchung zu Glaskorrosion.

Zum anderen sollte diese Arbeit zeigen, ob das Scuffing an den Glasflaschen nur eine Frage des Erscheinungsbildes und des Marketings darstellt. Deshalb wurden Untersuchungen zu den Auswirkungen des Scuffings auf die Qualitätseigenschaften von Glasflaschen durchgeführt. Hierbei stand vor allem die Festigkeit der Flaschen, auch in Hinblick auf die deutsche Rechtsprechung (Produkthaftungsgesetz), im Vordergrund. Die Gefahren und Folgen einer möglichen Festigkeitseinbuße durch das Scuffing für den Abfüllbetrieb sowie die Verbraucher sollten abgeschätzt werden.

Mechanisch beansprucht werden die Glasflaschen beim Verarbeiten in Flaschenabfüllanlagen vor allem in tribologischen Systemen mit verschiedenen Reibpartnern. In Kratzversuchen im Labor- und Technikumsmaßstab wurde die zerkratzungsfördernde Wirkung verschiedener Umgebungsbedingungen untersucht. Daraus geht hervor, dass Wasser, und vor allem Schmutzwasser, auf der Glasoberfläche die Bildung von Oberflächenzerkratzen beim Kontakt von Glas auf Glas begünstigt. Bei nasser Oberfläche war im Vergleich zum trockenen Zustand nur eine sehr viel kleinere Anpresskraft notwendig, um Oberflächenzerkratzen hervorzurufen. Eine zerkratzungsfördernde Wirkung von nassen Oberflächen beim Glas/Glas-Kontakt hat sich auch in Versuchen zum Bestimmen der Haft- und Gleitreibungskoeffizienten zwischen Glasflaschen bestätigt. Hier konnte eine Verdopplung des Haftreibungskoeffizienten bei nassen gegenüber trockenen Flaschen gemessen werden. Auch der Gleitreibungskoeffizient nasser Glasoberflächen liegt deutlich über dem trockener Oberflächen. In Abfüllanlagen sollten Flaschen deshalb bevorzugt in trockenem und sauberem Zustand gefördert werden, um unnötige mechanische Belastungen zu vermeiden.

Da es sich bei Glas um einen sehr harten Werkstoff handelt, konnte in Kratz- und Reibversuchen mit anderen Werkstoffen (verschiedene Kunststoffe) im Vergleich zu Glas keine erhöhte Zerkratzungsgefahr festgestellt werden. Eine Ausnahme bildet hierbei Edelstahl, wie

er beispielsweise für Geländerführungen eingesetzt wird. So sollten für Geländerführungen und auch für Bauteile von Einzelaggregaten Kunststoffe gegenüber Edelstahl bevorzugt werden. Um jedoch nicht den gegenteiligen Effekt zu erreichen, ist Vorsicht geboten und durch regelmäßige Kontrolle und rechtzeitiges Austauschen verschlissener Bauteile ein Einlagern von Schmutz und vor allem Glasscherben in Kunststoffteile zu vermeiden.

Zum Quantifizieren der mechanischen Beanspruchung von Glasflaschen in Einzelaggregaten und in verschiedenen Förderabschnitten von Abfüllanlagen wurden spezielle Dummy-Flaschen entwickelt. Im Gegensatz zu Glasflaschen, die erst nach sehr vielen Umläufen sichtbare Kratzspuren aufweisen, genügt bei den Dummy-Flaschen ein einmaliger Durchlauf durch ein Teilstück der Abfüllanlage. Zur Herstellung der Dummy-Flaschen wurden hüttenneue Glasflaschen der betrachteten Flaschentype mit einer geschäumten PS-Folie ummantelt. Beschädigungen und Druckstellen an der PS-Folie erlauben bereits nach einem Durchlauf der Flasche einen Rückschluss auf die mechanische Belastung. Die Dummy-Flaschen wurden auf den Flaschenförderketten ausschließlich in den Reibringbereichen beschädigt. So konnten die entstandenen Beschädigungen an den Reibringbereichen anhand von sechs Beschädigungsklassen quantifiziert werden. Mit Hilfe der Dummy-Flaschen konnten so Förderabschnitte mit besonders starken mechanischen Beanspruchungen, beispielsweise aufgrund von hohen Staudrücken, erkannt werden. Aus umfangreichen Versuchen in verschiedenen Abfüllanlagen geht hervor, dass die Flaschen vor allem im Förderabschnitt zwischen Füll-/Verschließmaschine und Ausstattungsmaschine im Vergleich zu allen anderen Abschnitten im Mittel am stärksten beansprucht werden. Hier werden volle Flaschen meist mit nasser Oberfläche gefördert. Außerdem zeigte sich beim Vergleich der Abfüllanlagen deutlich, dass eine gut abgestimmte Regelung der Flaschenförderer bzw. der Einsatz übergeordneter Regelsysteme die Flaschenbeanspruchung reduziert. Erst in zweiter Linie ist die Anzahl der Stauzonen für die Schädigung der Flasche auf den Flaschenförderern verantwortlich. Denn die Belastungen bzw. der Staudruck in den Stauzonen können durch eine entsprechende Regelung der Flaschenförderer minimiert werden.

Beim Vergleich der Zerkratzen am oberen und unteren Reibring fällt auf, dass diese, abhängig von der Reibringgeometrie eines Flaschentyps, unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Bei den NRW-Flaschen ist die Zerkratzung am unteren Reibring stärker ausgeprägt. Hier ist der Radius am unteren Reibringbereich kleiner und somit der Flächendruck größer, so dass früher Zerkratzen entstehen.

Durch maschinelles Reinigen der Flaschen in den Flaschenabfüllanlagen wird die Glasoberfläche chemisch angegriffen. Eine bereits in Reinigungslauge korrodierte Glasoberfläche ist sehr viel empfindlicher für den mechanischen Angriff. Als Hauptursachen der chemischen Beanspruchung in den Flaschenreinigungsmaschinen können die NaOH-Konzentration, die Temperatur sowie die Verweilzeit in der Weichlauge verantwortlich gemacht werden. Besonders glasschonende Bedingungen sind durch ein Minimieren aller drei Größen zu erreichen. In der Praxis wurden nur wenige Abfüllanlagen angetroffen, die besonders glasschonende Reinigungsbedingungen aufwiesen. Meist wurde zumindest einer der in der Literatur empfohlenen Reinigungsparameter, wie Laugentemperatur $<83\text{ °C}$ oder Laugen-

konzentration $<1,8\%$, überschritten. Auf diesem Gebiet sind weitere Arbeiten notwendig, um spezifische Richtwerte für korrosionsfördernde Inhaltsstoffe wie Phosphate, Carbonate und Komplexbildner auszuarbeiten.

Um das Scuffing an den Glasflaschen messtechnisch zu erfassen, wurden in Zusammenarbeit mit den Firmen Heuft Systemtechnik, Burgbrohl, und Krones, Neutraubling, transportable Messeinrichtungen auf der Basis von CCD-Kameras im Durchlicht entwickelt. Mit diesen konnte das Scuffing sowohl online als auch in Einzelmessungen quantifiziert werden. Im Vergleich zum zeitaufwändigen, manuellen Bestimmen der Reibringhöhe werden die Ergebnisse so in kurzer Zeit gewonnen. Durch ein Standardisieren des Scuffinggrades oder den Einsatz von Referenzflaschen definierter Reibringhöhe sind die Ergebnisse miteinander vergleichbar. Vor allem bei online-Messungen können mit den Kamerasystemen durch die Aufnahme enorm großer Stichproben statistisch aussagekräftige Ergebnisse gewonnen werden.

Aus den Festigkeitsmessungen geht hervor, dass die Anfangsfestigkeit hüttenneuer Flaschen gegenüber gebrauchter Flaschen sehr stark abnimmt. Bereits nach wenigen Umläufen wird ein Grenzwert für die Festigkeit erreicht, der jeweils noch etwa ein Drittel der Ausgangsfestigkeit hüttenneuer Flaschen bei der Innendruckfestigkeit und der Schlagfestigkeit beträgt. Für die Innendruckfestigkeit erfüllt der erreichte Grenzwert die untere Toleranzgrenze der STL B für gebrauchte Flaschen. Die Schlagfestigkeit gebrauchter Flaschen kann allenfalls durch eine Schlagbeanspruchung der Flaschen beim Fördern voller Flaschen bei besonders hohen Fördergeschwindigkeiten und nur am unteren Reibring überschritten werden. Die Schlagfestigkeit am unteren Reibring ist aufgrund der Nähe zum Flaschenboden und der dadurch kleineren Elastizität der Flaschenwand grundsätzlich um einen Faktor von etwa 0,8 kleiner als am oberen.

Aus den Messungen zum Festigkeitsverhalten kann zwar eine statistische Aussage über die erwarteten Mittelwerte der Festigkeiten der einzelnen Klassen, jedoch nur eine unsichere Festigkeitsvorhersage einer einzelnen Flasche gemacht werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass Messungen an unterschiedlichen Flaschentypen jeweils zu ähnlichen Ergebnissen bei der Innendruck- und Schlagfestigkeit führen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass auf ein Aussortieren besonders stark zerkratzter Glasflaschen aus Festigkeitsgründen verzichtet werden kann. Daher wird das Scuffing zu einem ausschließlichen Aspekt der Ästhetik der Flaschen und des Marketings. Glasflaschen im Mehrwegsystem werden auch in Zukunft in der Getränkeindustrie eine wichtige Rolle spielen. So ist das Vermeiden von Scuffing an Mehrwegflaschen ein Problem, das auch weiterhin interessant bleiben wird. Vor allem die hier erarbeitete Methode zum Aufzuspüren von Schwachstellen in einer Abfüllanlage und die Richtlinien zum Minimieren der Zerkratzen werden für die Optimierung und die Neuplanung von Abfüllanlagen nützliche Werkzeuge darstellen.

Ein Vergleich von online-Messungen zur Flaschenpool-Bestandsaufnahme in mehreren Abfüllbetrieben innerhalb der letzten Jahre zeigte am Beispiel der NRW-Flasche, die seit zehn Jahren als Verbandsflasche von Brauereien eingesetzt wird, dass die Zerkratzung der Flaschen stark zugenommen hat und noch weiter zunehmen wird. Im Mittel betrug der aktuelle Anteil im Jahr 1999 an Flaschen einer Reibringhöhe größer 2 mm am oberen Reibring bereits 30 %. Um den Flaschenpoolzustand zu erhalten oder gar zu verbessern müssen von den Nutzern der Verbandsflaschen geeignete Maßnahmen zum Minimieren des Scuffings bzw. der mechanischen und chemischen Beanspruchung der Glasflaschen ergriffen werden. Aus den Messungen der Eigenflaschenanteile im Rücklaufleergut von Brauereien wird deutlich, dass die Flaschenqualität für Poolflaschen nur dann erhalten bzw. verbessert werden kann, wenn möglichst alle Abfüllbetriebe an der Vermeidung von Scuffing im eigenen Abfüllbetrieb mitwirken.

7 Literatur

- [1] ASSELMAYER, F.; BARTSCHERER, H.-CH.: Elektronenmikroskopische Untersuchungen an Innenwänden von Glasflaschen. *Brauwissenschaft* 23 (1970), Nr. 2, S. 41-47
- [2] ASTM C-147-91: Standard Methods of Internal Pressure Test on Glass Containers
- [3] AUGUSTSSON, B. O.; WASYLYK, J. S.; SOUTHWICK, R. D.: Computer modelled internal Pressure Strength Predictions for refillable Glass Container. *Glastechnische Berichte* 59 (1986), Nr. 5, S. 121-131
- [4] AUGUSTSSON, B. O.: Changes in Surface Structure of Glass from sliding Contact. *Glasteknisk Tidskrift* 36 (1981), Nr. 2/3, S. 23-29
- [5] AUTORENTEAM BIEBELRIEDER KREIS: Handbuch für die Reinigung von Mehrweg-Glasflaschen. Berlin: VLB Berlin, 1997
- [6] BABER, J.; RAETHER, F.: Production of Oxide Coating on Glass by Laser Sintering. *Glastechnische Berichte* 73 (2000), Nr. 7, S. 211-214
- [7] BAKER, T. C.; PRESTON, F. W.: Fatigue of Glass under Static Loads. *Journal of Applied Physics* 17 (1946), Nr. 3, S. 170-178
- [8] BOSCH, H.; TESSIN, N.: Der Pool der 0,5-l-Verbandflasche der deutschen Brauwirtschaft. Entwicklung und Qualitätssicherung. *Brauwelt* 134 (1994), Nr. 30/31, S.1470-1478
- [9] BRAUNE, R.: Nachvergütung in der Abfüllanlage, *Brauwelt* 123 (1983), Nr. 20, S. 833-838
- [10] BRÜCKNER, R.: Mechanical Properties of Glasses. In: Cahn, R. u. a. (Hrsg.): *Materials Science and Technology*, Band 9, Zarzycki, J. (Hrsg.): *Glasses and Amorphous Materials*, Weinheim: VCH, 1991, S. 665-713
- [11] BUCKWALTER, C. Q.; PEDERSON, L. R.; MCVAY, G. L.: The Effects of Surface Area to Solution Volume Ratio and Surface Roughness on Glass Leaching. *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 49 (1982), S. 397-412
- [12] BUDD, S. M.; CORNELIUS, W. P.: Impact Studies on Glass Containers. *Glass Technology* 17 (1976), Nr. 2, S. 54-59
- [13] BUNKER, B. C.; ARNOLD, G. W.; BEAUCHAMP, E. K.; DAY, D. E.: Mechanisms for Alkali Leaching in Mixed-Na-K Silicate Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 58 (1983), S. 295-322
- [14] BUNDESVERBAND GLAS- UND MINERALFASERINDUSTRIE: Behälterglas: <http://www.bvglas.de>, 1999. Firmenschrift
- [15] CLARK, D. E.; ZOITOS, B. K.: Corrosion Testing and Characterization. In: Clark, D. E.: *Corrosion of Glass, Ceramics and Ceramic Superconductors*, Park Ridge: Noyes, 1992, S. 51-103
- [16] DAS, C. R.: Diffusion-controlled Attack of Glass Surfaces by aqueous Solutions. *Journal of the American Ceramic Society* 63 (1980), Nr. 4, S. 160-165
- [17] DIN ISO 7458, Entwurf 05.92: Behältnisse aus Glas; Innendruckfestigkeit; Prüfverfahren, identisch mit DIN ISO 7458, 1984
- [18] DIN 6094, 11.69, 01.83: Packmittel. Mundstücke. Teil 1: Kronenkorkmundstück, Teil 12 Schraubmundstücke 7,5 R für Flaschen mit Innendruck
- [19] DIN 6198, 07.88: Packmittel. Flaschen. Euroform 2

- [20] DIN 12116, 05.76: Prüfung von Glas. Bestimmung der Säurebeständigkeit (gravimetrisches Verfahren) und Einteilung der Gläser in Säureklassen
- [21] DIN 52295, 04.93: Prüfung von Glas. Pendelschlagversuch an Behältnissen. Attribut- und Variablenprüfung
- [22] DIN 52322, 05.76: Bestimmung der Laugenbeständigkeit und Einteilung der Gläser in Laugenklassen (jetzt DIN ISO 695, 12.89: Glas. Beständigkeit gegen eine siedende wässrige Mischlauge; Prüfverfahren und Klasseneinteilung)
- [23] DIN 52339, 12.80: Autoklavenverfahren zur Prüfung der Wasserbeständigkeit der Innenoberfläche von Behältnissen aus Glas und Klasseneinteilung. Teil 1 Titrimetrische Bestimmung, Teil 2: Flammenphotometrische Bestimmung. (jetzt DIN ISO 4802, 05.82: Glass-Hydrolytic Resistance of the interior Surfaces of Glass Containers- Methods of Test)
- [24] DIN 55405, 02.88: Begriffe für das Verpackungswesen. Teil 1: Systematische Übersichten, alphabetisches Gesamtverzeichnis und Begriffsbereich Verpackungswesen, Teil 2: Packstoff, Teil 3: Packmittel
- [25] DEUTSCHER BRAUER-BUND E.V.: Vereinbarung über die Verwendung der 0,5-l-Verbandsflaschen der deutschen Brauwirtschaft (NRW-Flasche), Januar 1991
- [26] DREWELLO, R.; WEIßMANN, R.: Microbially influenced Corrosion of Glass. Applied Microbiology and Biotechnology 47 (1997), Nr. 4, S. 337-346
- [27] DREWELLO, R.; WEIßMANN, R.: Microbial Deterioration of Glass. Proceedings of the XVIIIth International Congress on Glass (CD-ROM), San Francisco, USA, 1998, Paper Nr. ICG 119-C05-007, 6 S.
- [28] DUBBEL: Taschenbuch für den Maschinenbau, Beitz W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.), 17. Auflage. Berlin: Springer, 1990
- [29] DUFFER, P.: How Glass reacts with Water and causes Surface Corrosion. Glass Industry 76 (1995), Nr. 5, S. 22-24, 27-28
- [30] DUFFY, G. ; LANGFORD, D.: Bottle Appearance Upgrade. In: Proceedings of MBAA Conference, October 1997, in Baltimore, Maryland, USA
- [31] ECKLE, R.: Vermeidung von Scuffing durch chemische Maßnahmen bei der Flaschenreinigung. Brauwelt 137 (1997), Nr. 31/32, S. 1269-1270
- [32] EDINGTON, J. H.: Reducing Surface Damage to Glass Containers. Glass 72 (1995), Nr. 2, S. 69-70
- [33] EL-SHAMY, T. M.; LEWINS, J.; DOUGLAS, R. W.: The dependence on the pH of the Decomposition of Glasses by aqueous Solutions. Glass Technology 13 (1972), Nr. 3, S. 81-87
- [34] ELVERS, B.-; HAWKINS, S., RAVENSCROFT, M., ROUNSAVILLE, J. F., SCHULZ, G.: Glass. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5. Auflage. Weinheim: VCH, 1989, Band A 12, S. 365-432.
- [35] ERSCHFELD, G.; HOFFMANN, F.: Hinweise zur Flaschenreinigung in Fruchtsaftbetrieben. Flüssiges Obst 49 (1982), Nr. 1, S. 20, 22-24
- [36] FACHVEREINIGUNG BEHÄLTERGLASINDUSTRIE E.V., Düsseldorf: Behälterglas. 1999, Informationsschrift
- [37] FALTER, W.: Transportband Hygienesysteme. Brauwelt 129 (1989), Nr. 34, S. 1576-1592

- [38] FRANEK, H.: Reaktionen zwischen Glasoberflächen und wäßrigen Lösungen. Clausthal: Technische Universität Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Dissertation, 1980
- [39] FRISCHAT, G. H.: Glas – Struktur und Eigenschaften. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 47-67
- [40] GABRIEL, G.: Untersuchungen der Einflußgrößen Druck und Stoß auf den Transport und die Speicherung von 0,5-l-Getränkeflaschen aus Glas. Dresden: TU Dresden, Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik, Forschungsbericht Nr. 924, 1986
- [41] GENOSSENSCHAFT DEUTSCHER BRUNNEN (GDB) eG, Bonn: Qualitäts- und Prüfbestimmungen für Brunnen-Einheitsflaschen, Ausgabe Juli 1992
- [42] GENOSSENSCHAFT DEUTSCHER BRUNNEN (GDB) eG, Bonn: Mineralwasser. 1999, Informationsschrift
- [43] GEOTTI-BIANCHINI, F.; VERITÀ, M.; DE RIU, L.; STELLA, A.: Evaluation of Tin Oxide Coatings on Glass Containers using HECM and EPMA. Glass Technology 35 (1994), Nr. 5, S. 216-223
- [44] GLIEMEROTH, G.: Untersuchung zur Wirkung von Schlägen auf Glas mit und ohne Vorspannung. Glastechnische Berichte 47 (1974), Nr. 5, S. 97-106
- [45] GRAMBOW, B.: Ein physikalisch-chemisches Modell für den Mechanismus der Glaskorrosion. Berlin: Freie Universität Berlin, Fachbereich Chemie, Dissertation, 1984
- [46] GRAMBOW, B.: Geochemical Approach to Glass Dissolution. In: Clark, D. E.: Corrosion of Glass, Ceramics and Ceramic Superconductors, Park Ridge: Noyes, 1992, S. 124-153
- [47] GRIFFITH, A. A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Trans. Roy. Soc. A221 (1920), Nr. 163, S. 169-198
- [48] HAUKE, R.; FRISCHAT, G. H.; RUPPERT, K.: Sol-Gel Preparation of Scratch-resistant Al₂O₃ Coatings on Float Glass. Glastechnische Berichte 72 (1999), Nr. 12, S. 386-392
- [49] HENKEL-ECOLAB, Düsseldorf: Korrosionen an Getränkeverpackungen. 1999. Firmenschrift
- [50] HENKEL-ECOLAB, Düsseldorf: persönliche Mitteilung 2000, Dr. Preibsch
- [51] HÖHNE, L.: Modellierung der Rißalterung von Glas zur Festigkeitsvorhersage. Berlin: Technische Universität Berlin, Fachbereich 6 Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften, Dissertation, 1995
- [52] HÜTTE: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Czichos, H. (Hrsg.), 29. Auflage. Berlin: Springer, 1989
- [53] JEBSEN-MARWEDEL, H.; BRÜCKNER, R. (Hrsg.): Glastechnische Fabrikationsfehler. 3. Auflage. Berlin: Springer, 1980
- [54] JIRIKOVSKY, S.: Maschinelle Leerflaschenkontrolle im Hinblick auf HACCP und die neue Lebensmittelhygiene-Verordnung (LMHV). Der Mineralbrunnen 47 (1997), Nr. 12, S. 567-569
- [55] JIRIKOVSKY, S.; WEISSER, H.: Scuffing – Resistance of Glass Bottles to Internal Pressure and Shock Impact. 3rd Nutrition Symposium – European Research towards Safer and Better Food, 18.-20.10.1998, Karlsruhe, S. 426-434
- [56] JIRIKOVSKY, S.; WEISSER, H.: Flaschenpoolpflege in der Brauerei. Brauwelt 140 (2000), Nr. 11, S. 411-415

- [57] JOHN, A.; NAUMANN, F.; PUTH, P.; WIEMER, S.: Scuffing: Aktive Verbesserung des Flaschenbildes. *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 45, S. 2174-2179
- [58] JONES, S. P.: Stress Analysis in Container Design. *Glass* 71 (1994), Nr. 5, S. 221-222
- [59] KAMEDA, M.; TAGUCHI, H.; SAWA, U.; FUKAZAWA, K.: Some Methods for the Suppression of Beer Bottle Scuffing. *Proc. Conv. Inst. Brew* 20 (1988), S. 263-271
- [60] KAMIZONO, H.; CLARK, D. E.; LODDING, A. R.: Accelerated Leach Tests of SRL-165 High-Level Waste Glass in deionized Water. Solution Analyses and Supplemental SIMS Analyses. *Journal of Nuclear Science and Technology* 26 (1989), Nr. 4, S. 441-448
- [61] KERKHOF, F.: Bruchentstehung und Bruchausbreitung im Glas. In: *Jebsen-Marwedel, H.; Brückner, R. (Hrsg.): Glastechnische Fabrikationsfehler, 3. Auflage. Berlin: Springer, 1980, S. 523-587*
- [62] KIEFER, W.: Hochfeste Gläser, ihre Herstellung und Anwendungsmöglichkeiten. In: *Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 175-192*
- [63] KIEFER, W.: Temperaturwechselfeste Gläser. In: *Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 193-204*
- [64] KLUSCHANZOFF, H.: Chemie in der Flaschenreinigung – Tenside. *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 22/23, S. 1003-1004
- [65] KUCHLING, H.: Taschenbuch der Physik. 4. Auflage. Frankfurt: Harri Deutsch, 1982
- [66] LIEBENSPACHER, F.; WEISSER, H.; BUCHNER, N.: Kohlensäurehaltige Getränke in Kombidosen? *Getränketechnik* 4 (1988), Nr. 2, S. 57-62
- [67] LOHMEYER, S.: Reaktionen mechanisch beschädigter und chemisch veränderter Glasoberflächen mit Spüllösungen. In: *Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 135-164*
- [68] MAZER, J. J.; WALTHER, J. V.: Dissolution Kinetics of Silica Glass as a Function of pH between 40 and 85 °C. *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 170 (1994), S. 32-45
- [69] MEBAK (Mittleuropäische Brautechnische Analysenkommission): Methodensammlung der MEBAK, Band V: Gebinde und Produktausstattungsmitel (GuP), Freising, Selbstverlag der MEBAK, im Druck
- [70] MOULD, R. E.: The Strength of Inorganic Glasses. In: *Fundamental Phenomena in the Materials Science. Plenum Press, Vol. 4 (1967), S. 119-149*
- [71] MÜLLER, H.: Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Einzellasten auf Gurtförderern beim Abweisvorgang. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1980
- [72] NAKAGAWA, M.; AMANO, T.; YOKOKURA, S.: Development of lightweight returnable Bottles. *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 218 (1997), S. 100-104
- [73] N. N.: Festakt zum 30. Geburtstag der Perlenflasche. *Der Mineralbrunnen* 49 (1999), Nr. 10, S. 397-408
- [74] OBERLAND GLAS AG, Bad Wurzach: <http://www.oberlandglas.de>. 1999. Firmenschrift
- [75] OBERLAND GLAS AG, Bad Wurzach: persönliche Mitteilung, 2000
- [76] PENZKOFER, J.: Schlagprüfungen von Glasbehältern. *Neue Verpackung* 43 (1990), Nr. 5, S. 214-233

- [77] PETERS, A.: Die chemische Prüfung von Glas. Die Normprüfverfahren – Grundlagen, Verfahren, Entwicklung, Aussage, Relevanz für die Praxis. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 68-88
- [78] PETERS, A.: Gläser für technische Chemie, Pharmazie und Elektrotechnik. Glastypen und Glasarten, Begriff der Glaskorrosion, Mechanismen des Glasangriffs, Messbarkeit des chemischen Angriffs, Beispiele für nicht quantifizierbare Korrosionen. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 89-106
- [79] PETERS, A.: Das chemische Verhalten von Glas und Glasdekoren; Labor- und technische Reinigung, Spülmaschinenreinigung und Ionenlässigkeit. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas II, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 115-130
- [80] PRESTON, F. W.: The Mechanical Properties of Glass. *Journal of Applied Physics* 13 (1942), Nr. 10, S. 623-634
- [81] PRESTON, F. W.: New Type of Pressure-Testing Machine for Bottles. *Glass Industry* 31 (1950), Nr. 9, S. 455-456
- [82] PROBST, R.; GANSER, D.: Scuffing. Beeinflussung des Pflegezustandes des Verbandsflaschenpools in der Abfülllinie. *Brauwelt* 135 (1997), Nr. 51/52, S. 2766-2769
- [83] PROBST, W.; ECK, H.: Studie über die Möglichkeiten der Lärminderung an Flaschenabfüllanlagen. München: Messerschmitt-Bölkow-Blohm, Forschungsbericht Nr. BB-179-74, 1974
- [84] RÄDLER, TH.: Modellierung und Simulation von Abfülllinien. Freising: Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1999
- [85] ROESICKE, J.: Korrosion von Flaschenglas. *Brauwelt* 131 (1991), Nr. 45, S. 2082-2084
- [86] RAMMERT, M.; PAHL, M. H.: Die Löslichkeit von Kohlendioxid in Getränken. *Brauwelt* 131 (1991), Nr. 12, S. 488-499
- [87] RAWSON, H.: Theory of Stress Distribution caused by Side Wall Impact on Glass Containers. *Glastechnische Berichte* 63 (1990), Nr. 2, S. 24-31
- [88] RAWSON, H.: Oxide Glasses. In: Cahn, R. u. a. (Hrsg.): *Materials Science and Technology*, Band 9, Zarzycki, J. (Hrsg.): *Glasses and Amorphous Materials*. Weinheim: VCH, 1991, S. 294-300
- [89] RICHTER, TH.; FRISCHAT, G. H.; BORCHARDT, G.; SCHERRER, S.: A mathematical Model of short Time leaching at Fracture Surfaces. *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 120 (1990), S. 117-125
- [90] ROULLARD, C.; HOWELL, M.: Keep your Bottles looking newer longer. *Masters Brewers Association of America, Technical Quarterly* 36 (1999), Nr. 2, S. 243-245
- [91] SACHS, L.: *Statistische Auswertungsmethoden*. 2. Auflage, Berlin: Springer, 1969
- [92] SAHAR, M. R.; LIEW, A. S.; KARIN, M. A.: Effects of Cullet on the Properties of Container Glass. *Glass Machinery World Plants & Accessoires* 13 (2000), Nr. 1, S. 106-110
- [93] SCHMAUDER, W.: Beitrag zum Problem der Innendruckbeanspruchung und Festigkeit von Mineralwasserflaschen. Freising: Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1976
- [94] SCHOLZE, H.: *Glas: Natur, Struktur und Eigenschaften*. 3. Auflage. Berlin: Springer, 1988

- [95] SCHWERING H. U.: Was ist Glas. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 17-38
- [96] SEIDEL, H.: Physikalische und chemische Eigenschaften von Glasoberflächen durch Belegen mit dünnen Schichten. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): Werkstoff Glas I, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 205-232
- [97] SMETS, B. M. J.; THOLEN, M. G. W.: The pH Dependence of the aqueous Corrosion of Glass. *Physics and Chemistry of Glasses* 26 (1985), Nr. 3, S. 60-63
- [98] SOPURA, Stadtallendorf: Scuffing. 1999. Firmenschrift und persönliche Mitteilung
- [99] SOUTHWICK, R., D.; WASYLYK, J., S.; SMAY, G., L.; KEPPLER J., B.; SMITH, E. C.; AUGUSTSSON, B. O.: Die mechanischen Eigenschaften von Beschichtungen zum Schutz von Glasoberflächen. *Thin Solid Films* 77 (1981), S. 41-50
- [100] STANDARDBLATT A 82 Maßbehältnis NRW-Bierflasche. Bundesverband Glasindustrie und Mineralfaserindustrie e. V., Düsseldorf (1988)
- [101] STAUDIGEL, H.; CHASTAIN, R.A.; YAYANOS, A.; BOURCIER, W.: Biologically mediated Dissolution of Glass. *Chemical Geology* 126 (1995), Nr. 2, S. 147-154
- [102] STL B FÜR BIERFLASCHEN, 09.1994. Spezielle Technische Liefer- und Bezugsbedingungen für Bierflaschen. Deutscher Brauer-Bund e.V., Bonn, BV Glas und Mineralfaser, Düsseldorf
- [103] TEAGUE, J. M.; BLAU, H. H.: Investigations of Stresses in Glass Bottles under internal hydrostatic Pressure. *Journal of the American Ceramic Society* 39 (1956), Nr. 7, S. 229-259
- [104] TOMOZAWA, M.: Stress Corrosion Reaction of Silica Glass and Water. *Physics and Chemistry of Glasses* 39 (1998), Nr. 2, S. 65-69
- [105] UCHINO, T.; SAKKA, T.; IWASAKI, M.: Interpretation of hydrated States of Sodium Silicate Glasses by Infrared and Raman Analysis. *Journal of the American Ceramic Society* 74 (1991), Nr. 2, S. 306-313
- [106] VARNER, J. R.; OEL, H. J.: Surface Defects: Their Origin, Characterization and Effects on Strength. *Journal of Non-Crystalline Solids* Vol. 19 (1975), S. 321-333
- [107] VOGELPOHL, H.: Untersuchungen über die Lichtdurchlässigkeit von Glasflaschen. *Verpackungsrundschau* 40 (1989), Nr. 6, S. 45-53
- [108] VOGELPOHL, H.: Schlagfestigkeit von Glasflaschen. *Getränketechnik* 8 (1992), Nr. 1, S. 18-21
- [109] VOGELPOHL, H.: Qualitätssicherung im Flaschenkeller. *Brauwelt* 135 (1995), Nr. 21, S. 1016-1022
- [110] VOGELPOHL, H.: Produkthaftung bei der Flaschenabfüllung. *Brauindustrie* 80 (1995), Nr. 3, S. 170-174
- [111] WEIßENBORN, A.: Flaschennachvergütung. *Brauwelt* 133 (1993), Nr. 27, 1192-1193
- [112] WEISSER, H.: Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik im Bereich Flaschenkeller. *Der Weihenstephaner* 60 (1992), Nr. 3, S. 163-170
- [113] YOKOKURA, S.: Relationship between internal Pressure and Resistance to thermal Shock of Glass Containers. *Glass Technology* 25 (1984), Nr. 2, S. 109-114

-
- [114] YOKOKURA, S.: Thermal Shock Resistance of returnable Glass Containers. *Glass Technology* 25 (1984), Nr. 2, S. 105-108
- [115] ŽAGAR, L.: Verhalten von Gläsern in Geschirrspülmaschinen. In: Lohmeyer, S. (Hrsg.): *Werkstoff Glas I*, 2. Auflage. Ehningen: Expert-Verlag, 1987, S. 119-134

8 Anhang

8.1 Flaschenzeichnungen

8.1.1 NRW-Flasche

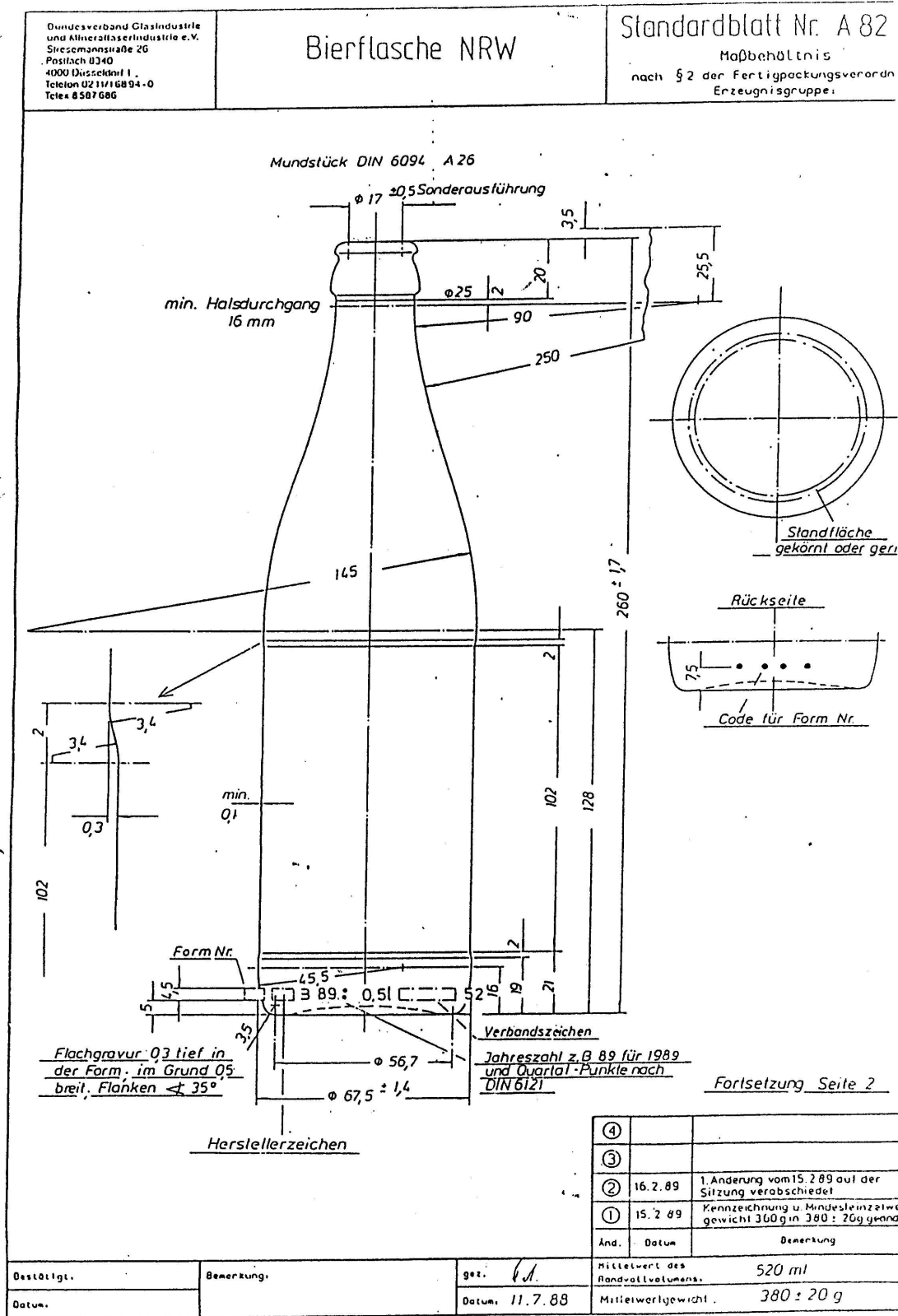


Bild 8.1. Zeichnung einer NRW-Flasche [100]

8.1.2 GDB-Flasche

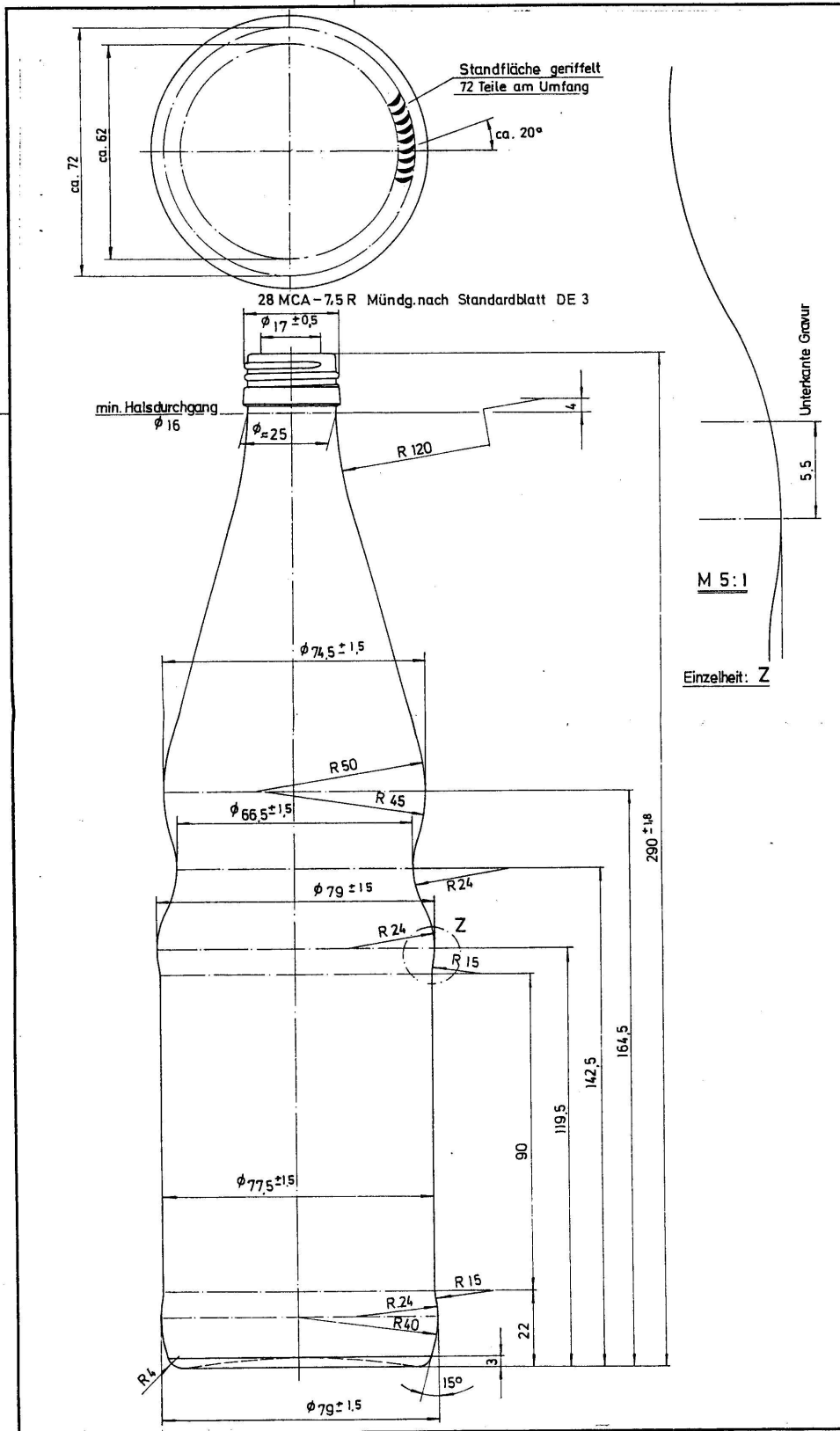


Bild 8.2. Zeichnung einer GDB-Flasche [75]

8.1.3 Ale-Flasche

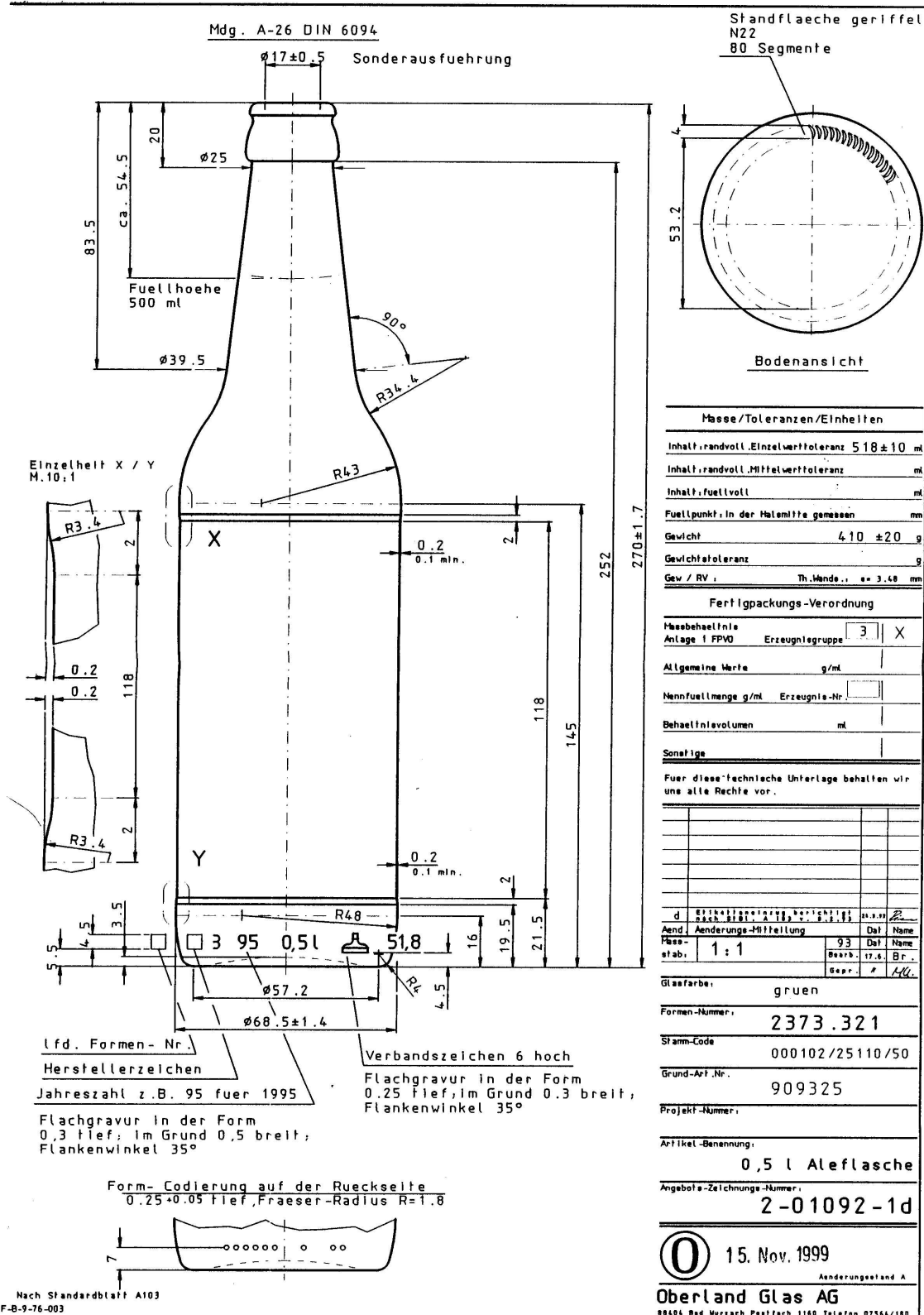


Bild 8.3. Zeichnung einer Ale-Flasche [75]

8.2 Weitere Ergebnisse zur Innendruckfestigkeit

8.2.1 Innendruckfestigkeit von 0,7-l-GDB-Flaschen

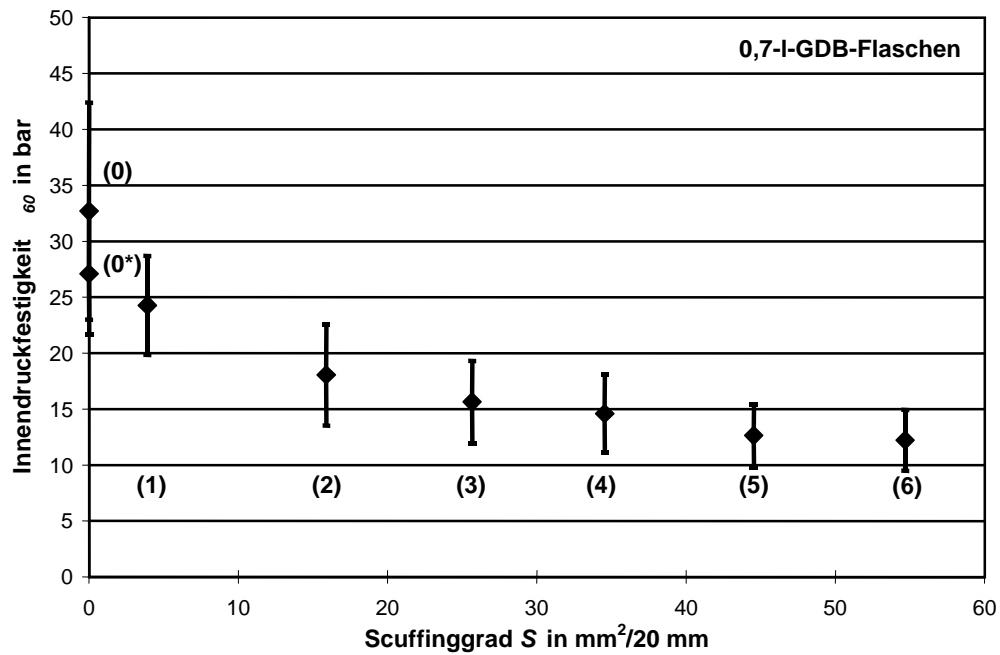


Bild 8.4. Zusammenhang zwischen Scuffinggrad und Innendruckfestigkeit (0,7-l-GDB-Flaschen)

8.2.2 Innendruckfestigkeit Ale-Flaschen

In dieser Untersuchung wurden insgesamt 923 gebrauchte Flaschen untersucht und in sieben Scuffingklassen eingeteilt.

Tabelle 8.1. Klasseneinteilung und statistische Größen für die Messungen der Innendruckfestigkeit an Ale-Flaschen

Prüfgröße in		Scuffingklasse								
		(0)	(0*)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
S	mm ²	0	0	0,0-15,0	15,5-30,0	30,1-45,0	45,1-60,0	60,1-75,0	75,1-90,0	>90,1
n	-	368	348	337	93	167	180	90	38	18
\bar{S}	mm ²	0	0	4,3	22,2	38,0	52,0	66,7	81,5	95,7
\bar{p}_{60}	bar	39,1	29,6	17,7	15,3	14,0	13,3	13,0	12,6	12,3
s_p	bar	11,0	6,6	3,1	2,5	2,0	1,5	1,7	1,7	1,5
w	bar	54,7	33,4	20,0	15,4	12,4	10,6	8,9	6,5	5,1
$p\%$	%	100	76	45	39	36	34	32	31	31
p_{min}	bar	4,3	14,7	7,0	9,7	7,4	8,2	8,1	9,1	10,1
G_p	bar	21,0	18,7	12,6	11,2	10,7	10,8	10,2	9,7	9,7

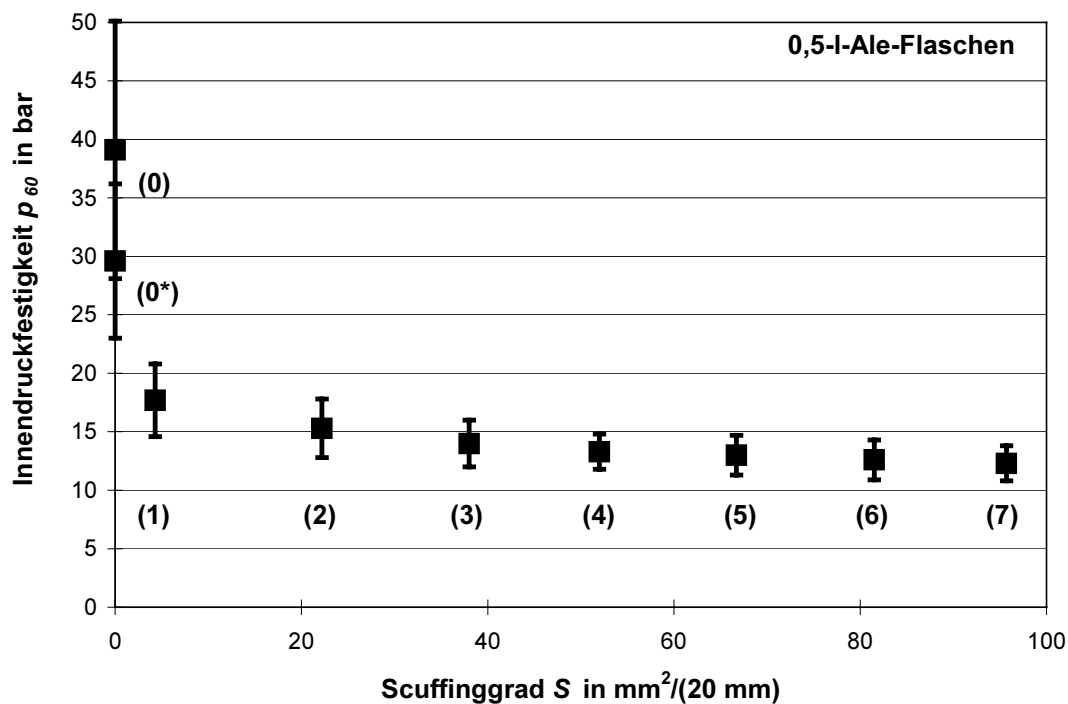


Bild 8.5. Zusammenhang zwischen Scuffinggrad und Innendruckfestigkeit (0,5-l-Ale-Flaschen)