

Prozessdatenanalyse zur Inline- Verminderung von Störeinflüssen beim Ultraschallsiegeln

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden

Karsten Thürling

geboren am 01.07.1983 in Ueckermünde

Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak
Zweiter Gutachter:	Prof. Dipl.-Ing. Dr. rer. nat. techn. habil. Harald Rohm
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder
Datum der Einreichung:	11. November 2015
Datum der Verteidigung:	3. November 2016

für

Jule

Kalle, Alfred

(und mich)

Man kann nicht hoffen, die Welt zum Besseren zu wenden, wenn sich der Einzelne nicht zum Besseren wendet. Dazu sollte jeder von uns an seiner eigenen Vervollkommnung arbeiten und sich dessen bewußt werden, daß er die persönliche Verantwortung für alles trägt, was in dieser Welt geschieht, und daß es die direkte Pflicht eines jeden ist, sich dort nützlich zu machen, wo er sich am nützlichsten machen kann.

Marie Curie (1867 - 1934)

Madame Curie ist unter allen berühmten Menschen der einzige, den der Ruhm nicht verdorben hat.

Albert Einstein (1879-1955)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Zeitraum von 2012 bis 2015 neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer Anwendungszentrums für Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (AVV) in Dresden entstanden. Ich war dort von 2008 bis 2014 als Teil der Arbeitsgruppe „Fügen“ beschäftigt und habe mich vor allem dem Thema Ultraschallsiegeln gewidmet.

Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak für die Bereitschaft zur Betreuung, für die kritische und ausdauernde Begleitung und die Schaffung der notwendigen Rahmen- und Arbeitsbedingungen zur Erstellung einer solchen Arbeit. Danke! Weiterhin möchte ich Prof. Dipl.-Ing. Dr. habil. Harald Rohm für die Bereitschaft zur Zweitkorrektur und seine Hinweise und Anmerkungen zur Arbeit danken.

Besonderer Dank gilt meinen Kollegen und Freunden des Fraunhofer AVV und des Lehrstuhl für Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik der TU Dresden, welche mir mit Ressourcen und Equipment geholfen haben, mit gutem Rat und schneller Tat zur Seite standen oder mir einfach den Rücken in unterschiedlichen Projekten frei hielten, insbesondere die Kollegen der Arbeitsgruppe Fügen an beiden Institutionen. Hervorheben möchte ich die nicht immer einfache aber doch großartige Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. Sascha Bach, welcher den Grundstein für die Ultraschallthematik in Dresden gelegt hat und mich zum Thema Ultraschallsiegeln fortwährend begleitete. Danke für die vielen Gespräche, kritischen Hinweise, Hilfe und gegenseitige Motivation. Weiterer Dank gilt Benjamin Stephan für die Unterstützung in den Ultraschallprojekten und seine Korrektur in der finalen Phase der Dissertation. Weiterhin möchte ich allen studentischen Hilfskräften danken, die in mühevoller und ausdauernder Arbeit die Vielzahl von Versuchen durchgeführt haben und damit ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Hervorheben möchte ich dabei den Beitrag von Helene Starke.

In diese Arbeit sind Ergebnisse unterschiedlicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte eingeflossen. Den größten Anteil hatte das KMU-innovativ Verbundprojekt „INSEL“, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Projektkennziffer 02PK2214) gefördert wurde. Projektpartner in diesem Projekt waren die beiden Firmen Herrmann Ultraschalltechnik GmbH und HDG Verpackungsmaschinen GmbH, deren beteiligten Mitarbeitern ich für die Unterstützung danken möchte.

Ich danke weiterhin den fleißigen Orthografen, namentlich meine Eltern, sowie Alexander S. und Caren E. ohne deren Hilfe der Kampf mit den Kommas für mich nicht zu gewinnen gewesen wäre.

Ein spezieller Dank geht außerdem an meine Dresdner WG, deren wechselnde MitbewohnerInnen und ständige Gäste mich teils in übergebührlichem Maße zerstreut und für ausreichend Ablenkung gesorgt haben.

Ein riesengroßes Danke auch an meine Freundin Jule, welche meine familiären Verpflichtungen insbesondere während der letzten Schreibphasen übernommen und meine Zweifel ertragen hat.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	IX
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	XII
1. Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Verpackungen und Verpackungsprozesse	2
1.2.1 Grundfunktionen der Verpackung	2
1.2.2 Anforderungen an Verpackungen.....	3
1.2.3 Anforderungen an Verpackungsprozesse	4
1.3 Kunststoff und Kunststoffverpackungen	5
1.4 Ultraschallfügen.....	7
1.4.1 Entwicklung der Ultraschalltechnik	7
1.4.2 Ultraschallsiegeln in Verpackungsmaschinen.....	8
1.5 Prozessüberwachung in Verarbeitungsmaschinen.....	9
2. Stand von Wissenschaft und Technik	10
2.1 Verarbeitungsvorgang Ultraschallsiegeln.....	10
2.2 Thermoplastische Kunststoffe.....	11
2.2.1 Einordnung	11
2.2.2 Makromolekularer Aufbau	12
2.2.3 Siegelpolymere	14
2.2.4 Relevante Eigenschaften für das Ultraschallsiegeln von Kunststoffen.....	15
2.2.5 Flexible Packmittel	20
2.2.5.1 Definition.....	20
2.2.5.2 Formen.....	21
2.2.5.3 Aufbau	22
2.2.5.4 Herstellung.....	23
2.3 Fügen von Thermoplasten.....	24
2.3.1 Makromolekularer Verfahrensablauf.....	24
2.3.2 Ultraschallsiegeln	26
2.3.2.1 Abgrenzung zum Ultraschallschweißen von Kunststoffformteilen.....	26
2.3.2.2 Fügeprozessablauf beim Ultraschallsiegeln.....	27
2.4 Prozesstechnik von Ultraschallsiegelsystemen.....	30
2.4.1 Allgemeine Bestandteile und Verfahrensvarianten	30
2.4.2 Elektrische Bauteile.....	31
2.4.3 Elektromechanische Bauteile.....	32

2.4.4	Mechanische Bauteile.....	32
2.4.5	Lernen von Generator und Schwinggebilde	35
2.4.6	Prozessführung	35
2.5	Störungen des Verschleißvorgangs.....	36
2.5.1	Definition Störung	36
2.5.2	Untersuchungen zum Wärmekontaktsiegeln	36
2.5.3	Untersuchungen zum Ultraschallsiegeln	39
2.6	Prozessüberwachung.....	42
2.6.1	Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung.....	42
2.6.2	Arten der Prozessüberwachung	42
2.6.3	Ablauf einer Prozessüberwachung	43
2.6.4	Prozessdaten und Prozessüberwachung beim Fügen mit Ultraschall.....	44
2.7	Zusammenfassung des Wissensstandes	49
3.	Zielsetzung	51
3.1	Wissenschaftlich-technische Problemstellung.....	51
3.2	Arbeitshypothese.....	51
3.3	Vorgehen.....	52
4.	Analyse und Systematisierung von Störeinflüssen	53
4.1	Vorgehen.....	53
4.2	Analyse des verarbeitungstechnischen Systems	53
4.3	Ursachen und Systematisierung von Störeinflüssen relativ zur Wirkpaarung	53
4.3.1	Klimatische Einflüsse aus der Prozessumgebung.....	54
4.3.2	Packmittelvorbehandlung	55
4.3.3	Packgutbedingte Störungen	56
4.3.4	Packmittelbedingte Störungen.....	57
4.3.5	Prozessbedingte Störungen.....	59
4.3.6	Werkzeugverschmutzung	59
4.4	Systematisierung von Störeinflüssen nach Störprinzip.....	59
5.	Methode zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Störeinflüssen und Prozessdaten.....	62
5.1	Ziele und Anforderungen.....	62
5.2	Ultraschallsiegelung.....	62
5.3	Applikation der Störungen.....	63
5.3.1	Thermische Beeinflussung des Packstoffs.....	63

5.3.2	Verhinderung des vollflächigen Fügeflächenkontaktes durch Fremdkörper	65
5.3.2.1	Definition von Störgutgruppen	65
5.3.2.2	Flüssiges Störgut.....	66
5.3.2.3	Pastöses Störgut.....	67
5.3.2.4	Staubiges Störgut.....	68
5.3.2.5	Stückiges Störgut.....	70
5.3.3	Störungen des Packmittels.....	70
5.3.4	Störungen des Werkzeugs.....	70
5.4	Analyse der Nahtqualität.....	71
5.4.1	Siegelnahtfestigkeitsmessungen	71
5.4.2	Dichtigkeitsmessungen.....	72
5.5	Analyse der Prozessdaten.....	73
5.6	Vergleich von Stör- und Referenzsiegelung	74
5.6.1	Siegelnahtqualität	74
5.6.2	Prozessdaten	74
5.7	Entwicklung des Versuchsstands.....	78
5.7.1	Anforderungen und Eingrenzung	78
5.7.2	Grundstruktur.....	80
5.7.3	Packmittelmagazin, Entnahmestation, Transportsystem und Antrieb.....	81
5.7.4	Siegelstation.....	81
5.7.5	Störstation.....	82
5.7.6	Messsystem.....	84
5.7.7	Versuchsablauf	85
6.	Versuchsplanung.....	88
6.1	Erwartete Einflüsse auf Nahtqualität und Prozessdaten.....	88
6.1.1	Erwartete Einflüsse der Störprinzipie	88
6.1.2	Erwartete Einflüsse aus Prozessführung und Packstoffen.....	89
6.2	Untersuchte Packstoffe	90
6.2.1	Auswahl.....	90
6.2.2	Schichtaufbau	91
6.2.3	Thermische Analyse mittels DSC.....	92
6.2.4	Nahtfestigkeit beim Wärmekontaktsiegeln.....	93
6.3	Versuchsdurchführung.....	94
6.3.1	Randbedingungen für Referenzsiegelungen.....	94
6.3.2	Eskalierendes Prüfvorgehen	95
6.3.2.1	Beschreibung	95

6.3.2.2	Exemplarisches Prüfverfahren	96
6.3.2.3	Feinaufgelöstes Prüfverfahren.....	99
7.	Ergebnisse zum Einfluss von Störungen auf Nahtqualität und Prozessdaten.....	102
7.1	Einfluss der Prozessführung auf Prozessdatenverläufe	102
7.2	Prozessdaten und Nahtqualität in Abhängigkeit der Störeinflüsse	104
7.2.1	Exemplarisches Prüfverfahren	104
7.2.1.1	Thermische Beeinflussung der Packmittel	104
7.2.1.2	Störung durch flüssige Störgüter	107
7.2.1.3	Zusammenfassung exemplarisches Prüfverfahren	109
7.2.2	Feinaufgelöstes Prüfverfahren	109
7.2.2.1	Störung durch pastöses Störgut.....	109
7.2.2.2	Störung durch stückiges Störgut.....	117
7.3	Schlussfolgerungen	124
7.3.1	Störprinzip.....	124
7.3.2	Packstoffe	125
7.3.3	Prozessdaten und Prozessführung.....	127
7.3.4	Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen.....	128
8.	Zusammenfassung und Ausblick	130
	Literaturverzeichnis.....	132
	Publikationsliste	144

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen lateinisch

$\overline{\Delta D_{P,Ref}}$	[-]	Mittelwert aller Abweichungskennwerte der Referenzsiegelungen
$\overline{\Delta D_{P,stör}}$	[-]	Mittelwert aller Abweichungskennwerte der Siegelungen mit Störeinfluss
D_P	[-]	Abweichungskennwert der Leistungsverläufe
$D_{P,Ref}$	[-]	Abweichungskennwert der Leistungsverläufe einer Referenz-Siegelung
$D_{P,Ref,max}$	[-]	Maximale Abweichung der Leistungsverläufe einer Referenz-Siegelung
$D_{P,stör}$	[-]	Abweichungskennwert der Leistungsverläufe einer Siegelung mit Störeinfluss
$D_{P,stör,min}$	[-]	Minimale Abweichung der Leistungsverläufe einer Referenz-Siegelung
D_s	[-]	Abweichungskennwert der Fügwegverläufe
$D_{s,Ref}$	[-]	Abweichungskennwert der Fügwegverläufe einer Referenz-Siegelung
$D_{s,stör}$	[-]	Abweichungskennwert der Fügwegverläufe einer Siegelung mit Störeinfluss
E^*	[N mm ⁻²]	komplexer E-Modul
E'	[N mm ⁻²]	Speichermodul
E''	[N mm ⁻²]	Verlustmodul
$P_R(t)$	[W]	Leistung der Referenzsiegelung
$P_S(t)$	[W]	Leistung der Siegelung mit Störeinfluss
s_b	[μm]	Sonotrodenposition zu Prozessbeginn
s_e	[μm]	Sonotrodenverschiebung am Prozessende
SNF	[N 15mm ⁻¹]	Siegelnahtfestigkeit
s_p	[μm]	Sonotrodenverschiebung bei Gleichgewichtszustand
t_0	[s]	Prozessbeginn
$\tan \delta$	[-]	mechanischer Verlustfaktor
t_e	[s]	Prozessende (nach Haltezeit)
T_{fm}	[°C]	Endtemperatur
T_{im}	[°C]	Anfangstemperatur
T_K	[°C]	Kristallitschmelztemperatur
T_{pc}	[°C]	Kristallisationspeaktemperatur
T_{pm}	[°C]	Schmelzpeaktemperatur
T_R	[°C]	Rekristallisationstemperatur
t_s	[s]	Siegelzeitende
T_U	[°C]	Umgebungstemperatur
v	[mm min ⁻¹]	Fügeschwindigkeit
x_n	[-]	Schnittpunkt zweier Prozessdatenverläufe
ΔD_P	[-]	Kennwert für die Störerkennbarkeit anhand des Leistungsverlaufs
$\Delta D_{P, stückig}$	[-]	Kennwert für die Störerkennbarkeit anhand des Leistungsverlaufs bei stückigen Störgütern
$\Delta D_{P,MW}$	[-]	Mittelwert der Störerkennbarkeit anhand des Leistungsverlaufs

$\Delta D_{p,pastös}$	[-]	Kennwert für die Störerkennbarkeit anhand des Leistungsverlaufs bei pastösen Störgütern
ΔD_s	[-]	Kennwert für die Störerkennbarkeit anhand des Wegverlaufs
ΔH	[kJ kg ⁻¹]	Phasenübergangsenthalpie
ΔH_m	[kJ kg ⁻¹]	Schmelzenthalpie

Formelzeichen griechisch

$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Schergeschwindigkeit
δ	[°]	Phasenwinkel
ε	[%]	Dehnung
ε_A	[%]	Maximum der Dehnung
η	[Pa s]	dynamische Viskosität
ϑ	[°C]	Temperatur
λ	[cm]	Wellenlänge
σ	[Pa]	Spannung
σ_A	[Pa]	Maximum der Spannung
ω	[rad s ⁻¹]	Kreisfrequenz

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
Al	Aluminium
AlO _x	Aluminiumoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
cPP	Cast-Polypropylen
Cu	Kupfer
DMA	Dynamisch Mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Dynamische Differenzkalorimetrie)
dyn.	Dynamisch
EAA	Ethylen-Acrylsäurecopolymer
EB	Erweichungsbereich
endo	endotherm
ePD	Elektrische Prozessdaten
ERG	Energierichtungsgeber
EVA	Ethylen-Vinylacetat
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
Exp.	Exponentiell
FB	Fließbereich
Fe	Eisen
FEM	Finite Elemente Methode

H ₂ O	Wasser
HF	Hochfrequenz
Kap.	Kapitel
KB	Kristallitschmelzbereich
KNN	Künstliche Neuronale Netze
MAP	Modified Atmosphere Package (Verpackung mit modifizierter Gas-Atmosphäre)
Mg	Magnesium
Mill.	Milliarden
min	Minute
Mio.	Millionen
Mod.	Modell
N ₂	Stickstoff
OPP	Orientiertes Polypropylen
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PE-HD	High Density Polyethylen (PE hoher Dichte)
PE-LD	Low Density Polyethylen (PE niedriger Dichte)
PE-LLD	Linear Low Density Polyethylen (lineares PE niedriger Dichte)
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
r	Radius
rel.	relativ
SiO _x	Siliziumoxid
SIT	Seal Initiation Temperature (Siegelstart-Temperatur)
ZB	Zersetzungsbereich

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Lebensmittelverluste in der europäischen Lebensmittelversorgungskette (Anteile in Gew. %) nach [GCS+11]	2
Abbildung 1-2:	Energiebedarf zur Erzeugung von Werkstoffen [MHM+02]	5
Abbildung 1-3:	Aufteilung nach Verpackungsarten links) des gesamten Verpackungsweltmarktes [N.N.13b] und rechts) der globalen Einzelhandelsverpackungen [N.N.10b]	6
Abbildung 1-4:	Auswahl unterschiedlicher Packungen, bei denen das Ultraschallsiegeln zum Einsatz kommt (Bildquelle: Herrmann Ultraschalltechnik GmbH).....	8
Abbildung 1-5:	Instandhaltungsstrategien nach [Die14], [Sch10a], [Mat02]	9
Abbildung 2-1:	Einteilung der Werkstoffe in Klassen [Kai07]	12
Abbildung 2-2:	Schematischer Aufbau und Anordnung der Makromolekülketten bei (a) amorphen und (b) teilkristallinen Thermoplasten [Pot04].....	13
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung der Spannung und Dehnung bei linear-viskoelastischem Materialverhalten links) zeitlicher Phasenversatz und rechts) entsprechende Hysteresekurve aus [DE06]	16
Abbildung 2-4:	Charakteristische Temperaturen im Thermogramm eines Schmelzvorgangs entsprechend [DIN EN ISO 11357-1] nach [ERT03]	18
Abbildung 2-5:	Verlauf der dynamischen Viskosität im Bereich des Phasenübergangs eines PE-LLD.....	19
Abbildung 2-6:	DSC-Messung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs bei PE	20
Abbildung 2-7:	Nahtbezeichnungen, Falten und Lagensprünge an verschiedenen Verpackungsarten.....	21
Abbildung 2-8:	Typischer Schicht-Aufbau einer Verpackungsfolie für das Verpacken von z.B. links) Süßwaren und rechts) Kaffee.....	22
Abbildung 2-9:	Ablauf und Verbindungsvorgänge während des Fügevorgangs von teilkristallinen Kunststoffen nach [SM94], [Ben87], [Mih12] und [Bac14].....	25
Abbildung 2-10:	Ablauf des Ultraschallsiegelvorgangs von Verbundfolien mit teilkristallinen Siegelschichten aus [Bac14]	27
Abbildung 2-11:	Schematischer Aufbau eines Ultraschallwerkzeuges zum Fügen von bahnförmigen Flachformgütern	30
Abbildung 2-12:	Verfahrensvarianten des Ultraschallsiegeln a) Schwingungsamplitude orthogonal zum Packstoff mit Messersonotrode, b) Schwingungsamplitude orthogonal zum Packstoff mit Stabsonotrode c) Schwingungsamplitude parallel zum Packstoff mit Stabsonotrode	31
Abbildung 2-13:	Schwingung des Schwinggebildes.....	33
Abbildung 2-14:	(a) Sprühbenetzung mittels Sprühdüse im Füllrohr (b) benetzter Schlauch (c) Siegelnaht mit eingeschlossenen Flüssigkeitstropfen [MAH+00].....	37
Abbildung 2-15:	Messaufbau zur Bestimmung der Oberflächentemperatur beim Siegeln durch flüssige Kontamination [ML12a].....	38
Abbildung 2-16:	Unterschiedliches Umschließungsverhalten von tropfenförmig aufgetragenen Kontaminationen aus [Sch12].....	39

Abbildung 2-17:	Verdrängungsmechanismen von Packgütern im Nahtbereich beim Ultraschallsiegeln aus [BTM12].....	39
Abbildung 2-18:	Mikroskopische Aufnahme von mit staubigem Produkt benetzten Siegelnähten bei Ultraschall- und Wärmekontaktsiegelverfahren nach [TBK11]	40
Abbildung 2-19:	links) Packgutpartikel an der Foliengrenzfläche vor dem Siegeln, rechts) Packgut durch Schmelzfluss aus der Nahtmitte verdrängt.....	40
Abbildung 2-20:	Darstellung produktbenetzter Nähte vor und nach dem Ultraschallsiegeln durch verschiedene Packgüter: a) geriebener Käse, b) Weizenmehl, c) Kaffeepulver, d) Olivenöl, e) Salatdressing, f) Kartoffelchips aus [BTM12]	41
Abbildung 2-21:	Zusammenhang von maximaler Nahtfestigkeit mit maximaler Schweißenergie [Rit86].....	46
Abbildung 2-22:	Vorhersage der Nahtfestigkeit mit Hilfe neuronaler Netze aus [LLL+06]	48
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung der betrachteten Wirkpaarung nach [GK12]	53
Abbildung 4-2:	Einordnung von Störeinflüssen nach Ort des Auftretens relativ zur Wirkpaarung (Arbeitsprinzip nach [BLM14]).....	54
Abbildung 4-3:	links) gefüllte Schalenverpackung mit Packgut im Nahtbereich, rechts) Beutelverpackung mit Packgut im Nahtbereich schematisch.....	56
Abbildung 4-4:	Packmittelbedingte Störungen: Lagefehler (links) und Geometriefehler (rechts)	58
Abbildung 4-5:	Einordnung von Störeinflüssen nach Störprinzip	60
Abbildung 5-1:	Temperaturbereiche teilkristalliner Kunststoffe, nach [Mic06].....	64
Abbildung 5-2:	Zusammenhang zwischen Xanthankonzentration und resultierender Viskosität, aus [GSC+00]	68
Abbildung 5-3:	Siegelnahtfestigkeit links) Zuschnitt der Probenstreifen rechts) schematische Darstellung der Prüfanordnung nach [DIN 55529]	72
Abbildung 5-4:	Ermittelte Kennwerte links) im Wegverlauf und rechts) im Leistungsverlauf.....	73
Abbildung 5-5:	Beispielhafter Leistungsverlauf von Referenz- und Störungssiegelvorgang.....	74
Abbildung 5-6:	Auswertung der Prozessdaten und Darstellung der Unterschiede am Beispiel des Leistungsverlaufs bei transPE @600N; 15µm oben links) Referenzsiegelungen, oben rechts) Störungssiegelungen, unten links) Box-Plot-Diagramm, unten rechts) Flächendiagramm	77
Abbildung 5-7:	Funktionsschema des Versuchsstandes.....	80
Abbildung 5-8:	Ambossmodul mit integrierten Sensoren, Packmittel und Sonotrode	81
Abbildung 5-9:	Schematische Darstellung des Versuchsstands	83
Abbildung 5-10:	CAD-Modell des Auftrags flüssiger Störgüter mit Hohlkegeldüse	84
Abbildung 5-11:	Schrittweiser Ablauf des Auftrags mit pastösem Störgut a) Beutel wird mit Sauggreifer des Rundläufers in Störstation gefördert b) Sauggreifer der Störstation greift Beutel c) Beutel wird geöffnet d) Zweistoffdüse wird abgesenkt e) Sprühauftrag des pastösen Störgutes f) Düse wird angehoben g) Sauggreifer der Störstation gibt Beutel frei	86
Abbildung 5-12:	Pastöser Störgutaufrag links) vor der Siegelung und rechts) nach der Siegelung	86
Abbildung 6-1:	DSC-Analyse der Packstoffe	93
Abbildung 6-2:	Siegelnahtfestigkeiten der ausgewählten Packmittel beim Wärmekontaktsiegeln	94

Abbildung 6-3:	Prozessfenster des AluPP-Verbundes links) Siegelnahtfestigkeiten, rechts) zugehörige Siegelenergie mit ausgewählten Parametersets.....	96
Abbildung 6-4:	Prozessfenster des metPE-Verbundes links) Siegelnahtfestigkeiten, rechts) zugehörige Siegelenergie mit definierten Parametersets	97
Abbildung 6-5:	Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit und des Lösungsverhältnisses von Wasser und Xanthan	99
Abbildung 6-6:	Scherfestigkeit der gequollenen Pastaprobe in Abhängigkeit des Wassergehalts.....	100
Abbildung 7-1:	Prozessdatenverläufe in Abhängigkeit der Siegelkraft am Beispiel von transPE (@15 µm oben links) Leistung, oben rechts) Weg, unten links) Amplitude und unten rechts) Kraft	102
Abbildung 7-2:	Prozessdatenverläufe in Abhängigkeit der Amplitude am Beispiel von transPE (@600 N oben links) Leistung, oben rechts) Weg, unten links) Amplitude und unten rechts) Kraft	103
Abbildung 7-3:	Einfluss der thermischen Störung auf die Nahtqualität bei links) AluPP und rechts) metPE.....	105
Abbildung 7-4:	Einfluss der thermischen Störung auf die Prozessdaten anhand der Leistung bei links) AluPP und rechts) metPE.....	105
Abbildung 7-5:	Einfluss der thermischen Störung auf die Prozessdaten anhand des Weges bei links) AluPP und rechts) metPE.....	106
Abbildung 7-6:	Temperatur der Folienoberfläche im Nahtbereich nach Schließen der Siegelbacken	106
Abbildung 7-7:	Einfluss der Störung durch Flüssigkeit auf die Nahtqualität bei links) AluPP und rechts) metPE.....	107
Abbildung 7-8:	Einfluss der Störung durch Flüssigkeit auf die Prozessdaten anhand der Leistung bei links) AluPP und rechts) metPE.....	108
Abbildung 7-9:	Einfluss der Störung durch Flüssigkeit auf die Prozessdaten anhand des Weges bei links) AluPP und rechts) metPE.....	108
Abbildung 7-10:	Zusammenhang zwischen Abweichungskennwert der Leistung und Fügegeschwindigkeit links) niedrigviskoses und rechts) hochviskoses Xanthan-Wasser-Gemisch.....	116
Abbildung 7-11:	Abweichungskennwert der Leistung und relativer Nahtfestigkeitsdifferenz links) niedrigviskoses und rechts) hochviskoses Xanthan-Wasser-Gemisch	117
Abbildung 7-12:	Wegverlauf bei einer Störung mit stückigem Produkt am Beispiel von transPE, weicher Pasta, 700 N und 18 µm	122
Abbildung 7-13:	Gemessene Sonotrodenposition vor Beginn der Siegelung.....	123
Abbildung 7-14:	Einfluss der einzelnen Störprinzipie auf die mittlere Nahtfestigkeit und die mittlere Störerkennbarkeit anhand der Leistung.....	124
Abbildung 7-15:	DSC-Messung der Aufheiz- und Abkühlmessung der untersuchten Packmittel im Temperaturbereich der Siegelschichtpolymere.....	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verarbeitungsgutgruppen nach [Gol69] und abgeleitete Störgutgruppen.....	65
Tabelle 2:	mögliche Unterteilung von staubigen Modellsubstanzen.....	69
Tabelle 3:	Schichtaufbau der untersuchten Packmittelverbunde	92
Tabelle 4:	Proben- und Versuchsumfang beim exemplarischen Prüfvorgehen	98
Tabelle 5:	Düsenparameter für den Auftrag der pastösen Störgüter.....	100
Tabelle 6:	Proben- und Versuchsumfang beim feinaufgelösten Prüfvorgehen.....	101
Tabelle 7:	Ergebnisse der Nahtfestigkeitsmessungen bei Störung durch pastöses Störgut (Xanthan-Wasser-Gemisch).....	110
Tabelle 8:	Prozessdatenunterschiede der Leistung bei Störung mit pastösem Produkt.....	113
Tabelle 9:	Prozessdatenunterschiede des Wegs bei Störung mit pastösem Produkt.....	114
Tabelle 10:	Ergebnisse der Nahtfestigkeitsmessungen bei Störung durch stückiges Störgut (gequollene Pastastreifen).....	118
Tabelle 11:	Prozessdatenunterschiede bei Störung mit stückigem Produkt (gequollene Pastastreifen).....	120

1. Einleitung

1.1 Motivation

Das Verpacken von Packgütern ist notwendig für die räumliche Trennung von Produktion und Konsumtion. Packgüter werden heute global gefertigt und konsumiert, wodurch die Länge und Komplexität der Warenströme zunimmt. Bei gleichzeitiger Nachfrage nach funktionsgerechten und sicheren Packgütern steigen dadurch die Anforderungen an Verpackungen. Im Bereich der Lebensmittelverpackungen gibt es vor allem in den Industrienationen den Bedarf möglichst naturbelassene Packgüter zu konsumieren [GAF+12], wodurch ebenfalls die Anforderungen an Verpackungen steigen. Ein weiterer Aspekt ist die zunehmende Knappheit an Ressourcen, die sich nicht nur auf die Endlichkeit von fossilen Rohstoffen beschränkt. Auch die wachsende Zahl der Erdbevölkerung führt zu einer Verminderung des Überschusses an Nahrungsmitteln und Rohstoffen für die Packmittelerzeugung. Die Herstellung dieser Verpackungen, welche unter global unterschiedlichsten Bedingungen die Sicherheit und Unversehrtheit der Packgüter sichern müssen, bei gleichzeitig geringerem Material- und Energieaufwand, wird damit zu einer technologischen Herausforderung.

Verpackungen, welche dem an sie gestellten Qualitätsanspruch nicht gerecht werden, sind im besten Fall ärgerlich für den Konsumenten, der gekaufte Ware nicht nutzen kann und evtl. umtauschen muss, führen aber häufig zu Imageverlusten der Herstellerfirma. Sie sind teuer für den Erzeuger, welcher das Packgut erneut verpacken bzw. die fehlerhafte Produktion als teuren Sondermüll entsorgen muss. Im schlimmsten Fall jedoch sind solche Verpackungen gefährlich, weil beispielsweise ein pharmazeutischer Wirkstoff seine Wirkung nicht mehr entfalten kann oder Lebensmittel verdorben konsumiert werden.

Bei flexiblen Kunststoffverpackungen ist das Verschließen durch Erzeugen von Fügenähten zwischen polymeren Packmittelteilen einer der final entscheidenden Prozessschritte für qualitätsgerechte Funktion. Gelingt dies nicht, sind damit nicht nur alle vorangegangenen Prozessschritte nutzlos, sondern Packmittel und Packgut sind in den meisten Fällen verloren. Für die Funktionsfähigkeit einer Verpackung sind Dichtigkeit und Festigkeit der Fügenähte entscheidend welche jedoch nach [DT09] nur in 63 % der Fälle tatsächlich gewährleistet ist. Als Ursache wird dabei in 58 % der Fälle die Kontamination der Nähte mit dem zu verpackenden Packgut genannt, wodurch der Verschleißvorgang beeinträchtigt und die Bildung einer dichten Naht verhindert wird.

Angesichts dieser Zahlen erfolgt die Qualitätskontrolle dieser Nähte in erschreckend hohem Maße mittels einfachster manueller Prüfmethode durch den Maschinenbediener. Diese Kontrollen sind bekanntermaßen zu ungenau [ZM06]. Geeignete Prüfverfahren zur Detektion dieser Fehlstellen sind jedoch im industriellen Umfeld nur bedingt anwendbar, da die Prüfung entweder zerstörend erfolgt oder für Hochleistungsprozesse als 100 %-Kontrolle zu zeitaufwändig ist. Daher erfolgt diese Art der Prüfung in der Regel stichprobenartig, wodurch fehlerhafte Verpackungen nur im Rahmen einer statistischen Sicherheit erkannt werden können.

Von der Gesamtmenge der weltweit verfügbaren Lebensmitteln geht ca. 1/3 verloren oder wird als Müll entsorgt [GCS+11]. Mehr als die Hälfte der anfallenden Lebensmittelverluste in Europa

entstehen in dem Teil der Versorgungskette, welcher mit Verpackungen und Verpackungsprozessen beeinflusst werden kann (Abbildung 1-1). Durch Optimierung und technologische Weiterentwicklung dieses Teils der Produktionskette, könnte die große Anzahl weggeworfener oder verdorbener Lebensmittel vermindert werden.

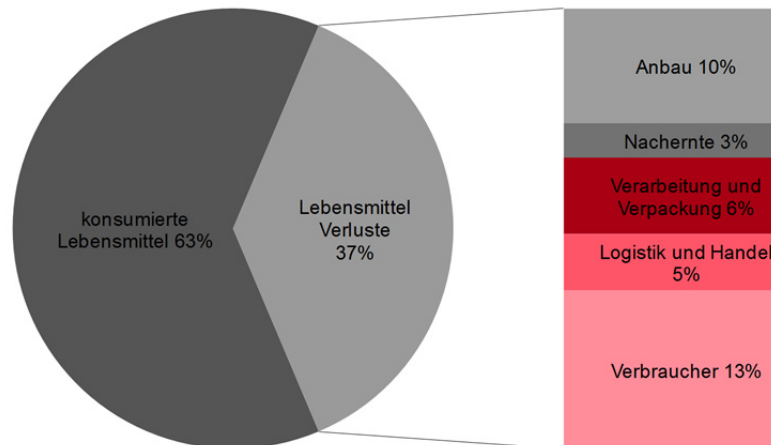


Abbildung 1-1: Lebensmittelverluste in der europäischen Lebensmittelversorgungskette (Anteile in Gew. %) nach [GCS+11]

Das Ultraschallfügen, als relativ junges Verfahren im Bereich flexibler Verpackungen, bietet die Möglichkeit für jeden einzelnen Fügeprozess prozessabhängige Messdaten zu erfassen. Durch die gezielte Analyse dieser Daten könnte die Voraussetzung dazu geschaffen werden, Störungen im Fügeprozess zu erkennen und fehlerhafte Verpackungen zu verhindern, bzw. zu entsorgen. Die damit verbundene Möglichkeit sicherere und damit auch nachhaltigere Verpackungen zu erzeugen, soll Motivation und Ansporn dieser Arbeit sein.

1.2 Verpackungen und Verpackungsprozesse

1.2.1 Grundfunktionen der Verpackung

Die Funktionen einer Verpackung lassen sich nach [BMW11], auf folgende drei Grundfunktionen zusammenfassen:

- Schutzfunktion
- Rationalisierungsfunktion (in [Ahl97] als Lager- und Transportfunktion beschrieben)
- Kommunikationsfunktion (in [Ahl97] als Werbe- und Verkaufsfunktion beschrieben)

Die Schutzfunktion als wichtigste Aufgabe bedeutet in erster Linie das verpackte Packgut vor Umwelteinflüssen zu schützen, sodass dessen Gebrauchswert bis zum Konsum erhalten bleibt. Diese Schutzwirkung kann im Einzelfall auch in umgekehrter Richtung erfolgen. So zum Beispiel bei Gefahrstoffen, die verpackt werden, um Mensch und Umwelt zu schützen. Die Rationalisierungsfunktion einer Verpackung besteht darin, volkswirtschaftliche Abläufe zu ermöglichen und zu vereinfachen. Durch Verpackung wird es z.B. möglich, dass Produktion und

Konsum von verderblichem Packgut zeitlich und örtlich voneinander getrennt geschehen kann oder dass verpacktes Schüttgut portionier- und stapelbar wird. Die Kommunikationsfunktion einer Verpackung wird dazu genutzt, den mit dem Packgut verbundenen, notwendigen Informationsfluss zwischen Erzeuger und Verbraucher eines Produktes zu gewährleisten. Das bedeutet in erster Linie dem Konsumenten mitzuteilen, welchen Inhalt eine Verpackung enthält und das sowohl im Sinne der Information als auch der Werbung.

1.2.2 Anforderungen an Verpackungen

Aus den drei Grundfunktionen leiten sich die Mindestanforderungen an Verpackungen und Verpackungsprozesse ab: eine Verpackung und der dazugehörige Verpackungsprozess müssen derart gestaltet sein, dass alle drei Funktionen einer Verpackung erfüllt werden können. Hinzu kommen Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.

Zunächst dürfen keine Wechselwirkungen zwischen Packgut und Packmittel auftreten, welche das Produkt beeinträchtigen könnten. Um die Schutzfunktion zu gewährleisten, muss die Verpackung anforderungsgerechte Festigkeit und Dichtigkeit aufweisen. Diese Anforderungen betreffen sowohl das Verpackungsmaterial, als auch die Nahtqualität der Verpackung.

Die Nahtqualität von Siegelnähten¹ an Verpackungen wird anhand von drei Kriterien bewertet:

- Siegelnahtfestigkeit (SNF)
- Siegelnahtdichtigkeit
- Optik

Die Siegelnähte müssen einerseits auftretenden Belastungen (z.B. beim Transport oder im Herstellungsprozess) widerstehen können, um das Produkt zu schützen. Andererseits soll vor allem im Bereich der Lebensmittelverpackungen der einfache Konsum des verpackten Gutes durch leicht zu öffnende Verpackungen (sog. Easy-Opening) ermöglicht werden. Je nach Anwendungsfall kann außerdem die Warmnahtfestigkeit (sog. Hot-Tack) eines Packmittels relevant sein. In vertikalen Verpackungsmaschinen wird das Packgut teils auf die noch warme Siegelnaht des Packungsbodens gefüllt, welche dieser Belastung standhalten, also einen hohen Hot-Tack aufweisen muss [Wag10].

Die Siegelnahtdichtigkeit muss ebenfalls die Schutzfunktion der Verpackung gewährleisten. Die Dichtigkeit einer Verpackung kann in verschiedene Klassen eingeteilt werden, die von den Anforderungen des jeweiligen Packgutes abhängen [VDMA 2006/13]. Bei den Dichtigkeitsklassen mit geringer Anforderung (Klasse I, rieseldicht – Klasse IV, flüssigkeitsdicht) soll vor allem ein Verlust des Packgutes aus der Packung verhindert werden. Bei höheren Anforderungen (Klasse V, wasserdampfdicht und Klasse VI gasdicht) soll ein Gasaustausch zwischen Verpackung und Umwelt verhindert werden. Die Dichtigkeit einer Siegelnaht kann jedoch nicht definiert eingestellt werden. Daher wird bei Verpackungen, die einen definierten Gasaustausch erfordern (z.B. geröstete

¹ Im Verpackungsbereich wird eine thermische Fügenaht eines (häufig) mehrschichtigen Verbundaufbaus als Siegelnaht bezeichnet. Der zugehörige Fügevorgang wird „Siegeln“ genannt. (s. Kap. 2.1.)

Kaffeebohnen), die Siegelnaht mit der maximal notwendigen Dichtigkeit erzeugt und der Gasaustausch durch ein entsprechendes Ventil oder eine entsprechende Membran an der Packungsmantelfläche gelöst.

Die optischen Eigenschaften einer Siegelnaht dürfen die Kommunikationsfunktion der Verpackung nicht beeinträchtigen. Das bedeutet, dass z.B. auf der Naht befindliche Inhaltangaben leicht lesbar sein müssen. Die Kommunikationsfunktion im Sinne der Werbung darf nicht durch minderwertige Nahtoptik beeinträchtigt sein. Die Naht darf also nicht geknickt sein, oder etwa Verbrennungen (z.B. aus thermischen Fügeprozessen) aufweisen.

Für das Verschließen, bzw. den Siegelvorgang ist vor allem die Siegelbarkeit wichtig: der Packstoff muss sich thermisch verbinden lassen. Einen gut siegelfähigen Packstoff kennzeichnet Siegelfähigkeit in einem breiten Prozessfenster, mit möglichst niedrigem Energieaufwand.

1.2.3 Anforderungen an Verpackungsprozesse

Prozesse, die zur Herstellung einer Verpackung angewendet werden, insbesondere die automatisierten Verpackungsprozesse, müssen so gestaltet sein, dass die angestrebten Funktionen der Verpackung in keinem Fall vom Verpackungsprozess selbst beeinträchtigt werden. Zur Erreichung dieses Ziels, muss jeder einzelne Verpackungsvorgang so gestaltet sein, dass Fehler in erster Linie vermieden bzw. verhindert werden oder aber erkannt werden können. Der Verschließvorgang mit dem konkret angewandten Verschließverfahren ist für die Funktionserfüllung einer Verpackung von entscheidender Bedeutung, da die Schutzfunktion erst mit dem Verschließen der Verpackung hergestellt wird [BMW11]. Im realen Verarbeitungsprozess gelingt dies nicht immer [Buc99], ist jedoch in seiner Relevanz sehr stark vom Packgut abhängig und wird entsprechend vom Gesetzgeber reglementiert und kontrolliert (Produkthaftungsgesetz). Im Bereich der automatisiert hergestellten Verpackungen gelten die strengsten Anforderungen für pharmazeutische Packgüter. Dies hängt mit der relativ großen Gefahr zusammen, die von verunreinigten und falsch- oder fehldosierten Wirkstoffen, falschen Anwendungshinweisen oder beschädigten Portionspackungen ausgehen würde. Bei Lebensmittelverpackungen steigen die Anforderungen mit zunehmender Verderblichkeit der verpackten Güter. So sind beispielsweise bei leicht verderblichen frischem Fisch, Fleisch oder Molkereiprodukten die Anforderungen an die Verpackung und die zugehörigen Verfahren wesentlich höher als bei trockenen Lebensmitteln wie z.B. Pasta, Teigwaren oder Schokolade. Mit steigenden Anforderungen müssen daher entweder die Verarbeitungsprozesse sicherer gestaltet, die Warenausgangskontrolle verbessert oder die Mindesthaltbarkeit herabgesetzt werden. Dies ist zum Teil eine ökonomische Entscheidung, da sichere Prozesse zumeist durch zusätzliche Maßnahmen wie Sensortechnik, qualitativ höherwertige Packmittel oder durch verbesserte Qualitätskontrolle erreicht werden.

Eine Studie an Modified-Atmosphere-Packaging (MAP)-Verpackungen² kam zu dem Ergebnis, dass 35 % eine fehlerhafte Gaszusammensetzung aufwiesen, wobei undichte Siegelnähte eine der

² Bei MAP-Verpackungen wird in die Packung ein sog. Schutzgas (reaktionsarm, meist N₂ oder CO₂) gefüllt um den Sauerstoffanteil in der Packung zu reduzieren, damit den Lebensmittelverderb zu verringern und dadurch die Haltbarkeit zu verlängern.

häufigsten Ursachen waren [TWW+03]. Das Handlungs- und Optimierungspotential auf diesem Gebiet ist also entsprechend groß.

1.3 Kunststoff und Kunststoffverpackungen

Kunststoffe sind Materialien die mit Hilfe chemischer Prozesse synthetisiert werden. Die Rohstoffe für die Herstellung dieser Materialien sind derzeit vor allem petrochemische Stoffe (Erdöl und Erdgas). Im Jahr 2012 wurden weltweit 288 Mio. t Kunststoffe produziert mit steigender Tendenz [N.N.13a]. Innerhalb des letzten Jahrzehnts stieg der Anteil von Kunststoffen, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden und/oder biologisch abbaubar sind. Diese werden als Biokunststoffe bezeichnet. Gemessen am gesamten Kunststoffverbrauch beträgt der Anteil der Biokunststoffe in Europa jedoch lediglich 0,1 % und in Deutschland nur etwa 0,05 % [Bei09]. Im Jahr 2011 wurden allein in Deutschland ca. 12 Mio. t Kunststoff verarbeitet, wozu ein Drittel Verpackungen entstehen, von denen mehr als die Hälfte aus bahnförmigen Flachformgütern hergestellt wird [Lin12].

Kunststoffe können unterschiedlichste Eigenschaften haben, die sich teilweise auch gezielt einstellen lassen. Sie sind generell leicht verform- und verarbeitbar, lassen sich bei geringem Energieaufwand fügen, haben eine niedrige Dichte bei vergleichsweise hoher Festigkeit und haben gute Beständigkeit gegenüber vielen Umwelteinflüssen. Die konkreten Eigenschaften sind sehr stark von der jeweiligen Kunststoffart abhängig [DEE+08].

Petrochemischen Kunststoffen haftet vor allem aus ökologischen Gründen ein negatives Image an, welches aber nur teilweise berechtigt ist. Gemessen am Energieaufwand zur Herstellung lassen sich Kunststoffe z.B. mit deutlich geringerem Aufwand herstellen, als z.B. metallische Werkstoffe (siehe Abbildung 1-2).

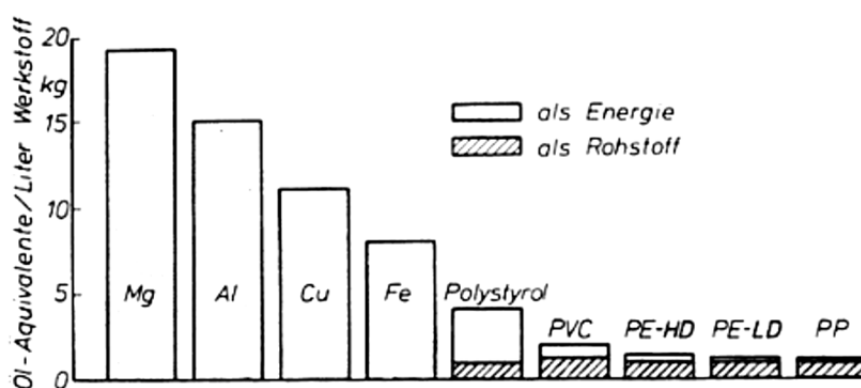


Abbildung 1-2: Energiebedarf zur Erzeugung von Werkstoffen [MHM+02]

Einer der größten Nachteile des Kunststoffwerkstoffs ist das damit verbundene Müllproblem. Die hohe Beständigkeit dieser Werkstoffe gegenüber unterschiedlichsten Medien führt dazu, dass der überwiegende Teil dieser Materialien auf natürlichem Weg in relevanten Zeiträumen nicht abbaubar ist. Es besteht zwar generell die Möglichkeit Kunststoffe zu recyceln, aber insbesondere bei Kunststoffverbunden ist dies nur mit hohem technischen Aufwand möglich, weshalb viele

Verbundverpackungen lediglich energetisch verwertet, also zur Energieerzeugung verbrannt werden. In Deutschland liegt der Anteil der verwerteten Kunststoffe bei ca. 99 %, wobei 43 % stofflich (werkstofflich und rohstofflich) und 56 % energetisch verwertet werden [Lin12].

Durch die geringe Dichte aber gleichzeitig hohe mechanische Festigkeit des Werkstoffes, sind Kunststoffverpackungen leichter und platzsparender als Alternativverpackungen z.B. aus Glas oder Metall. Vor allem im Zusammenhang mit den verpackungstypischen Transport- und Umschlagprozessen, ist die Energiebilanz von Kunststoffverpackungen dadurch deutlich besser, als Verpackungen aus anderen Werkstoffen [BP11].

Mehr als ein Drittel des weltweiten Verpackungsmarktes entfällt auf Verpackungen aus Kunststoff und 10 % aller Verpackungen sind flexible Verpackungen ([N.N.13b], Abbildung 1-3 links). Bei den weltweiten Einzelhandelsverpackungen (Lebensmittel, Getränke, Kosmetik, Haushaltsbedarf, Tierfutter, Hygieneartikel und Tabakwaren) bestehen 50 % aus flexiblen Verpackungen (Abbildung 1-3 rechts).

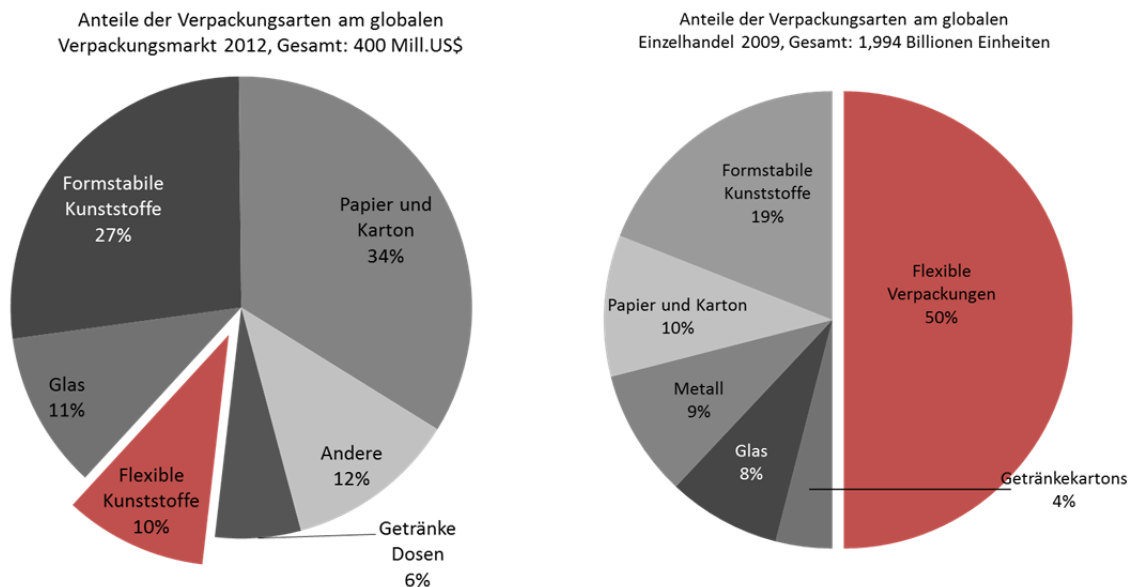


Abbildung 1-3: Aufteilung nach Verpackungsarten links) des gesamten Verpackungsweltmarktes [N.N.13b] und rechts) der globalen Einzelhandelsverpackungen [N.N.10b]

Der große Anteil von flexiblen Verpackungen im Einzelhandel hat vor allem ökonomische Gründe. Der Materialaufwand pro verpacktem Packgut ist gering und die Packdichte innerhalb der Sekundärverpackung ist größer, wodurch sich dort wiederum Packmittel einsparen lassen. Die Lagerung und der Transport von noch leerem Packmittel benötigt wenig Raum, die flexiblen Materialien lassen sich platzsparend auf Rollen speichern und die Herstellung von geformten Verpackungen aus der Packmittelbahn ist technisch einfach und schnell möglich. Die schlechtere Handhabung durch den Konsumenten und die geringere Festigkeit sind als Hauptnachteile zu nennen. Es gibt jedoch vermehrt Entwicklungen, welche die Nachteile für den Verbraucher kompensieren sollen, z.B. leicht zu öffnende und wiederverschließbare Verpackungen [SCH04].

Gemessen am Flächenanteil besteht die Mehrzahl der flexiblen Verpackungen aus Monofolien, d.h. einschichtige Folienbahnen aus einer Polymersorte bzw. Mischungen mehrerer mischbarer Polymersorten, sogenannten Blends. Insbesondere bei Lebensmitteln, welche hohe Anforderungen an den Schutz des Packguts vor Umwelteinflüssen wie Licht oder Sauerstoff stellen (z.B. Fleisch, Wurst, Fisch und Molkereiprodukte), kommen meist Verbundfolien zum Einsatz ([DEE+08], [N.N.10a]). Durch den schichtweisen Verbundaufbau lassen sich unterschiedliche Eigenschaften kombinieren, was dazu führt, dass der Gesamtverbund höheren Anforderungen genügt. Der Marktanteil der Verbundfolien ist dabei stetig steigend [Pea08]. Ursachen dafür liegen im wachsenden Verbraucherbewusstsein für Nahrungsmittelherkunft und deren Bestandteile (ohne Zusatzstoffe) einerseits und dem gleichzeitigen Wunsch nach möglichst einfachem Gebrauch (lange Haltbarkeit und verzehrfertiges Essen) andererseits [GAF+12]. Dadurch steigen die Anforderungen an Lebensmittel und deren Verpackungen, was zu einer vermehrten Nutzung von einsatzoptimierten Verbundfolien führt.

1.4 Ultraschallfügen

1.4.1 Entwicklung der Ultraschalltechnik

Der Begriff Schall beschreibt generell eine mechanische Schwingung in elastischen Medien und kann in jedem der drei klassischen Aggregatzustände auftreten. Schwingungen mit Frequenzen oberhalb der akustischen Wahrnehmung des menschlichen Gehörs (16 Hz – 16 kHz) werden entsprechend [DIN 1320] als Ultraschall bezeichnet. Bei Frequenzen von über 1 GHz wird teilweise von Hyperschall gesprochen. Schwingungen im Ultraschallbereich werden von unterschiedlichen Lebewesen zur Ortung und Kommunikation genutzt und auch die erste künstliche Erzeugung von Ultraschallwellen durch den Menschen sollte ursprünglich der Ortung von Eisbergen dienen. Diese konnten mit dem 1931 patentierten Echolot zwar nicht geortet werden, aber die Technologie wurde im zweiten Weltkrieg zur Ortung von Schiffen verwendet, weiterentwickelt und nach Ende des Weltkriegs sehr unterschiedlich genutzt [Her10]. Die anschließende Entwicklung lässt sich in zwei verschiedene Richtungen unterteilen: den passiven Ultraschall (sog. Messschall) der in unterschiedlichsten Anwendungen zur Diagnose, Materialklassifizierung, Radar und Signalübertragung eine Rolle spielt und den aktiven Ultraschall (sog. Leistungsschall). Bei diesem werden vor allem hohe Energiedichten für verschiedene Anwendungen in Gebieten der Metallurgie (Entgasen von Schmelzen), Energiewirtschaft (Reinigung von radioaktiv belasteten Bauteilen), Medizin (Zerstörung von Tumorgewebe und Schweißen von Knochen), Biologie (Aufschließen von Zellen) und Pharmazie (Zerstäubung von Wirkstoffen) [Mat62], [Wod04] genutzt.

Im Bereich der Verarbeitungsmaschinen, sowie der Fertigungstechnik wird Ultraschall für die unterschiedlichsten Verarbeitungsaufgaben genutzt. So z.B. für das Schneiden [Zah09] und Veredeln von Lebensmitteln, zum Prägen oder Laminieren [Pas12] von bahnförmigen Gütern und zum Schweißen von Bauteilen aus Metall [SG08] oder Kunststoff [Pot04]. Außerdem existieren wissenschaftliche Untersuchungen zum Glätten von Papier [Wan10]. Das Fügen von Kunststoff mittels Ultraschall beschränkte sich zunächst auf Anwendungen mit spritzgegossenen Formteilen. Das erste Patent wurde 1948 von CARWILE in den USA angemeldet, indem er sich bereits zum Ultraschallschweißen von Packmitteln äußert. Das erste Patent in Deutschland wurde 1952 von

1.5 Prozessüberwachung in Verarbeitungsmaschinen

Während des Lebenszyklus von technischen Anlagen kommt es zu Verfallserscheinungen infolge von Alterung, Verschleiß und Umwelteinflüssen [Str12]. Insbesondere bei Produktionsanlagen von Massenbedarfsgütern mit hohen Ausbringungen besteht dadurch die Gefahr von ungeplanten Produktionsausfällen welche ein hohes wirtschaftliches Risiko darstellen. Durch entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen [DIN 31501] wird versucht dieses Risiko zu minimieren. Je nach Maschinentyp und unter Einbeziehung von Kosten- und Sicherheitsaspekten kommen unterschiedliche Instandhaltungsstrategien zur Anwendung, die teils gesetzlich geregelt sind. Instandhaltung kann entweder reaktiv erfolgen, also auf einen Ausfall reagieren, oder präventiv durchgeführt werden. Die präventive Instandhaltung unterscheidet sich weiter in periodisch vorbeugende, vorausschauende und zustandsorientierte Maßnahmen. Die beiden letztgenannten Strategien basieren auf sensortechnischer Zustandsüberwachung der Maschine, sogenanntes Condition Monitoring ([Die14], [Sch10a], [Mat02]).

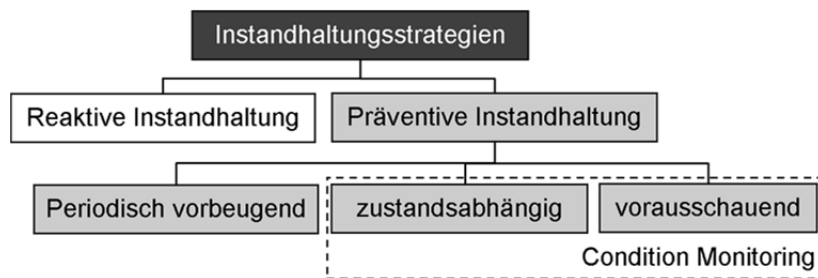


Abbildung 1-5: Instandhaltungsstrategien nach [Die14], [Sch10a], [Mat02]

Beim Condition Monitoring wird der Zustand kritischer Maschinenbestandteile überwacht, bzw. aus Produkt-, Prozess- und Maschinendaten auf den Zustand der Maschine rückgeschlossen. Dies kann mit Hilfe von Messtechnik im laufenden Betrieb oder periodisch im Maschinenstillstand erfolgen. Das Condition Monitoring erlaubt daher eine bedarfsorientierte Wartung wodurch Zeit und Kosten für den Wartungsvorgang minimiert werden können [Kap07].

Bei Verarbeitungsmaschinen wird die Produktqualität neben dem Maschinenzustand auch von den spezifischen Eigenschaften der Verarbeitungsgüter beeinflusst. Die verarbeitungsrelevanten Eigenschaften der Ausgangsstoffe sind aber häufig unbekannt und nur schwer zu ermitteln. Zusätzlich stehen diese in komplexen Wechselwirkungen zueinander weshalb die Modellbildung erschwert wird [GM15]. Die sensortechnische Prozessüberwachung dient in diesem Fall auch der Prozesssteuerung also der Anpassung der Verarbeitungsparameter zur Gewährleistung der Produktqualität.

Häufig lassen sich die betreffenden Produktqualitätsmerkmale nicht direkt oder nur zerstörend prüfen, weshalb Ansätze zur indirekten Analyse über die Messung von Prozessdaten einen wichtigen Schritt zur Optimierung, Weiterentwicklung und Qualitätsprüfung verarbeitungstechnischer Systeme darstellen.

2. Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Verarbeitungsvorgang Ultraschallsiegeln

Aus Sicht der Verarbeitungstechnik sind Verarbeitungsvorgänge beeinflusst von der Wechselwirkung zwischen Verarbeitungsgut und Arbeitsorgan (in diesem Fall das Werkzeug). Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich zunächst mit den zu verarbeitenden thermoplastischen Kunststoffen und anschließend mit dem dabei verwendeten Verarbeitungsverfahren (Fügen). In weiteren Abschnitten werden die eingesetzte Prozesstechnik, Störeinflüsse des Fügevorgangs und die Prozessüberwachung betrachtet. Zum besseren Verständnis ist es eingangs notwendig, das Verfahren kurz zu beschreiben.

Das Fügen von Kunststoffen ist einer der wichtigsten Verarbeitungsvorgänge für Kunststoffhalbzeuge neben dem Urformen und Umformen. Insbesondere für Verpackungsvorgänge mit flexiblen Kunststofffolien als Packmittel wird der hermetische Verschluss der Verpackung durch mindestens eine stoffschlüssige Schweißverbindung nach dem Abfüllen des Packgutes in die Packung erzeugt. Als Schweißen bezeichnet man das stoffschlüssige Verbinden von thermoplastischen Kunststoffen unter Anwendung von Wärme und Druck [DIN 1910-3], wohingegen der Begriff Siegeln das stoffschlüssige Fügen einzelner Schichten zweier Verbundwerkstoffe beschreibt [BLM14]. Beim Siegeln wird das Verbundmaterial nicht vollständig aufgeschmolzen, sondern nur die thermoplastische Siegelschicht beider Fügepartner stoffschlüssig gefügt. Im Bereich des Formteilmügens werden in der Regel Halbzeuge aus Monomaterialien verwendet, weshalb man in dem Bereich vom Ultraschallschweißen spricht. Verpackungsmaterialien für Lebensmittel sind oft Verbundaufbauten, deshalb wird im Zusammenhang mit Verpackungsfolien vom Siegeln gesprochen, unabhängig davon, ob tatsächlich Verbundfolien gefügt werden. Im Rahmen dieser Arbeit meint der Begriff Ultraschallsiegeln daher das thermische Fügen von dünnen, bahnförmigen Kunststofffolien. Die zum Siegeln notwendige thermische Energie wird direkt im Material erzeugt und nicht durch beheizte Werkzeuge von außen aufgebracht. Dazu werden die Folien mittels eines schwingenden Werkzeuges zyklisch verformt und wandeln aufgrund ihrer spezifischen Materialeigenschaften die aufgezwungene Bewegungsenergie in Wärme um. Das Werkzeug schwingt mit sehr hoher Frequenz (z.B. 35 kHz) und sehr kleinen Amplituden (z.B. 15 µm). Die dissipierte thermische Energie ist dabei so groß, dass die Materialien bis oberhalb ihrer Schmelztemperatur erwärmt werden und sich dadurch thermisch fügen lassen. An einer Ultraschallsiegeleinrichtung können folgende maßgeblichen Schweißparameter variiert werden:

- Siegelkraft (mit der die Werkzeuge gegen die zu siegelnden Folien gespannt werden)
- Schwingamplitude (des Werkzeugs)
- Siegelzeit oder Siegelenergie (Abschaltkriterium: Dauer der Schwingung / verbrauchte Energie)

Je nach verwendetem Equipment können auch weitere Parameter variiert werden. Diese gelten aber nicht als Schweißparameter, weil sie entweder Vorgänge nach dem eigentlichen Schweißprozess beeinflussen (z.B. Haltezeit), oder die oben genannten zusätzlich beeinflussen, (z.B. Triggerkraft, Amplitudenverlauf).

Das Ultraschallsiegeln hat eine Reihe verfahrensspezifischer Vor- und Nachteile gegenüber dem weiter verbreiteten Wärmekontaktsiegelverfahren³, wodurch es für spezielle Anwendungen besser geeignet ist. Die Fügwerkzeuge beim Ultraschallsiegeln sind nicht beheizt und haben deshalb nur geringen Einfluss auf hitzeempfindliches Packgut (z.B. bestimmte Pharmazeutika, Gefrierkost), wobei sich bei kontinuierlichen Prozessen, durch die Abwärme aus der Siegelnaht, die Werkzeuge trotzdem deutlich erwärmen. Die Siegelzeiten beim Ultraschallverfahren sind deutlich geringer, weil die Erwärmung direkt im Material stattfindet. Das macht sich vor allem bei sehr dicken oder thermisch schlecht leitenden Packmitteln bemerkbar [Fis09]. Für das Siegeln von Verpackungen an denen Packgut im Nahtbereich haftet eignet sich diese Technologie durch die oszillierende Werkzeugbewegung, die relativ spitze Werkzeugkontur und den verfahrensbedingten Polymerschmelzfluss aus der Nahtmitte zum Rand. Ein von Herstellerseite häufig genannter Vorteil beim Ultraschallsiegeln ist die Energieeinsparung gegenüber dem Wärmekontaktsiegelverfahren, weil nur dann Energie zum Fügen aufgewendet wird, wenn tatsächlich gesiegelt wird ([Hue11], [Fis09], [Wie10]). Die Werkzeuge des Wärmekontaktverfahrens werden hingegen dauerhaft beheizt und verbrauchen dadurch auch Energie in den Zeiten eines Maschinentaktes, in denen nicht gesiegelt wird, bzw. bei Stillstand der Maschine. BACH ET AL. haben hingegen festgestellt, dass die energetischen Vorteile nicht allgemeingültig sind, sondern von einer Reihe von Faktoren abhängen. So ist Ultraschallsiegeln vor allem bei dicken Packstoffen und geringen Ausbringungen das energetisch günstigere Verfahren [BTM12]. Als Nachteile des Ultraschallsiegeln müssen die hohe technische Komplexität des Verfahrens und seine Anschaffungskosten genannt werden.

2.2 Thermoplastische Kunststoffe

2.2.1 Einordnung

Ausgehend von der chemischen Unterteilung in organische und anorganische Werkstoffe werden Kunststoffe den organischen, kohlenstoffbasierten Materialien zugeordnet. Eine weitere Unterteilung von Werkstoffen kann in natürliche und synthetisierte Materialien erfolgen (siehe Abbildung 2-1). Kunststoffe sind demzufolge kohlenstoffbasierte Werkstoffe, die synthetisch mittels chemisch-technischer Prozesse erzeugt werden und als wesentlichen Bestandteil Makromoleküle enthalten [Kai07], [Mic06]. Der Begriff Polymer wird im Zusammenhang mit Kunststoffen häufig als Synonym verwendet und beschreibt den kettenförmigen, molekularen Aufbau dieser Stoffe. Polymere sind Kettenmoleküle, die aus einer Vielzahl aneinandergereihter Monomeren bestehen. Dieser polymere Kettenaufbau ist aber auch bei nicht synthetischen Materialien vorzufinden, so z.B. Cellulose und Stärke. Kunststoffe können durch die chemischen Prozesse Polykondensation, Polyaddition und Polymerisation synthetisiert werden ([Ehr08], [Mic06]).

³ Beim Wärmekontaktsiegeln werden die Folien mit beheizten Werkzeugen von außen erwärmt und mittels Druck miteinander gefügt (s. Kap.2.3.1).

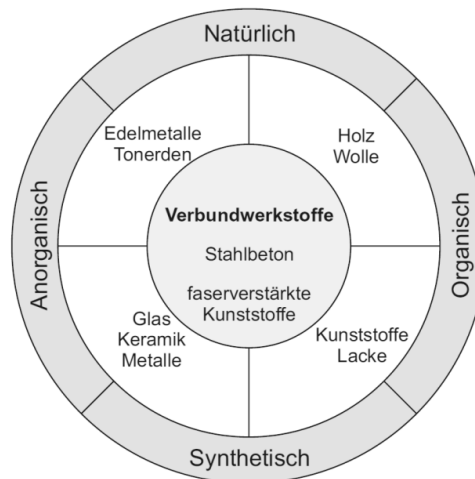


Abbildung 2-1: Einteilung der Werkstoffe in Klassen [Kai07]

Auf die genauen chemischen Abläufe zur Synthese von Polymeren soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da dies keinen Beitrag zum Verständnis der Arbeit darstellen würde. Einzig die sogenannte Metallocen-Katalyse soll genannt werden, da im Folgenden der Begriff der Metallocen-Materialien Verwendung finden wird. Damit werden Materialien benannt, bei deren chemischen Herstellungsprozess sog. Metallocene (metallorganische Verbindungen) als Katalysatoren genutzt wurden. Mit Hilfe dieses Herstellungsverfahrens lassen sich Polymere mit chemisch höherer Reinheit synthetisieren, deren Eigenschaften sehr viel genauer gesteuert und gezielt eingestellt werden können [Mai99], [N.N.03]. Die Vorteile dieser Materialien im Bereich der flexiblen Verpackungen sind u.a. bessere Eignung für Siegelung durch Packgut, höhere Warmnahtfestigkeiten und niedrigere Schmelztemperaturen [RMA00].

Unterteilt man Kunststoffe nach ihren mechanisch thermischen Eigenschaften, so gibt es generell drei unterschiedliche Gruppen von Kunststoffen [Pot04]:

- Thermoplaste oder Plastomere
- Duroplaste oder Duromere
- Elastomere oder Elaste

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich thermoplastische Kunststoffe betrachtet, weil aufgrund ihrer Eigenschaften lediglich diese Gruppe für Verpackungsanwendungen in Frage kommt. Insbesondere reversible und wiederholbare thermische Umform- und Fügeprozesse sind mit Duroplasten und Elastomeren nicht realisierbar [Wit06], [Mic06].

2.2.2 Makromolekularer Aufbau

Thermoplastische Kunststoffe, auch Thermoplaste genannt, sind Materialien, die sich im warmen Zustand sehr einfach plastisch verformen lassen. Dieser Vorgang ist reversibel und kann beliebig oft wiederholt werden, sofern die Zersetzungstemperatur des Kunststoffs nicht überschritten wird. Thermoplaste bestehen aus Makromolekülen, die linear oder verzweigt angeordnet sein können und durch Nebenvalenzkräfte und Verschlaufungen zusammengehalten werden [Pot04]. Thermoplaste

werden hinsichtlich ihres Ordnungszustandes in zwei Gruppen unterteilt: teilkristalline und amorphe Kunststoffe [Kai07]. Letztere haben im festen Zustand eine unregelmäßige, knäueiförmige Kettenstruktur, während teilkristalline Kunststoffe auch Teilbereiche aufweisen, die eine Kristallstruktur besitzen (siehe Abbildung 2-2). Typische amorphe Kunststoffe sind z.B. Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polycarbonat (PC), Polymethylmethacrylat (PMMA, Plexiglas), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC). Zu den teilkristallinen Kunststoffen zählen Polyamiden (PA), Polyethylen (PE-LD, PE-LLD, PE-HD) oder Polypropylen (PP) [Hei13]. Es gibt auch Polymere, die in beiden Ordnungszuständen hergestellt werden können, wie z.B. Polyethylenterephthalat (PET). Die beiden Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer physikalischen, chemischen und thermischen Eigenschaften, die auf den unterschiedlichen molekularen Aufbau zurückzuführen sind.



Abbildung 2-2: Schematischer Aufbau und Anordnung der Makromolekülketten bei (a) amorphen und (b) teilkristallinen Thermoplasten [Pot04]

Die Eigenschaften von Thermoplasten sind sehr stark temperaturabhängig. Jeder Thermoplast hat eine spezifische Glasübergangstemperatur unterhalb derer die Kettenmoleküle unbeweglich sind und der Kunststoff deshalb in einem starren, harten und sprödelastischen Zustand vorliegt ([Kai07], [Ehr08]). Bei Erwärmen des Kunststoffs und Überschreiten der spezifischen Glasübergangstemperatur werden die Polymerketten gegeneinander beweglich, der Schubmodul nimmt ab und der Kunststoff wird zunehmend elastischer. Bei Kunststoffen mit teilkristalliner Ordnungsstruktur wird bei Erwärmung bis über die Glasübergangstemperatur jedoch zunächst nur die amorphe Phase beweglich, während die kristallinen Bereiche weiter unbeweglich bleiben. Aufgrund der vorliegenden zwei Phasen mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften besitzen teilkristalline Kunststoffe eine hohe Zähigkeit (aufgrund amorpher Beweglichkeit) bei gleichzeitig hoher Festigkeit (aufgrund der Kristalle) [Mic06]. Bei weiterer Erwärmung erreichen teilkristalline Thermoplaste ihre sogenannte Schmelztemperatur. Dabei handelt es sich genau genommen um einen Schmelztemperaturbereich in dem die kristallinen Anteile aufgeschmolzen werden und der Schubmodul weiter absinkt. Oberhalb dieser Kristallitschmelztemperatur ist das Polymer dann vollständig fließfähig. Bei weiterer Erwärmung und dem Erreichen der polymerspezifischen Zersetzungstemperatur werden die Bindungskräfte zwischen den Molekülen aufgebrochen und damit das Polymer zerstört. Der Temperaturbereich in dem Thermoplaste genutzt werden können liegt unterhalb der Schmelztemperatur [Kai07]. Das Vorhandensein zweier Phasen in einem Temperaturbereich oberhalb der Raumtemperatur ist die Ursache für die hohe Elastizität unterhalb der Schmelztemperatur und die hohe Viskosität im Schmelzbereich. Diese speziellen Eigenschaften sind eine der Ursachen für die weite Verbreitung der teilkristallinen Thermoplaste. Amorphe Thermoplaste müssen außerdem unter Formzwang abgekühlt werden, da diese das Bestreben haben, sich in ihren Ausgangszustand zurück zu verformen [Sae01]. Beides sind Gründe, warum im Bereich

der flexiblen Verpackungen heute ausschließlich teilkristalline Kunststoffe gefügt werden und im folgenden Kapitel daher nur noch auf teilkristalline Thermoplaste eingegangen wird.

2.2.3 Siegelpolymere

Innerhalb der teilkristallinen Thermoplaste gibt es unterschiedliche Polymerfamilien, von denen fast ausschließlich Polyolefine zum Siegeln von flexiblen Verpackungen im Lebensmittelbereich verwendet werden.

In der Vergangenheit wurde auch amorphes PVC eingesetzt, welches heute kaum noch genutzt wird. Denn dieses flexibles PVC hat einen sehr hohen Weichmacheranteil und die früher dafür eingesetzten Chemikalien stehen im Verdacht in das Packgut zu migrieren und krebserregend zu sein [Nen06]. Ein weiterer Kritikpunkt ist die Freisetzung von Chlorwasserstoffen und Dioxinen bei der thermischen Verwertung von PVC in Müllverbrennungsanlagen [SCH04].

Im Bereich der starren Verpackungen wird neben PET, PA, PC und PS auch weichmacherfreies PVC eingesetzt, um daraus z.B. Blister, Becher und Schalen herzustellen. Diese starren Verpackungen können mit Deckelfolien verschlossen werden, die mit sog. Siegelacken beschichtet sind. Diese Lacke sind komplexe Stoffgemische, die auf verschiedenen Polymerarten oder teilweise auch anderen Werkstoffklassen kleben. Das Fügen mit Siegelacken wird zwar als Siegeln bezeichnet, ist jedoch kein stoffschlüssiges, thermisches Fügen gleichartiger Partner, sondern muss als thermisch aktiviertes Kleben angesehen werden [Hab09]. Siegelacke sind daher kein Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Zu den als Siegelpolymer verwendeten Polyolefinen zählen hauptsächlich PE und PP, vereinzelt auch Ethylen-Copolymere (z.B. Ethylen-Vinylacetat (EVA), Ethylen-Acrylsäurecopolymere (EAA)) und Ionomere. Innerhalb des PE wird in drei Typen unterschieden: PE hoher Dichte (PE-HD, high density), PE niedriger Dichte (PE-LD, low density) und lineares PE niedriger Dichte (PE-LLD, linear low density). Bei PE steigt die Steifigkeit mit steigender Dichte, weshalb PE-HD bei starren Packmitteln eingesetzt wird und für das Siegeln flexibler Packmittel nur PE-LD und PE-LLD genutzt werden. PE-LLD hat aufgrund seiner weniger verzweigten Molekülstruktur einen höheren Kristallitanteil als PE-LD und dadurch bessere mechanische Eigenschaften und eine etwas höhere Schmelztemperatur [Kai07]. PP hat im Vergleich zu PE eine geringere Dichte, eine tendenziell höhere Festigkeit und eine höhere Schmelztemperatur. Dadurch kann es bei höheren Verarbeitungstemperaturen, wie z.B. beim Hitzesterilisieren verwendet werden, versprödet aber unter 0 °C und ist daher für Tiefkühlprodukte ungeeignet [Ahl97].

Neben den Polyolefinen gibt es weitere teilkristalline Thermoplaste wie z.B. teilkristallines PA oder PET, die jedoch zum Siegeln ungünstige Eigenschaften (hohe Schmelztemperatur und dadurch hoher Energiebedarf zum Siegeln) haben oder zu teuer sind [Ahl97].

Für die einzelnen Polymertypen gibt es eine große Anzahl von Polymerherstellern, die wiederum jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Sorten der einzelnen Polymertypen anbieten und sich in ihren Eigenschaften unterscheiden können. Diese Vielzahl wird durch die verwendeten Polymerblends (Mischungen verschiedener Polymertypen) der Packmittelhersteller zusätzlich vergrößert. Daher

gibt es eine unüberschaubare Anzahl verschiedener Packstoffe, deren eindeutige Identifikation praktisch sehr schwierig ist.

2.2.4 Relevante Eigenschaften für das Ultraschallsiegeln von Kunststoffen

Da beim Ultraschallsiegeln als thermisches Fügeverfahren die zu verbindenden Materialien geschmolzen werden und wieder erstarren, sind die folgenden Eigenschaften relevant:

- das Materialverhalten im festen Aggregatzustand (i)
- die beiden Phasenübergänge (ii_a) fest -> flüssig, (ii_b) flüssig -> fest
- das Materialverhalten im schmelzflüssigen Aggregatzustand (iii)

Die konkreten Auswirkungen unterschiedlicher Eigenschaften beim Ultraschallsiegeln werden anhand des Verfahrensablaufs erläutert (s. Kap. 2.3.2.2). Sehr umfangreiche Untersuchungen zum Siegeln von Verpackungsfolien mit dem Ultraschallverfahren wurden von BACH durchgeführt [Bac14]. Es gibt außerdem eigene Vorarbeiten zu der Thematik, die zum größten Teil mit BACH gemeinsam publiziert wurden.

(i) Materialverhalten als Festkörper

Das Materialverhalten von thermoplastischen Kunststoffen kann mit Hilfe eines viskoelastischen Materialmodells beschrieben werden. Dies ist eine Mischung aus ideal-elastischem und ideal-viskosem Modellverhalten. Bei Materialien mit ideal-elastischem Verhalten tritt bei einer aufgetragenen Verformung die maximale Spannung zeitgleich zum Maximum der Verformung auf, während bei ideal-viskosen Materialien die maximale Spannung zeitgleich mit der maximalen Verformungsgeschwindigkeit auftritt. Spannung und Verformung sind bei ideal-viskosen Materialien daher um den Phasenwinkel von 90° verschoben. Bei einer oszillierenden Beanspruchung eines viskoelastischen Materials verlaufen Spannung und Dehnung mit einem Phasenversatz zwischen 0° und 90° , was in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm als Hysterese zu erkennen ist (siehe Abbildung 2-3) [BB08].

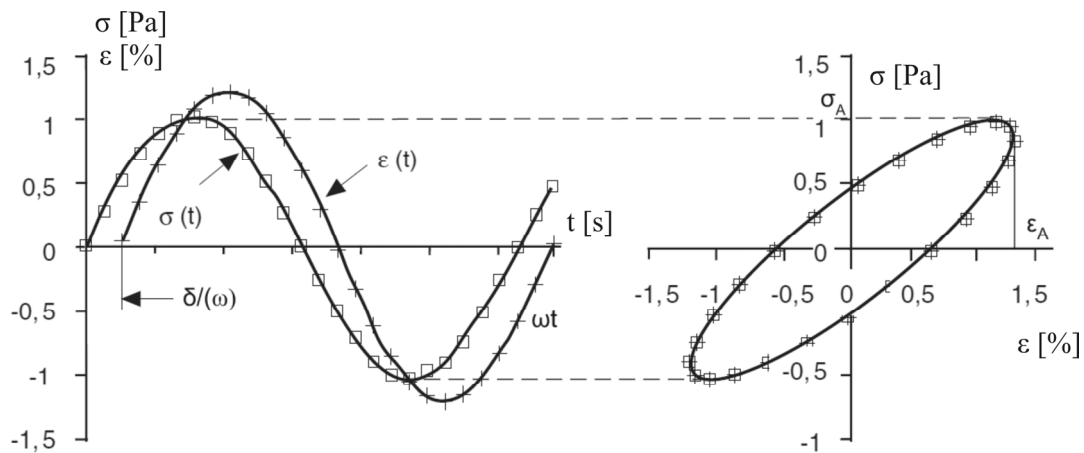


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Spannung und Dehnung bei linear-viskoelastischem Materialverhalten links) zeitlicher Phasenversatz und rechts) entsprechende Hysteresekurve aus [DE06]

Das bedeutet, dass die zum Verformen aufgewendete Energie nur zu einem Teil wieder abgegeben wird und der übrige Teil im Material dissipiert, also z.B. in Wärme umgewandelt wird. Durch den Phasenversatz ist der E-Modul als Quotient aus Spannung und Dehnung eine komplexe Größe und wird entsprechend [DIN EN ISO 6721-1] als komplexer E-Modul E^* bezeichnet und kann mit (1) berechnet werden.

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A} \quad (1)$$

Er setzt sich entsprechend (2) aus Speichermodul E' und Verlustmodul E'' zusammen.

$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2} \quad (2)$$

Der Speichermodul E' (3) beschreibt den Anteil des elastischen Materialverhaltens und E'' (4) den viskosen, also dissipativen Anteil.

$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos \delta \quad (3)$$

$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin \delta \quad (4)$$

Der Quotient aus Verlustmodul und Speichermodul wird als mechanischer Verlustfaktor $\tan \delta$ (5) bezeichnet, wobei δ dem Phasenwinkel zwischen Spannung und Dehnung entspricht.

$$\tan \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} \quad (5)$$

Ein großer mechanischer Verlustfaktor kennzeichnet also ein Material, das sehr viel Verformungsenergie in Wärme umwandeln kann. Dieser Materialkennwert wird auch als mechanische Dämpfung bezeichnet [DEE+08] und kann mittels der Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA) ermittelt werden. Bei diesem Prüfverfahren wird eine Probe zyklisch belastet und

der Phasenversatz zwischen Spannungs- und Verformungssignal gemessen. Die Dämpfung ist temperatur- und frequenzabhängig und je nach Polymer sehr unterschiedlich [DBT13]. Weil bei einer Erwärmung die viskosen Materialeigenschaften zunehmen, steigt die Dämpfung mit größer werdender Temperatur, d.h. das Material wandelt immer besser Energie, je wärmer es wird. Derzeitige DMA-Prüfgeräte können den Verlustfaktor in Druckrichtung nur für Frequenzen bis ca. 100 Hz messen ([DIN EN ISO 6721-1]), weshalb das tatsächliche Materialverhalten bei den höheren Frequenzen des Ultraschallsiegelns mittels Zeit-Temperatur-Verschiebungsmethoden approximiert werden muss [Ben87]. Die Untersuchung von Methoden zur Bestimmung der Dämpfung bei sehr hohen Frequenzen ist Thema einiger Veröffentlichungen ([ALG69], [ALST97]), jedoch liegen die untersuchten Frequenzen teilweise mehrere Größenordnungen oberhalb der Arbeitsfrequenz des Ultraschallsiegelns. Die DMA erfolgt im linear viskoelastischen Bereich, d.h. im Bereich sehr kleiner Amplituden, sodass keine plastische, bleibende Verformung auftritt. Um verlässlichere Werte für die Dämpfungseigenschaften von Polymeren zu erhalten, wurde verschiedentlich die direkte Messung mit Hilfe der Ultraschallfügetechnik untersucht ([TD10], [Bar88]).

(ii_a) Phasenübergang fest -> flüssig

Für die Beschreibung des Schmelzverhaltens eines teilkristallinen, thermoplastischen Kunststoffes sind vor allem die Schmelztemperatur und die Schmelzenthalpie relevante Kenngrößen. Die teilkristallinen Kunststoffe besitzen genau genommen einen Schmelztemperaturbereich, in dem die Phasenumwandlung der kristallinen Anteile in den amorphen Zustand stattfindet. Beim Erwärmen des Kunststoffes muss für den Phasenübergang zusätzliche Energie zugeführt werden, die sogenannte Schmelzenthalpie [ERT03]. Beide Eigenschaften können mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) bestimmt werden. Dabei wird die Temperatur einer Materialprobe kontinuierlich erhöht und gleichzeitig gemessen, wieviel Wärmeenergie der Probe zugeführt werden muss. Im Bereich der Phasenübergänge kommt es durch die endo- oder exothermen Vorgänge zu Unstetigkeiten im Wärmestromverlauf, die entsprechend des Phasenwechsels, z.B. als Schmelzpeak bezeichnet werden. Ein solcher Peak ist beispielhaft in Abbildung 2-4 dargestellt. Anhand des ermittelten Wärmestromverlaufs lässt sich entsprechend [DIN EN ISO 11357-1], die für die Phasenumwandlung benötigte Energie (Phasenübergangsenthalpie ΔH) berechnen, welche dem Flächeninhalt des Peaks, bezogen auf die Basislinie entspricht. Weiterhin lassen sich daran ablesen: die Anfangs- und Endtemperatur des Phasenübergangs und die Peaktemperatur. Die Anfangstemperatur (am Beispiel des Schmelzpeaks) T_{im} ist die Temperatur, bei der die kleinsten Kristalle zu schmelzen beginnen. Mit steigender Temperatur schmelzen immer größere Kristalle. Beim Erreichen der Peaktemperatur T_{pm} schmelzen die meisten Kristalle und das Material ist mehrheitlich aufgeschmolzen. Der Aufschmelzvorgang aller kristallinen Anteile des Kunststoffes ist bei Erreichen der Endtemperatur T_{fm} abgeschlossen, das Material ist dann vollständig geschmolzen und amorph [ERT03].

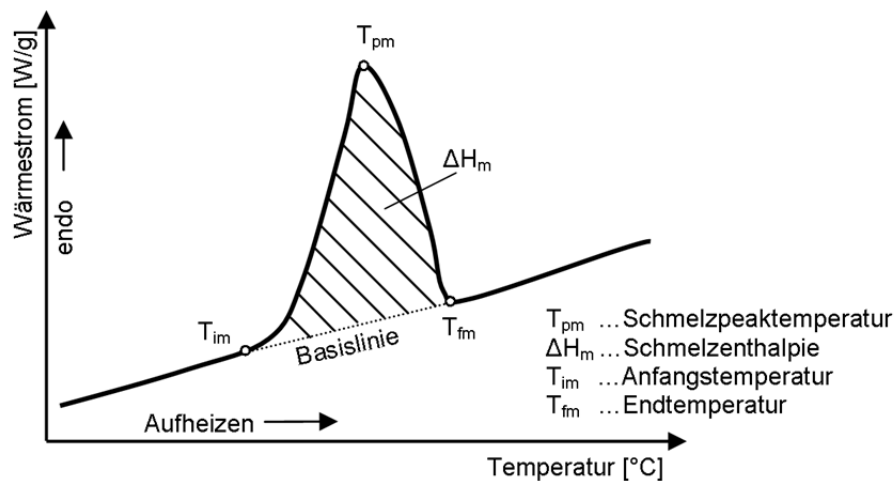


Abbildung 2-4: Charakteristische Temperaturen im Thermogramm eines Schmelzvorgangs entsprechend [DIN EN ISO 11357-1] nach [ERT03]

Anhand der Anfangs- und Endtemperatur kann deshalb auch auf die Kristallitgrößenverteilung des Materials rückgeschlossen werden. Innerhalb eines bestimmten Polymertyps sind diese Schmelzpeaks u.a. von Rohstoffsorte, Herstellungsbedingungen und Verarbeitung abhängig und unterschiedlich, weshalb diese Testmethode auch zur Materialcharakterisierung eingesetzt wird [FS06].

Das Erwärmen des Kunststoffes führt schon während der Phasenumwandlung dazu, dass sich das Material zunehmend viskoser verhält, weil vor allem die schmelzenden kristallinen Anteile für den elastischen Teil des Materialverhaltens maßgeblich sind. Das Fließverhalten eines Materials wird mit Hilfe der dynamischen Viskosität beschrieben.

(iii) Eigenschaften der Polymerschmelze

Mit Hilfe der dynamischen Viskosität eines Materials wird dessen Fließverhalten beschrieben, welches von der Temperatur und der Schergeschwindigkeit abhängig ist [Kai07]. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität und im Bereich des Phasenübergangs kommt es zu einem starken Viskositätsabfall durch das Schmelzen der kristallinen Bereiche. Geschmolzene Thermoplaste haben ein strukturviskoses Verhalten, d.h. mit steigender Schergeschwindigkeit sinkt die Viskosität [TG06]. Die Siegelpolymere unterscheiden sich hinsichtlich ihres Fließverhaltens vor und nach dem Schmelzen und insbesondere darin, wie stark sich das Fließverhalten während des Schmelzens verändert. Beim Erstarren erhöht sich die Viskosität in einem Temperaturbereich unterhalb des Schmelztemperaturbereichs (siehe Abbildung 2-5) und wird durch das Wachstum der kristallinen Bereiche verursacht.

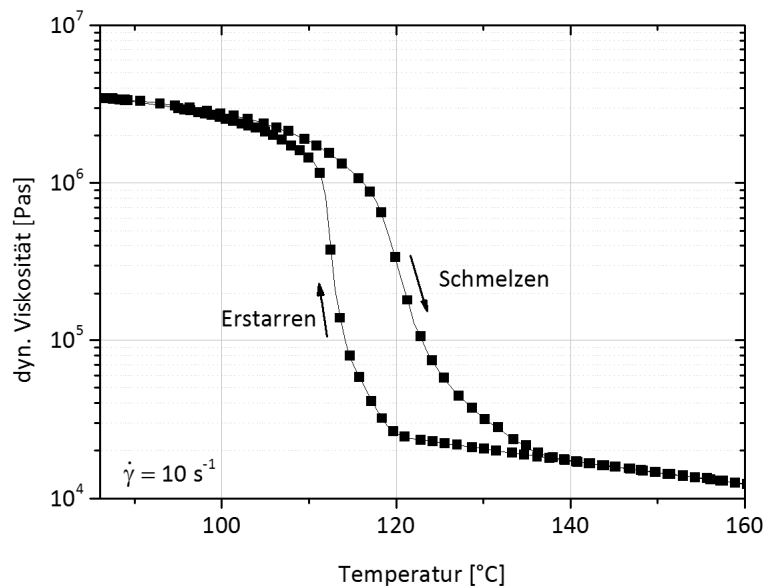


Abbildung 2-5: Verlauf der dynamischen Viskosität im Bereich des Phasenübergangs eines PE-LLD

Die dynamische Viskosität kann analog zum E-Modul als komplexe Größe betrachtet werden, aus der Speicher- und Verlustmodul sowie der Verlustfaktor $\tan \delta$ ermittelt werden können. Für die Energiewandlung von Verformungsenergie in thermische Energie sind vor allem die viskosen Materialanteile verantwortlich, weshalb die teilkristallinen Thermoplaste im geschmolzenen, viskosen Zustand grundsätzlich besser Energie wandeln können, als im festen, viskoelastischen Zustand [ERT03].

(ii_b) Phasenübergang flüssig -> fest

Beim Erstarren der Kunststoffe aus dem geschmolzenen in den festen Zustand sind zunächst die gleichen Eigenschaften und Eigenschaftsänderungen maßgeblich wie beim Schmelzen (ii_a). Beim Abkühlen und Erstarren von teilkristallinen Polymeren kommt es zum sogenannten Unterkühlen, d.h. die Erstarrung zu kristallinen Strukturen findet in einem niedrigeren Temperaturbereich statt, als das Aufschmelzen dieser Strukturen. Dies führt bei der DSC-Messung von Aufheiz- und Abkühlverhalten zu einer Temperaturdifferenz zwischen Schmelzpeak und Erstarrungspeak und den jeweiligen Peaktemperaturen (siehe Abbildung 2-6).

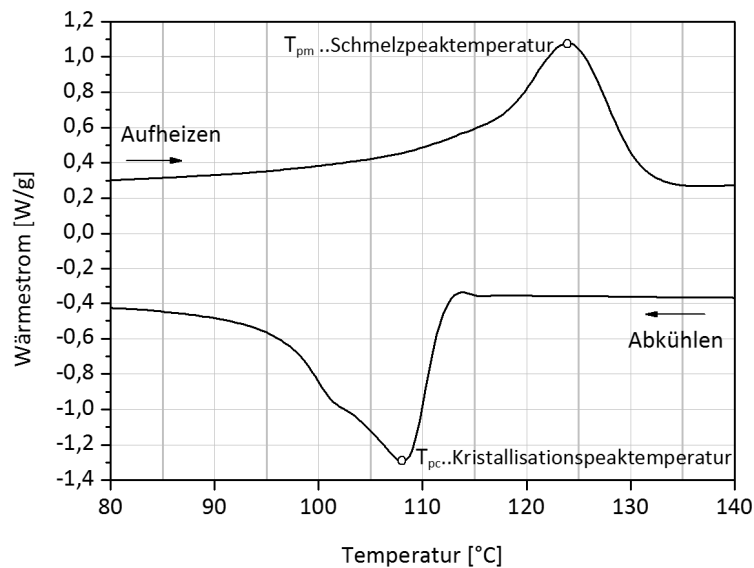


Abbildung 2-6: DSC-Messung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs bei PE

Zusätzlich ist beim Erstarren das Relaxationsverhalten bzw. die Relaxationszeit eine weitere wichtige rheologische Eigenschaft, die einen Einfluss auf das Ultraschallsiegeln hat und von BACH genauer untersucht wurde [Bac14]. Der energetisch günstigste Zustand der polymeren Kettenmoleküle liegt vor, wenn diese sich als Knäuel unregelmäßig orientieren können [Kai07]. Durch Fließvorgänge werden diese Moleküle jedoch verstreckt und orientieren sich entlang der Fließrichtung [Ehr08]. Die Relaxationszeit eines Materials beschreibt dabei die Zeit, in der sich die verstreckten Polymerketten wieder zu Knäueln zusammenziehen, bzw. relaxieren können. Bei Materialien mit kurzen Relaxationszeiten können sich die Polymerketten beim Fügen außerdem besser verschlaufen [SÖA11].

2.2.5 Flexible Packmittel

2.2.5.1 Definition

Als Packmittel bezeichnet man diejenige Verpackungskomponente, die den Hauptbestandteil einer Verpackung darstellt. Dies sind offene oder geschlossene Hohlkörper, in denen sich das Packgut befindet [BLM14]. Packmittel können formstabil (z.B. Flaschen oder Dosen) oder flexibel (z.B. Beutel und Tuben) sein [Ahl97]. Als Packstoffe werden die Materialien bezeichnet, aus denen Packmittel hergestellt werden [DIN 55405]. Flexible Packmittel können transparent, opak, eingefärbt oder bedruckt sein und haben typischerweise Dicken zwischen 10 und 500 μm [GK82]. Um Material und damit Kosten zu sparen wird versucht, immer dünnere Folien zu verarbeiten. Für die Erzeugung von Verpackungen aus flexiblen Packmittelbahnen unter Einsatz von Siegelnähten muss das Packmittel mindestens eine thermoplastische, siegelbare Kunststoffschicht aufweisen.

2.2.5.2 Formen

Aus bahnförmigen Packstoffen lassen sich unterschiedliche Arten von flexiblen Packmitteln herstellen. Arten, die ohne das Herstellen einer Siegelnaht auskommen (z.B. der Folieneinschlag mit und ohne Klebenähte, sowie halbstarre Packmittel, z.B. Tuben) werden im Rahmen dieser Arbeit ausgeklammert. Innerhalb der verschiedenen Beutelarten gibt es vier Arten, bei denen eine hermetische Dichtigkeit zwischen der Atmosphäre innerhalb und außerhalb der Packung angestrebt wird: Schlauchbeutel, 3-Randsiegelbeutel, 4-Randsiegelbeutel und Standbodenbeutel [SCH04]. Es gibt innerhalb dieser Gruppen Nahtvariationen (z.B. Flossen- oder Überlappungsnahte), spezielle Applikationen (z.B. Zipper, Ventile und Ausgießhilfen), zusätzliche Längsfalten und Formate [BLM14].

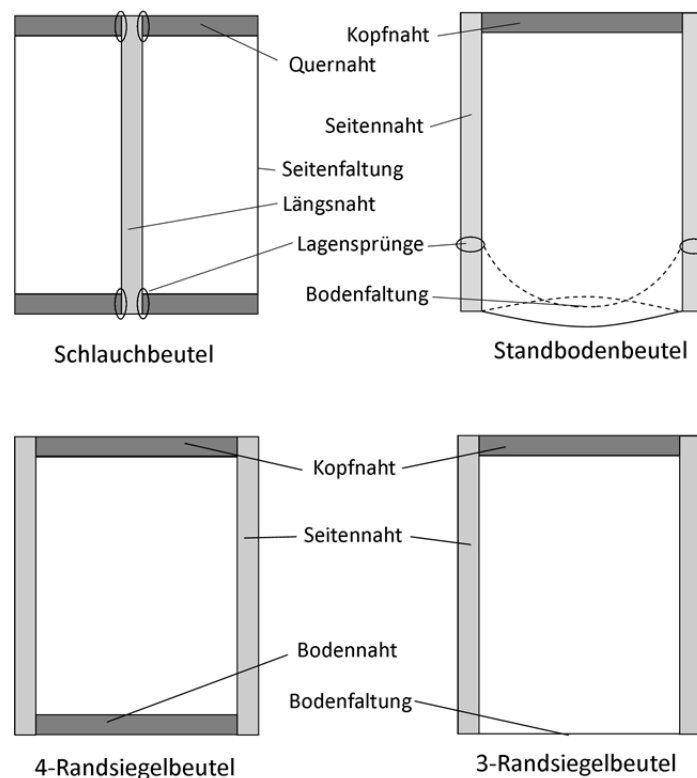


Abbildung 2-7: Nahtbezeichnungen, Falten und Lagensprünge an verschiedenen Verpackungsarten

Die Beutelarten können mit unterschiedlichen Maschinenkonzepten produziert werden und unterscheiden sich in Anzahl, Anordnung und Bezeichnung der Siegelnähte. Die abschließend gefertigte Naht, nach dem Befüllen der Packung mit Produkt ist bei Schlauchbeuteln eine Quernaht [BLM14] und wird bei 3- oder 4-Randsiegelbeuteln auch häufig als Kopfnaht ([Mah09], [Bac14], [N.N.12]) bezeichnet. Ein anderer Aspekt sind sogenannte Lagensprünge. Diese bezeichnen eine Änderung der Anzahl von Packstofflagen entlang einer Schnittebene, insbesondere entlang einer Siegelnaht. Lagensprünge finden sich z.B. bei Schlauchbeutelverpackungen an der Kreuzung von Längs- und Quernaht und bei Standbodenbeuteln in den Seitennähten im Bereich der Bodenfaltung. Die Lagensprünge sind kritische Bereiche in Bezug auf die Dichtigkeit einer Verpackung, weil sich dort, bei ungeeigneter Packstoffauswahl und Prozessführung, Kapillaren bilden können [N.N.02]. Bei 3- oder 4-Randsiegelbeuteln treten keine Lagensprünge auf, weshalb diese Beutelarten in Bezug auf Dichtigkeit generell unkritischer sind.

2.2.5.3 Aufbau

Bei Lebensmittelverpackungen werden in den meisten Fällen sogenannte Mono-Folien eingesetzt. Das sind einschichtige Folien, welche meist siegelfähig sind, bedruckt sein können und häufig aus Polyethylen bestehen. Immer häufiger werden im Lebensmittelbereich auch mehrschichtige Verbundfolien verwendet [N.N.10a]. Durch die geschichtete Kombination mehrerer Folienlagen aus unterschiedlichen Polymeren, oder anderen Werkstoffen, (z.B. Aluminiumfolie, Papier, Karton), können die Eigenschaften des Folienverbundes gezielt eingestellt werden ([Nen06], [Ahl97]). Ein einfacher, mehrschichtiger Aufbau eines siegelfähigen Verpackungsmaterials kann aus einer Trägerschicht, einer Barrierschicht und einer Siegelschicht bestehen. In Abbildung 2-8 ist der Schichtaufbau für zwei unterschiedliche Anwendungen beispielhaft dargestellt.

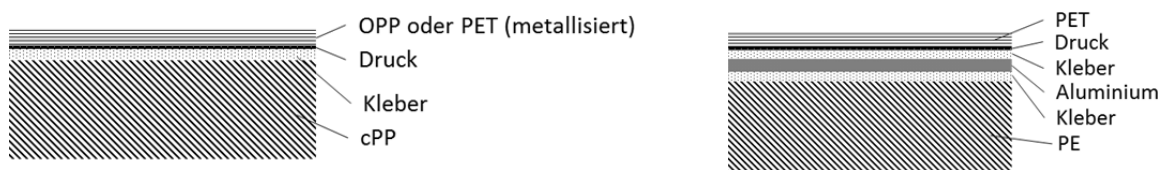


Abbildung 2-8: Typischer Schicht-Aufbau einer Verpackungsfolie für das Verpacken von z.B. links) Süßwaren und rechts) Kaffee

Siegelschicht

Die Siegelschicht ist für den Verschließvorgang des Verpackungsprozesses die wichtigste Funktionsschicht. Im Bereich der Lagensprünge und Seitenfalten muss genügend polymeres Siegelmaterial vorhanden sein, um an diesen Stellen die Naht abdichten zu können [N.N.02]. Für leichte Verarbeitbarkeit haben Siegelschichten meist eine niedrige Schmelztemperatur und gute Hot-Tack-Eigenschaften. Als Polymersorten werden in erster Linie PE-LD, PE-LLD und PP verwendet. Neben den hier beschriebenen Siegelschichten existieren auch sogenannte Siegelacke, mit denen Verpackungsfolien beschichtet sein können. Beschichtete Folien zählen aber nicht zu den Verbundfolien [Nen06].

Barrierschicht

Die Barrierschicht realisiert einen Teil der Schutzfunktion des Packmittels. Dabei kommen Werkstoffe zum Einsatz, die besonders gute Barriere-Eigenschaften gegenüber Umgebungseinflüssen aufweisen. Hierfür wird häufig Aluminium verwendet, weil es eine hohe Gas- und Lichtundurchlässigkeit bietet. Es werden aber auch polymere Schichten eingesetzt, wie z.B. Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH), welches als sehr gute Sauerstoffbarriere wirkt und preiswerter als Aluminiumfolie ist. Eine weitere Möglichkeit, eine Barriere Wirkung zu erzielen, ist die Metallisierung einzelner Folienlagen. Bei sehr empfindlichen Packgütern (z.B. Kosmetika) kann jedoch die teurere Aluminiumbarriere nicht durch eine Metallisierung substituiert werden [N.N.10a], [Nen06].

Trägerschicht

Die Trägerschicht verleiht dem Gesamtfolienverbund vor allem gute mechanische Eigenschaften, also hohe Zug-, Reiß- und Durchstoßfestigkeit. Weiterhin lassen sich Trägerfolien gut bedrucken, haben gute optische und haptische Eigenschaften und sind witterungsbeständig. Zum Einsatz kommen hier Polymerschichten aus PET, PP und PA. Es werden aber auch Papier und Karton eingesetzt, letzterer vor allem wegen des guten Verhältnisses von Flächenmasse und Steifigkeit.

Die Funktionen der einzelnen Schichten lassen sich nicht immer klar voneinander trennen. So trägt eine Aluminiumbarriere maßgeblich zur Verbundsteifigkeit bei und beeinflusst Haptik und Optik. Papier und Karton sorgen neben der Steifigkeit auch für Lichtundurchlässigkeit und PA ist gleichzeitig Trägerschicht und gute Sauerstoffbarriere. Der Schichtaufbau einer Folie kann symmetrisch oder unsymmetrisch sein und je nach Verpackungs-, bzw. Nahtgestaltung kann es notwendig sein, dass beide äußeren Folienschichten siegelfähig sind. Beim Vorhandensein von gut wärmeleitenden Schichten im Verbund (z.B. Aluminium) kann das Siegelverhalten des gesamten Verbundes beeinflusst werden ([Tie98], [Thü11]). Vergleichende Untersuchungen an Packmitteln mit und ohne Aluminiumschicht wurden in [TD10] genauer beschrieben.

2.2.5.4 Herstellung

Extrusion

Die Halbzeuge der flexiblen Packmittel sind bahnförmige Flachformgüter aus Kunststoff, Aluminium und Papier. Kunststofffolien können mittels unterschiedlicher Gieß-, Kalandrier- oder Extrusionsverfahren hergestellt werden. Für die Herstellung von dünnen Folien, welche bei flexiblen Packmitteln zum Einsatz kommen, werden heutzutage ausschließlich Extrusionsverfahren eingesetzt [Nen06]. Bei der Folienextrusion wird Kunststoffgranulat geschmolzen, durch eine Schlitz- oder Ringdüse gepresst und die entstehende Schmelzbahn oder -blase abgekühlt und als Folienbahn aufgewickelt [Mic06].

Co-Extrusion

Bei der Co-Extrusion werden verschiedene Kunststoffe noch im Extruder oder in der Düse kombiniert, wodurch sich unterschiedliche Funktionsaufbauten schon im Extrusionsprozess erzeugen lassen [Nen06]. Die entsprechenden Verbundfolien werden als Co-Ex-Verbund bezeichnet. Bei der Co-Extrusion sind den theoretischen Möglichkeiten der Kunststoffkombinationen jedoch Grenzen gesetzt und bedürfen der Beachtung einer Vielzahl von (vor allem rheologischen) Materialeigenschaften jeder einzelnen Schicht [SCH04]. In Produktionsanlagen für Verpackungsfolien können heute Verbunde mit bis zu 11 Schichten co-extrudiert werden [GWM04]. Die einzelnen Funktionsschichten eines Verbundes sind häufig co-extrudiert. So lassen sich spezielle Siegelpolymere mit preiswerteren Füllmaterialien im mittleren Layer und gut zu kaschierenden Polymeren auf der zu laminierenden Seite verbinden [Nen06]. Bei Polymerkombinationen, die selbst nicht aneinander haften, wird zusätzlich ein sogenannter Haftvermittler als Zwischenschicht eingefügt um die Haftung zu gewährleisten [Ahl97].

Kaschieren

Verschiedene Folien können außerdem kaschiert, bzw. laminiert werden. Die einzelnen Folienbahnen werden mit einem Kaschierklebstoff vollflächig gefügt und teilweise als Laminat bezeichnet. Co-extrudierte Verbundaufbauten können auf diese Art mit anderen Folienbahnen verbunden werden. Das Kaschieren hat gegenüber der Co-Extrusion den ökonomischen Nachteil, dass die Schichtdicken größer sein müssen um als Bahn verarbeitet werden zu können und mit steigender Anzahl von Kaschiervorgängen werden sich wiederholende Maschinendurchläufe und damit längere Produktionszeiten notwendig [Wag10]. Für die Herstellung von Verbundfolien aus Schichten unterschiedlicher Werkstoffklassen (z.B. Metall und Kunststoff) ist die Kaschierung jedoch unverzichtbar [Nen06].

Bedampfen

Die Eigenschaften von Folien lassen sich außerdem durch das Aufdampfen einer sehr dünnen Materialschicht maßgeblich verändern. Dazu wird in speziellen Anlagen die Folie im Vakuum mit Metall oder Keramik bedampft und der Vorgang entsprechend als Metallisieren oder Keramisieren bezeichnet. Beim Metallisieren von Verpackungsfolien wird ausschließlich Reinst-Aluminium verwendet [EE12]. Die bedampfte Folie erreicht dadurch u.a. sehr gute Barriereigenschaften, vor allem hinsichtlich Gasundurchlässigkeit. Durch die Metallisierung werden auch die optischen Eigenschaften der Folie verändert, weil diese zu verminderter Lichtdurchlässigkeit und einem metallischen Glanz führt [Ahl97]. Beim Keramisieren von Folien werden Aluminiumoxid (AlO_x) oder Siliziumoxid (SiO_x) aufgedampft. Dadurch wird, wie bei der Metallisierung, eine hohe Barriere gegen Sauerstoff und Wasserdampf erreicht, die Folie bleibt jedoch durch den Sauerstoffanteil transparent [Nen06].

2.3 Fügen von Thermoplasten

2.3.1 Makromolekularer Verfahrensablauf

Beim Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen wird dem Material Energie zugeführt [Mic06], wodurch es sich erwärmt. Dadurch wird es im Bereich der Naht in den geschmolzenen Aggregatzustand überführt und ggf. kristalline Anteile aufgeschmolzen. Die Energiezufuhr ist je nach Schweißverfahren unterschiedlich und in den meisten Fällen werden beide Fügepartner erwärmt. Die Temperatur darf dabei die jeweilige Zersetzungstemperatur des Thermoplasts nicht übersteigen [Ben87]. Die warmen, geschmolzenen und zähflüssigen Oberflächen der beiden Fügepartner werden mit einem spezifischen Fügedruck gegeneinander gepresst, wodurch sich die beiden Fügepartner miteinander verbinden. Die Verbindung erfolgt durch Platzwechselforgänge und Diffusion von Molekülen sowie Verschlaufungen der Makromoleküle, welche durch den anliegenden Fügedruck unterstützt werden [BBT+01].

Die drei beeinflussenden physikalischen Größen sind:

- die Fügetemperatur,
- der Fügedruck und
- die Fügezeit,

welche auf den konkreten Anwendungsfall (z.B. Polymer, Fügenahtgeometrie) abgestimmt werden müssen [Kai07]. Je nach Fügeverfahren werden die drei genannten Größen nur indirekt über andere Schweißparameter beeinflusst. Die Fügenaht wird anschließend abgekühlt, sodass das Material wieder erstarrt und die Fügepartner stoffschlüssig miteinander verbunden sind. Bei teilkristallinen Thermoplasten findet während des Abkühlvorgangs zusätzlich eine Rekristallisation statt. Der Fügevorgang ist in Abbildung 2-9 graphisch dargestellt.

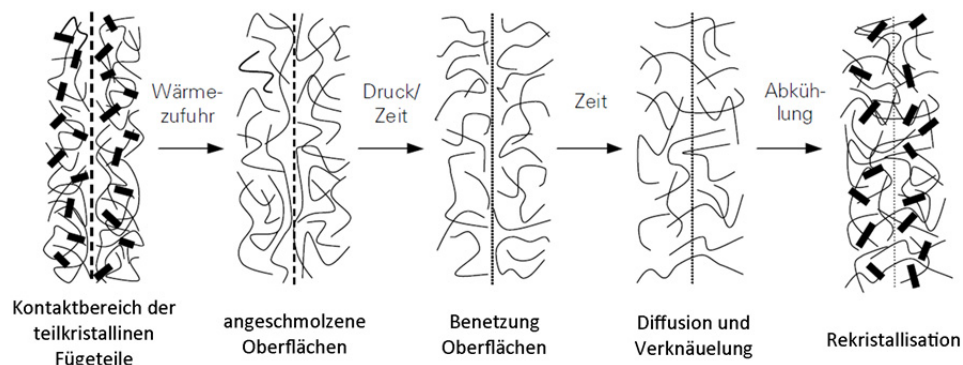


Abbildung 2-9: Ablauf und Verbindungsvorgänge während des Fügevorgangs von teilkristallinen Kunststoffen nach [SM94], [Ben87], [Mih12] und [Bac14]

Die Haftfestigkeit in einer Fügenaht beruht nach [Pot04] auf drei Mechanismen, deren Anteil je nach Fügeverfahren unterschiedlich sein kann:

- Spontane Haftung infolge Kontaktes
- Selbstdiffusion
- Durch Strömungsfeld beim Fügen verursachte Molekülverstretchung, deren Relaxation und Platzwechselfvorgänge durch die Grenzfläche

Eine optimale Siegelnaht erreicht die mechanische Festigkeit des Ausgangswerkstoffes, was jedoch je nach Anwendungsfall teilweise schwer zu erreichen ist. Es können auch unterschiedliche Polymere gefügt werden, wenn deren Eigenschaftsprofil sich ähnelt [Kai07]. Das am häufigsten angewandte Schweißverfahren für Kunststoffe ist das Wärmekontaktverfahren. Es ist technisch sehr einfach zu realisieren, zu handhaben und dadurch auch preiswert. Die zum Fügen notwendige Energiezufuhr erfolgt dabei durch Kontakterwärmung mittels beheizter Werkzeuge. Um ein Anhaften von Kunststoff an dem beheizten Bauteil zu verhindern, werden diese meist mit Teflon beschichtet. Dieses Prinzip ist auch in der Verpackungstechnik sehr weit verbreitet und wird entsprechend als Wärmekontaktisiegeln bezeichnet.

2.3.2 Ultraschallsiegeln

2.3.2.1 Abgrenzung zum Ultraschallschweißen von Kunststoffformteilen

Das Ultraschallschweißen ist im Vergleich zum Ultraschallsiegeln eine relativ alte und weit verbreitete Technologie. Daraus folgt ein größerer Erfahrungsschatz hinsichtlich des Prozessablaufs, der Verfahrensphänomene, der Materialeigenschaften und nicht zuletzt von wissenschaftlichen Forschungsarbeiten, welche das Verfahren detailliert untersucht haben. Das Ultraschallsiegeln ist dem Fügen von Formteilen zwar sehr ähnlich, unterscheidet sich aber in einigen wesentlichen Punkten deutlich, die im Folgenden aufgeführt sind.

Beim Ultraschallschweißen wird in zwei unterschiedliche Verfahrensvarianten hinsichtlich der Energieeinleitung unterteilt: das Nah- und das Fernfeldschweißen. Damit wird unterschieden, wie weit entfernt sich die Fügeebene von der Werkzeugoberfläche befindet. Ab einem Abstand von > 6 mm spricht man vom Fernfeldschweißen und meint damit Anwendungen, in denen sich die Schwingung durch das Fügeglied fortpflanzen kann ([Wod04], [BBT+01]). Die beeinflussenden Materialparameter der Fügepartner unterscheiden sich für beide Verfahrensvarianten. Das Fernfeldschweißen wird vor allem bei sehr steifen Materialien mit geringer Dämpfung genutzt und findet Anwendung bei kleineren Formteilen, z.B. Kassetten und Feuerzeugen [Sae01]. Beim Ultraschallsiegeln gibt es diese Unterteilung nicht, weil es sich aufgrund der geringen Dicken von flexiblen, bahnförmigen Flachformgütern (z.B. Verpackungsfolien) immer um das Nahfeldverfahren handelt.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Energierichtungsgeber⁴ (ERG), welcher beim Ultraschallschweißen von Formteilen in mindestens einen der beiden Fügepartner integriert ist und während des Schweißvorgangs aufgeschmolzen wird. Beim Ultraschallsiegeln ist der ERG Teil des Werkzeugs. Die Gestaltung des ERG hat einen hohen Einfluss auf die Nahtqualität ([CCC+00], [Bac14]).

Ferner unterscheiden sich Ultraschallsiegeln und -schweißen auch in der Kühlwirkung durch das Werkzeug nach dem eigentlichen Fügevorgang. Durch die geringe Materialdicke der Folien wird eine Siegelnaht sehr viel schneller abgekühlt als eine Schweißnaht, wodurch es zu unterschiedlichen Effekten in der Ausbildung des Gefüges und der Morphologie beim Erstarren kommen kann.

Schließlich ist die Variabilität des Ultraschallsiegeln zu nennen. Bei Verpackungsmaschinen werden häufig wechselnde Packgüter und Packstoffe mit veränderlichen Packungsformaten verarbeitet, weshalb die Siegelparameter beim Ultraschallsiegeln in einem breiteren Bereich variiert und genutzt werden. Eine Ultraschallschweißeinrichtung ist auf das Schweißen einer konstanten Formteilvereinigung ausgelegt, von der eine sehr große Stückzahl unter annähernd konstanten Bedingungen geschweißt wird.

⁴ Der Energierichtungsgeber ist beim Ultraschallsiegeln eine meist einseitige schmale Profilierung des Werkzeugs, dient der Spannungskonzentration und bestimmt den Ort der entstehenden Siegelnaht (s. Kap. 2.4.4).

2.3.2.2 Fügeprozessablauf beim Ultraschallsiegeln

Der Ablauf des Ultraschallsiegeln wurde insbesondere von [Bac14] untersucht und der Fügevorgang anhand der gemessenen Temperaturen und Werkzeugbewegung in vier Teilprozessschritte unterteilt, die in Abbildung 2-10 qualitativ dargestellt sind.

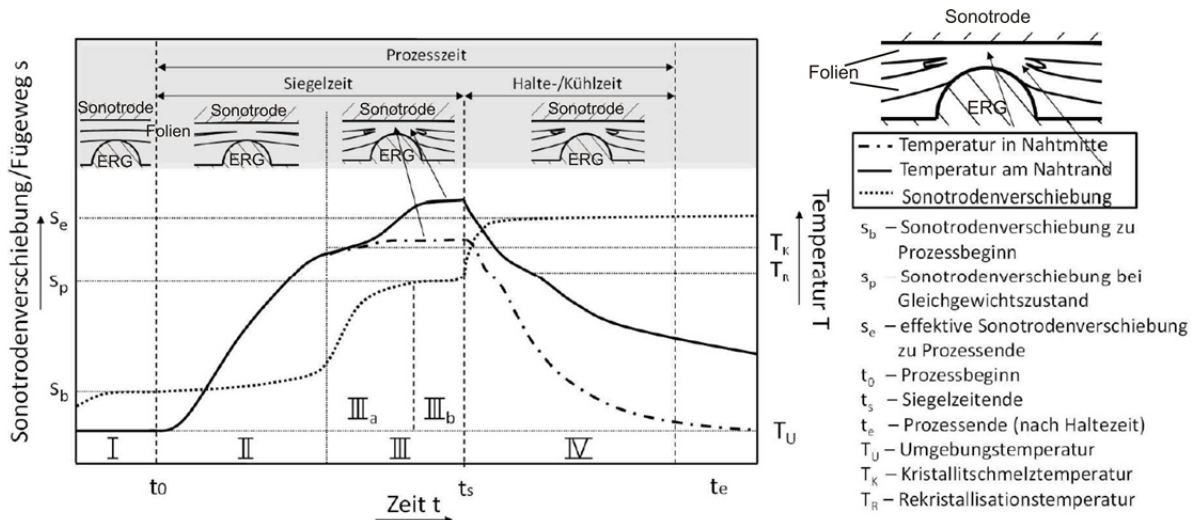


Abbildung 2-10: Ablauf des Ultraschallsiegelvorgangs von Verbundfolien mit teilkristallinen Siegelschichten aus [Bac14]

Plastische Verformung der Fügepartner

Zum Fügen zweier Folien mittels Ultraschall werden die Fügepartner zunächst mit einer definierten Siegelkraft gegeneinander verspannt (Phase I in Abbildung 2-10) und dadurch die Folien fixiert. Infolge des Siegeldrucks wird der Packstoff plastisch verformt, wobei die Siegelschicht am meisten deformiert wird, weil diese die geringsten Steifigkeiten aufweist. Der Betrag des komplexen E-Moduls korreliert mit dem aus der Kontinuums-Mechanik bekannten Wert und bestimmt die materialeitige Steifigkeit eines Werkstoffs. Je steifer ein Material ist, desto höhere Kräfte sind notwendig um es zu verformen, d.h. unter ansonsten identischen Bedingungen wird ein Material mit kleinem E-Modul stärker verformt, als ein Material mit größerem E-Modul [TBN+10].

Erwärmung und Schmelzen

Nach dem Erreichen einer definierten statischen Siegelkraft startet die Ultraschallschwingung, wodurch der Packstoff zyklisch verformt wird. Infolge der viskoelastischen Materialeigenschaften der Siegelschicht, wird die eingebrachte Verformung in Wärme umgewandelt. Die Verformung erfolgt im nicht linear viskoelastischen Bereich aufgrund der plastischen Vorverformung und der relativ großen Amplituden. Deshalb ist der Betrag der tatsächlich dissipierten Energie, im Vergleich zum linear viskoelastischen Bereich, etwas geringer [Luz68]. Eine Siegelschicht aus einem Polymer mit hoher mechanischer Dämpfung wird sich unter ansonsten identischen Bedingungen beim Ultraschallsiegeln schneller erwärmen [DBT13]. Die Energiewandlung findet bei Packmittelverbunden fast immer in der Siegelschicht statt, weil diese den niedrigsten E-Modul hat und sich deshalb am meisten verformt.

An den sich berührenden Packstoffoberflächen tritt anfangs auch eine Erwärmung infolge der Grenzflächenreibung auf. Diese entsteht u.a. durch unsymmetrische Verformungsbedingungen beider Folien, aufgrund der einseitigen Kontur des ERG und der unterschiedlichen Querkontraktion von Folie und Werkzeug. Beim Ultraschallsiegeln mit orthogonal zur Folie wirkender Schwingung⁵ spielt der Anteil aus Erwärmung durch Grenzflächenreibung jedoch nur eine untergeordnete Rolle und ist packstoff- und siegelkraftabhängig. Bei der Siegelung steifer Folien mit geringer Siegelkraft wird die Grenzflächenreibung begünstigt. Sobald sich die Kontaktflächen der beiden Packstoffe erwärmen und erweichen, haften die Folienoberflächen aneinander und eine Relativbewegung wird verhindert, weshalb die Erwärmung an den Grenzflächen auch nur innerhalb der ersten Millisekunden des Fügevorgangs auftritt [BTM10].

Durch beide Erwärmungsmechanismen erhöht sich die Temperatur der Siegelschicht kontinuierlich bis zum Erweichen und Schmelzen des Polymers (Phase II in Abbildung 2-10). Siegelmaterialien mit einer niedrigeren Schmelzenthalpie muss eine geringere Energiemenge zugeführt werden, um diese zu schmelzen und je nachdem in welchem Temperaturbereich der Schmelzpeak liegt, muss der Kunststoff mehr oder weniger erwärmt werden, um gesiegelt werden zu können. In der praktischen Anwendung haben unterschiedliche Schmelzpeaktemperaturen aber keine Auswirkungen auf das Siegelverhalten [TBM11]. Durch die anliegende Siegelkraft wird bei der plastischen Deformation und dem Erweichen des Materials der Kontakt zwischen Werkstoff und Werkzeug sichergestellt. In eigenen Voruntersuchungen [TB13] wurde gezeigt, dass die Schmelztemperatur innerhalb weniger Millisekunden erreicht wird. Für das Ultraschallsiegeln generell vorteilhaft haben sich solche Materialien erwiesen, deren Absinken der Viskosität in einem breiteren Temperaturbereich stattfindet ([TBN+10], [TB11]).

Fließen und Gleichgewichtszustand

Aufgrund der steigenden Materialtemperatur sinkt die Viskosität der Siegelschicht und durch die Siegelkraft sowie die relativ spitze Werkzeugkontur des ERG wird das aufgeschmolzene, fließfähige Material seitlich aus der Naht herausgedrückt (Phase III a in Abbildung 2-10). Dabei kommt es zu Dehnungen und Scherungen der Schmelze, die zur Entknäuelung und Verstreckung der Kettenmoleküle führen [Sch89]. Sobald Teile des Kunststoffes geschmolzen sind, können die zum Fügen notwendigen Vorgänge auf molekularer Ebene stattfinden. Die weitere Energiewandlung und Erwärmung der viskosen Schmelze spielt deshalb für den Fügeprozess nur eine untergeordnete Rolle [TB13]. Durch die fortwährende Ultraschallschwingung wird kontinuierlich Material aufgeschmolzen und aus der Mitte der Naht, zu den Nahträndern hin, verdrängt. Dadurch wird die Nahtmitte immer weiter verjüngt und infolge der Siegelkraft bewegen sich Sonotrode und Amboss aufeinander zu. Die Geschwindigkeit der Werkzeugbewegung kann messtechnisch erfasst werden und wird als Fügegeschwindigkeit bezeichnet. Die Energiewandlung findet zunehmend an den Nahträndern statt, weil sich dort mehr Polymermaterial ansammelt und die Sonotrode „aufschwimmt“. Daher ist das Zentrum der Naht kühler als die Nahränder, sobald der Kunststoff zu fließen beginnt [TSB+13]. Wenn das geschmolzene und verdrängte Polymermaterial an den

⁵ Es gibt unterschiedliche Verfahrensvarianten, die sich vor allem in der Richtung der Schwingung zur Packmittelbahn unterscheiden. Üblicherweise wird für Packstoffe das Verfahren mit orthogonal zur Packstoffbahn orientierter Schwingung verwendet (s. Kap. 2.4.1).

Nahträndern soweit herausgedrängt wurde, dass es nicht mehr zyklisch deformiert werden kann, kühlt es sich ab und erstarrt.

Die Bewegung der Sonotrode in Richtung des Amboss wird durch einen Gleichgewichtszustand begrenzt (Phase III b in Abbildung 2-10), der sich je nach Siegelmaterial und Prozessführungsparametern (Siegelkraft und Amplitude) einstellt und bei dessen Erreichen, auch bei langen Siegelzeiten kein neues Material mehr verdrängt wird [TD10]. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Menge der thermischen Energie die durch den Kontakt mit Werkzeug und Umgebung aus der Naht abgeführt wird, genauso groß ist, wie die Menge thermischer Energie, die durch den Ultraschall erzeugt wird. Es konnte in eigenen Untersuchungen [TB13] gezeigt werden, dass die Temperatur in der Naht dann nicht mehr ansteigt, sondern auf einem annähernd konstanten Niveau oberhalb der Schmelztemperatur der Siegelschicht verharrt. Bei großen Siegelkräften und/oder Amplituden kann es außerdem vorkommen, dass die komplette Siegelschicht aus der Nahtmitte verdrängt wird und die Träger- oder Barrierschichten aufeinander treffen. Dadurch können Schäden an diesen Schichten auftreten [Sch10b] oder die Biegesteifigkeit in der Nahtmitte ist so gering, dass die Naht an dieser Stelle knickt.

Abkühlen und Erstarren

Die Schwingung benötigt zum Abklingen wenige Millisekunden, stoppt also nicht schlagartig. Da die Werkzeuge unbeheizt sind, kühlt die Siegelnaht sehr schnell ab. Je kürzer die Relaxationszeit eines Materials, umso schneller verknäueln sich die durch das Fließen verstreckten Polymerketten. Beim sehr schnellen Abkühlen wird die Kettenbewegung behindert und die Kettenmoleküle in evtl. verstrecktem Zustand eingefroren. Die verstreckten Ketten können dann nur unvollständig kristallisieren, was sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften der Fügenaht auswirkt [Bac14]. Kurze Relaxationszeiten eines Materials sind daher vorteilhaft für das Ultraschallsiegeln.

An die Ultraschallschwingung kann sich eine Haltephase anschließen, bei der die Werkzeuge geschlossen bleiben und die Naht dadurch unter Kraftereinwirkung gekühlt wird. Dabei ist ein Nachsetzen der Sonotrode in Richtung des Amboss zu erkennen (zu Beginn Phase IV in Abbildung 2-10), was mehrere Ursachen hat: Beim Abkühlen erstarrt das Material, dies hat einen Sprung in der Materialdichte zur Folge und das Materialvolumen wird kleiner. Eine weitere Ursache ist der sogenannte Weißenberg-Effekt [TG06] der u.a. auch aus dem Vibrationsschweißen bekannt ist ([Kor96], [Neh11]). Ausgelöst durch Normalspannungsdifferenzen sorgt die Schwingung der Sonotrode dafür, dass die flüssige Schmelze der Sonotrodenbewegung entgegenwirkt. Beim Abschalten der Schwingung erschlafft die Schmelze und wird dadurch schlagartig ausgequetscht, was ebenfalls zu dem beobachteten Wegsprung der Sonotrode beiträgt.

2.4 Prozesstechnik von Ultraschallsiegelsystemen

2.4.1 Allgemeine Bestandteile und Verfahrensvarianten

Ein Ultraschallsiegelsystem für Folien besteht aus einem Schwinggebilde, einem Amboss mit integriertem ERG und einem Generator. Das Schwingssystem besteht wiederum aus mehreren Baugruppen: dem Konverter, dem Booster und der Sonotrode (siehe Abbildung 2-11).

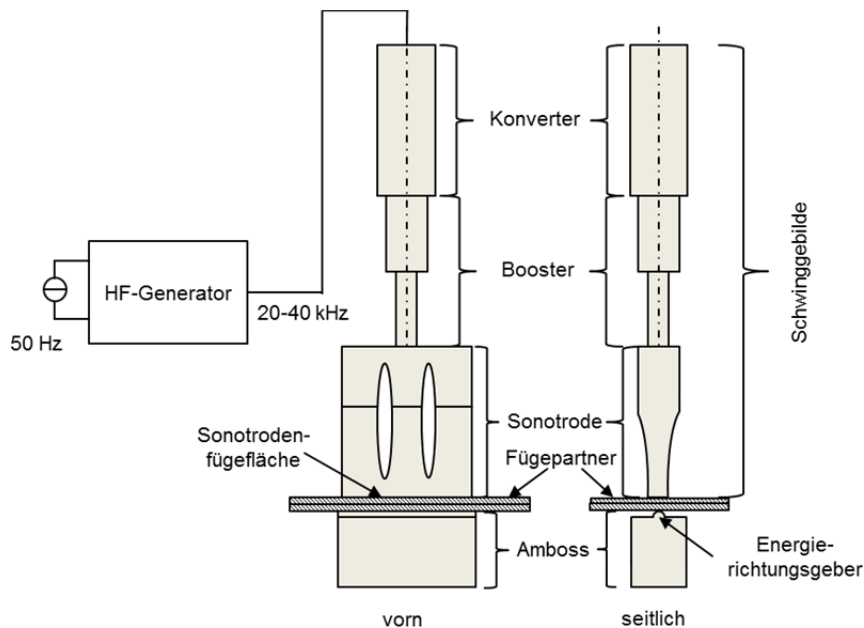


Abbildung 2-11: Schematischer Aufbau eines Ultraschallwerkzeuges zum Fügen von bahnförmigen Flachformgütern

Mit Ultraschall können alle Arten von ebenen Siegnähten an Verpackungen hergestellt werden (siehe Abbildung 1-4), für deren Herstellung unterschiedliche Verfahrensvarianten eingesetzt werden. In Abbildung 2-12 sind drei Verfahrensvarianten dargestellt, die zum Siegeln von flexiblen Packmitteln eingesetzt werden. Die am häufigsten genutzte Sonotrodenform sind messerförmige Sonotroden, bei denen die maximale Auslenkungsamplitude orthogonal zur Packmittelbahn orientiert ist (Abbildung 2-12 a). Damit werden vorrangig Kopf- und Quernähte gesiegelt. Dabei sind sowohl kontinuierliche, als auch intermittierende Anwendungen realisierbar [Bac14]. Es gibt außerdem runde, rotierende Stabsonotroden, deren Radialschwingung genutzt wird, um kontinuierlich zu siegeln und die genutzte Amplitude ebenfalls orthogonal zur Packmittelbahn zeigt (Abbildung 2-12 b). Eine dritte Bauform sind torsional schwingende Stabsonotroden, die ausschließlich für kreisrunde Siegnähte genutzt werden können (Abbildung 2-12 c). Dabei wird die Drehschwingung durch einen oder mehrere tangential senkrecht am zylindrischen Schwinggebilde angebrachten Konverter erzeugt und damit das Werkzeug in eine Drehschwingung versetzt [FMG08]. Das torsionale Siegeln unterscheidet sich insofern deutlich von den beiden zuvor genannten Varianten, als dass die Schwingamplitude parallel zur Packmittelbahn liegt, der Packstoff dadurch weniger stark deformiert wird und die Grenzflächenreibung einen größeren Einfluss hat. Dadurch unterscheidet sich diese Variante auch in den beeinflussenden Wirkmechanismen von den beiden zuvor genannten. Vergleichende Untersuchungen beider Schwingssysteme an Formteilen sind

in [GFF10] beschrieben. Dabei wurde festgestellt, dass mit dem torsionalen Schwingsystem geringfügig höhere Nahtfestigkeiten erreicht werden können und das Prozessfenster für optimale Siegelnähte sehr breit ist, während es beim orthogonal wirkenden Schwingsystem einen optimalen Arbeitspunkt gibt.

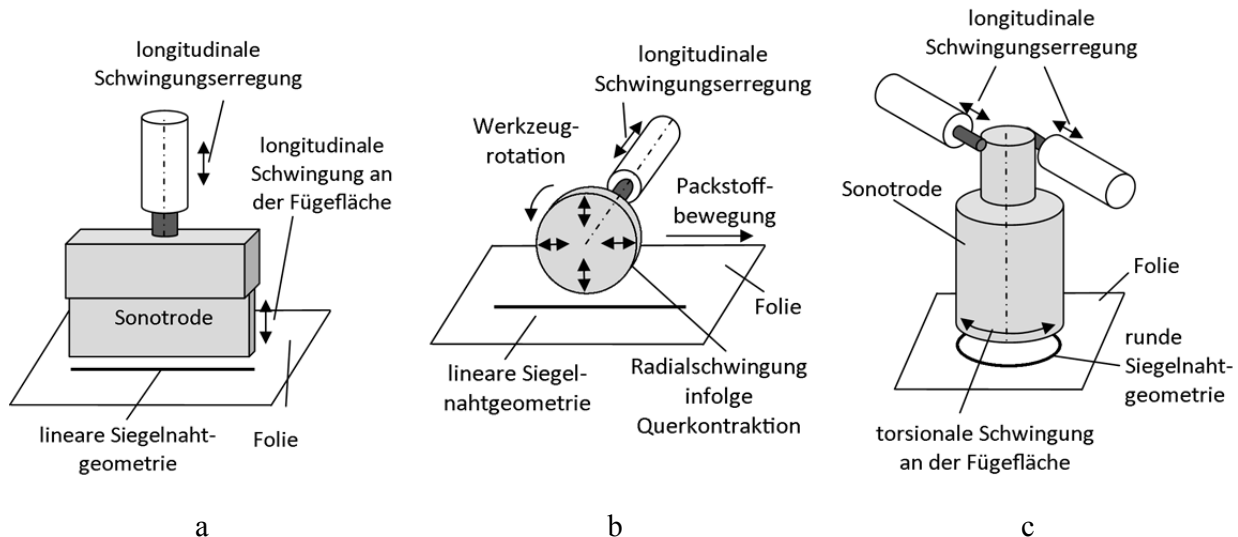


Abbildung 2-12: Verfahrensvarianten des Ultraschallsiegeln a) Schwingungsamplitude orthogonal zum Packstoff mit Messersonotrode, b) Schwingungsamplitude orthogonal zum Packstoff mit Stabsonotrode c) Schwingungsamplitude parallel zum Packstoff mit Stabsonotrode

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich auf das Ultraschallsiegeln mit orthogonal zum Packmittel orientierter Schwingamplitude eingegangen, da es aufgrund seiner Eignung für nahezu alle gängigen Siegelnahtgeometrien am breitesten Anwendung findet.

2.4.2 Elektrische Bauteile

Mit Hilfe des Generators wird aus der üblichen Netzfrequenz von 50 Hz ein hochfrequentes, elektrisches Wechselfeld mit Frequenzen im Ultraschallbereich erzeugt. Die dabei gebräuchlichen Frequenzen liegen heute zwischen 20 und 40 kHz (bei speziellen Anwendungen auch bis zu 70 kHz). Dieser Frequenzbereich hat sich etabliert, weil geringere Frequenzen vom menschlichen Gehör wahrgenommen und als störend empfunden werden. Bei höheren Frequenzen sind außerdem die mechanischen Verluste im Schwingsystem zu groß. Die ersten Ultraschallgeneratoren arbeiteten analog, mit der Entwicklung der Halbleiterindustrie konnten neue Generatoren entwickelt werden, die mittlerweile vollständig digital arbeiten [Her10]. Diese sind flexibler [Ehr04], langlebiger, bieten neue Prozessführungsmöglichkeiten [HK04a] und sind damit auch Voraussetzung zum Einsatz des Ultraschallsiegeln an Packmitteln. Verpackungsmaschinen sind häufigen Packgut- und Packmittelwechseln unterworfen, wodurch auf die spezifischen Prozessbedingungen angepasste Parameter notwendig sind. Diese Anpassungen lassen sich mit digitalen Steuerungen sehr viel einfacher und sicherer handhaben. Die Nennleistungen moderner Ultraschallgeneratoren liegen zwischen 1 und 6 kW ([Wod04], [Ehr04]).

2.4.3 Elektromechanische Bauteile

Durch das hochfrequente Wechselfeld des Generators wird der Konverter zum Schwingen in gleicher Frequenz erregt. Dies geschieht durch Piezokeramiken mittels des inversen piezoelektrischen Effektes. Der Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie eines solchen Konverters liegt bei 90 – 98 % ([Str95] [Wod04]). Handelsübliche Konverter schwingen meist in longitudinaler Richtung, d.h. dass die schallabstrahlende Fläche um ihre Ruhelage schwingt. Bei einer Frequenz von 35 kHz beträgt die maximale Ausgangsamplitude am Konverter laut eines Herstellerdatenblattes 6,5 μm und ist proportional zur Amplitude des Spannungssignals [Neh11]. Dadurch kann die Soll-Amplitude der Sonotrode variiert werden.

2.4.4 Mechanische Bauteile

Booster

Der Booster, auch Amplitudentransformationsstück genannt, ist fest mit dem Konverter und der Sonotrode verbunden und leitet die Schwingung vom Konverter zur Sonotrode weiter. Er transformiert außerdem die Größe der Amplitude, meist zu höheren Werten. Diese Transformation wird durch konstruktive Gestaltung des Boosters beeinflusst, beruht im Grunde auf unterschiedlichen Massenverteilungen und wird durch das Querschnittsverhältnis von Schalleinleitungsfläche zur Schallausleitungsfläche bestimmt [Tro08].

Sonotrode

Durch die Sonotrode wird die Schwingung vom Booster auf die zu siegelnden Folien übertragen. Bei Messersonotroden wird die Schwingung vom zylindrischen Konverter und Booster auf die rechteckige, ebene Sonotrodenfügefläche (siehe Abbildung 2-11) verteilt. Für deren Auslegung, Konstruktion und Herstellung ist eine hochgenaue Fertigungstechnik notwendig, um ein möglichst gleichmäßiges Schwingverhalten der Sonotrodenfügefläche zu gewährleisten. Heute werden Sonotroden mittels moderner FEM-Berechnung ausgelegt und konstruiert [BSW10]. Dennoch ist es üblich, jedes gefertigte Werkzeug mittels Laservibrometer genau zu vermessen und gegebenenfalls nachzuarbeiten. Als Werkstoffe werden Titan- (Ti Al4V) und Aluminiumlegierungen (Al-CuMg2) bevorzugt, in seltenen Fällen auch Stahl. Durch die Schwingung und den gleichzeitigen Druck auf die Fügepartner ist die Sonotrode großen Spannungen ausgesetzt, weshalb die Qualität der Werkstoffe entscheidend für die Standzeit dieses Werkzeugs ist [Ehr04].

Schwinggebilde

Industriell genutzte Ultraschallschwinggebilde schwingen aus energetischen Aspekten in Resonanz, weil dadurch mit minimalem Energieeintrag die maximale Auslenkung erzeugt werden kann. Das Schwinggebilde ist so konzipiert, dass in ihm eine sogenannte stehende Welle entsteht, wie in Abbildung 2-13 dargestellt ist.

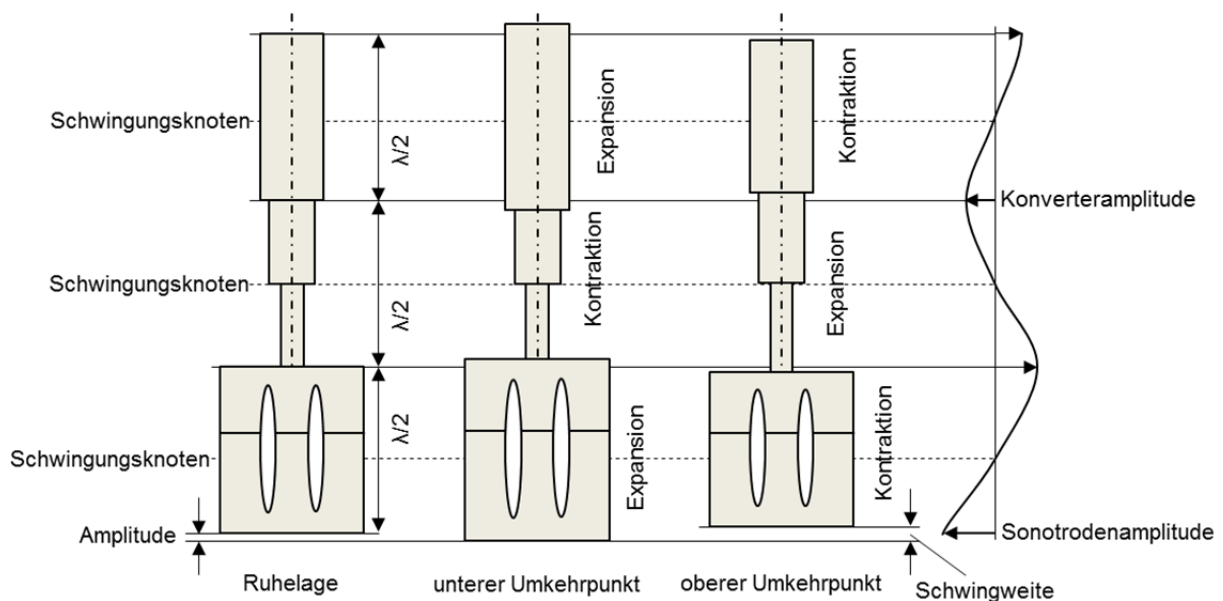


Abbildung 2-13: Schwingung des Schwinggebildes

Die Orte des Nulldurchgangs der Schwingungswelle (sog. Schwingungsknoten) verändern sich nicht und die Orte maximaler Auslenkung schwingen um die Ruhelage. Das wird erreicht, indem die Länge des Schwinggebildes immer einem Vielfachen der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) entspricht, somit an den Stirnflächen des Werkzeuges die Wellen zurückreflektiert werden und sich zu einer stehenden Welle überlagern [Kuh06]. Bei höheren Frequenzen und dadurch kleineren Wellenlängen wird das gesamte Schwingensystem kürzer und die maximal erzeugbaren Amplituden werden kleiner [Wod04].

Man spricht bei dem hier beschriebenen Schwinggebilde von einer longitudinalen Schwingung, die aber aufgrund der Querkontraktion der Bauteile auch von einer transversalen Schwingung überlagert ist. Dieses gleichzeitige Auftreten beider Schwingformen ist so nur in Festkörpern möglich und wird auch als Dehnungswelle bezeichnet [Fal69]. Die vom Betrag her größere Schwingung und beim Fügen von Kunststoffen meist nutzbar gemachte ist die longitudinale Schwingung. TSUJINO ET AL. beschäftigen sich in ihren Arbeiten ([TST+94], [TUO+00], [THS01], [TUA+07]) mit unsymmetrischen und teilweise parametrierbaren Sonotrodenbewegungen für das Ultraschallschweißen von Metallen und Kunststoffen. In [TUO+00] wird sogar die Kombination von longitudinaler und torsionaler Schwingung beschrieben, jedoch ist nicht bekannt, dass solche komplexen Schwingformen in industriellen Anwendungen zum Einsatz kommen.

Die Schwingungsknoten (siehe Abbildung 2-13) am Schwinggebilde werden als Einspannung des Werkzeuges genutzt, da in diesen Punkten keine Schwingung auftritt. Das geschieht oft am Booster, es gibt aber auch Entwicklungen, bei denen der Schwingungsknoten der Sonotrode genutzt wird. Die Aufhängung an der Sonotrode bietet den Vorteil, dass die Krafteinleitung näher an der Fügestelle liegt und die Sonotrode dadurch genauer positioniert werden kann, bzw. weniger Verluste durch Spiel oder Verformung entstehen. Neben der genutzten Arbeitsfrequenz hat solch ein Schwinggebilde weitere Resonanzen (sog. Nebenharmonische), die in ihrer Schwingform zum Siegeln ungeeignet sind und teilweise zur Zerstörung des Werkzeuges führen können. Unter Last, also z.B. beim Siegeln von Folien, verschiebt sich die Resonanzfrequenz des Schwinggebildes zu höheren Frequenzen [Kuh06]. Bei der Auslegung des Schwinggebildes muss daher beachtet werden,

dass diese Nebenharmonischen in einem Frequenzbereich liegen, der beim Siegeln nicht erreicht werden kann.

Amboss mit Energierichtungsgeber

Der Amboss mit integriertem ERG (siehe Abbildung 2-11) fungiert als Gegenstück zur Sonotrode und ist ebenfalls in Kontakt mit dem zu fügenden Material. Der ERG ist ein schmaler Steg, der unterschiedlich konturiert sein kann und als austauschbares Bauteil am Amboss fixiert wird. Dadurch lässt er sich schnell austauschen und auf den jeweiligen Anwendungsfall anpassen. Für Verpackungsfolien wird häufig ein schmaler Radius ($r = 2,5 \text{ mm}$) verwendet. In Ausnahmefällen kann der ERG auch in die Sonotrodenfügefläche integriert werden, wodurch der Fertigungsaufwand für dieses Bauteil steigt. Der ERG wird aus Stahl oder Aluminium gefertigt, wodurch seine Standzeiten geringer sind als die der Sonotrode. Es entsteht theoretisch eine Linienberührung zwischen ERG und Folie, die der lokalen Spannungskonzentration dient und dadurch den Entstehungsort der Siegelnaht bestimmt. Praktisch entsteht eine sehr schmale Flächenberührung durch die plastische Verformung der Folie. Ohne ERG würden die Folien nur an einigen zufälligen Punkten innerhalb einer breiteren Berührungsfläche gesiegelt, bei zusätzlich hohem Energieverbrauch [Ehr04]. Die schmale Berührungsfläche ist die Ursache für die schmalere Siegelnähte beim Ultraschallsiegeln im Vergleich zum Wärmekontaktsiegeln, welche gern als Verfahrensvorteil durch mögliche Packstoffeinsparungen genannt werden [Hue11]. Im Bereich der Verpackungen wird jedoch teilweise eine sog. Kosmetiknaht mit einem zweiten parallel angeordneten ERG-Profil erzeugt. Die Kosmetiknaht dient dabei nur der optischen Vergrößerung der gesiegelten Folienfläche und es bestehen geringe bis keine Anforderungen an Nahtfestigkeit und Dichtigkeit [Mah09]. Durch schmalere Werkzeuggestaltung könnte auch beim Wärmekontaktverfahren eine schmalere Siegelnaht erreicht werden.

Die Konturgestaltung des ERG hat maßgeblichen Einfluss auf die Nahtqualität, das optimale Profildesign ist jedoch packmittelspezifisch [Bac14]. Um an Lagensprüngen gleichmäßige Siegelerggebnisse sicherzustellen, werden die ERG an der Stelle der höheren Lagenanzahl ausgespart. Dabei muss die Packmittelbahn jedoch sehr genau positioniert werden und es können nur Packmittel gleicher Dicke verwendet werden, um die Aussparung genau auszufüllen.

Der Amboss sollte konstruktiv so ausgelegt sein, dass seine Eigenfrequenzen nicht im Bereich des Arbeitsfrequenzbereiches des Schwinggebildes liegen [Tie98]. Andernfalls könnte die Ambossschwingung dazu führen, dass Sonotrode und Amboss gegeneinander schlagen. Die Piezokeramiken des Konverters würden durch die dabei auftretenden Kraftimpulse Spannung abgeben, die entweder die Keramiken zerstören, oder im Generator Schaden anrichten könnten.

Vorschubeinheit

Zum Siegeln werden Sonotrode und Amboss gegeneinander verspannt und dadurch die Folien fixiert. Die Krafterzeugung erfolgt in Verpackungsmaschinen meist pneumatisch, es werden aber auch servoelektrische Antriebe verwendet, die jedoch teurer sind. Die Ausdehnung des Werkzeugs zu Beginn der Schwingung verursacht sehr hohe Reaktionskräfte, wodurch es zu einer elastischen Verformung des Maschinengestells kommen kann [Bac14]. Insbesondere bei pneumatischen Vorschubeinheiten übersteigt die Summe der Reaktionskräfte die Haltekraft der Pneumatik aufgrund

der Kompressibilität der Luft. Durch die Werkzeugschwingung wird außerdem eine Druckwelle erzeugt, durch welche die Sonotrode vom parallel angeordneten und in geringem Abstand befindlichen Amboss weggedrückt wird. Diese Druckdifferenz zum Umgebungsdruck wird als Schalldruck bezeichnet [Wod04]. Das Nachsetzen der Sonotrode am Ende des Fügevorgangs (siehe Abbildung 2-10) ist auch auf den nachlassenden Schalldruck zurückzuführen. Zu Beginn der Schwingung ist daher messtechnisch zu beobachten, dass sich die Sonotrode hinsichtlich ihrer Nulllage scheinbar vom Amboss entfernt [TD10]. Dieser Effekt hält an, bis das Siegelmaterial erweicht. Die genannten Effekte begünstigen die anfängliche Grenzflächenreibung durch Relativbewegung der beiden Folien. Die servoelektrischen Antriebe haben den Vorteil, dass dabei Kraft- bzw. Positionsänderungen während des Fügevorgangs möglich sind, wodurch bessere *Schweißnaht*qualitäten erzielt werden können [MK93]. In aktuellen Untersuchungen ([TB13], [MAH+14]) wurde gezeigt, dass auch die *Siegelnaht*qualität von der Fügegeschwindigkeit abhängt, welche bei servoelektrischen Antrieben besser gesteuert werden kann.

2.4.5 Lernen von Generator und Schwinggebilde

Die Schwingung des Schwinggebildes und dessen Erregung durch den Generator müssen aufeinander abgestimmt sein. Dies erfolgt mittels komplex parametrierbarer Regler- und Regelstrategien in der Generatorsteuerung. Die genaue Funktionsweise dieser Regelung ist dabei vertrauliches KnowHow der einzelnen Hersteller der Ultraschalltechnik. Das Schwingverhalten des Schwinggebildes wird durch eine Vielzahl von Quereinflüssen beeinflusst, wie z.B. Verspannung der Bestandteile des Schwinggebildes, Temperatur des Schwinggebildes, Packstoff und Ambosskonfiguration. Deshalb gibt es bei modernen Generatoren einen automatisierten „Lern“-Modus, mit dem die Generatorregelung auf das tatsächliche Schwingverhalten abgestimmt wird. Durch die dabei gefundene Reglerkonfigurationen wird das Schwingverhalten teils erheblich beeinflusst, z.B. die Zeit bis zum Erreichen der Soll-Amplitude. Ein relevanter Einfluss auf die resultierenden Nahtfestigkeiten der unterschiedlichen Reglereinstellungen konnte dabei aber nicht festgestellt werden [TB13].

2.4.6 Prozessführung

Je nach Anwendung startet die Ultraschallschwingung erst beim Erreichen einer gewählten Siegel- oder auch Vorkraft oder die Sonotrode schwingt schon vor dem Kontakt mit den Fügepartnern. Das hängt vor allem von der Produktionsgeschwindigkeit und damit von der Zeit ab, welche für den Siegelvorgang zur Verfügung steht. Bis das Schwinggebilde mit der eingestellten Schwingungsamplitude in Resonanz schwingt, wird je nach Generatorkonfiguration eine gewisse Einschwingzeit benötigt. Bei Hochleistungsverpackungsprozessen schwingt die Sonotrode deshalb dauerhaft, damit die Schwingungsamplitude bei Kontakt mit dem Packstoff schon vollständig aufgebaut ist. Eine dauerhaft schwingende Sonotrode erwärmt sich außerdem, aufgrund von Verlustarbeit im Material. Bei solchen Anwendungen muss der Konverter deshalb gekühlt werden. Weiterhin spielen energetische Aspekte eine Rolle, bei intermittierendem Betrieb ist der Anteil der Ultraschallsiegelzeit an der gesamten Taktzeit meistens sehr gering, weshalb eine dauerhaft schwingende Sonotrode unnötig Energie verbrauchen würde.

Es gibt je nach Prozessführungsstrategien verschiedene Abschaltkriterien für das Beenden der Schwingung. Bei einem weggesteuerten Fügevorgang wird die Ultraschallschwingung nach einem definierten Werkzeugweg gestoppt, also bei Erreichen einer bestimmten Nahtverjüngung. Ein energiegesteuerter Fügevorgang wird beendet, wenn die zuvor definierte Energiemenge vom Generator aufgenommen wurde. Beim zeitgesteuerten Siegeln wird die Werkzeugschwingung nach dem Verstreichen einer definierten Siegelzeit gestoppt.

2.5 Störungen des Verschleißvorgangs

2.5.1 Definition Störung

Eine Störung des Verschleißvorgangs liegt dann vor, wenn eine ungewollte Abweichung des Prozesses vom angestrebten Prozessablauf stattfindet. Die Benetzung, bzw. Kontamination der zu versiegelnden Folienoberflächen mit Packgut (oder Packhilfsmittel) ist dabei eine der Hauptursachen für nicht qualitätsgerechte Siegelnähte und Verpackungen [DT09]. Verpackungsprozesse, bei denen aber absichtlich unter konstanten Bedingungen durch das Produkt hindurchgesiegelt wird (z.B. bei Getränkekartons), sind demnach keine Störung, weil keine Abweichung vom angestrebten Prozessablauf vorliegt. Störeinflüsse auf den Siegelprozess an Verpackungen wurden bisher nur in vereinzelt wissenschaftlichen Arbeiten untersucht, was angesichts der sehr verbreiteten Problematik und damit einhergehenden Gefahren überraschend ist.

2.5.2 Untersuchungen zum Wärmekontaktsiegeln

SIMPSON und PRESA untersuchten den Einfluss von Fett, Käse und Wurstdarm auf unterschiedliche Siegelpolymere [SP96] beim Wärmekontaktsiegeln. Der Einfluss der Kontaminationen auf die Siegelnahtfestigkeit und auf die Siegeltemperatur zum Erreichen des Nahtfestigkeitsplateaus wurde zur Beschreibung der Kontaminationseinflüsse herangezogen. Der Einfluss von Fett und Wurstdarm ist demnach am geringsten, unterscheidet sich aber je nach untersuchtem Siegelpolymer. Der Einfluss von Verunreinigungen mit Käse war am drastischsten für alle untersuchten Polymergruppen, jedoch kam keine einheitliche Auftragsmethode zum Einsatz, weshalb die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar sind. Es wurde zwar eine Vielzahl von unterschiedlichen Materialgruppen untersucht, es wird aber nicht darauf eingegangen inwiefern unterschiedliche Materialeigenschaften für das unterschiedliche Verhalten der Folien verantwortlich sein könnten.

ROHSE ET AL. untersuchten den Einfluss von Kontaminationen mit pulvrigen (Kaffeepulver, geriebenen Käse, Milchpulver) und flüssigen (Olivenöl, Mayonnaise, Ketchup, Fleischsaft) Packgütern [RMA00], [MAH+00]. Es wurde gezeigt, dass Fleischsaft und Tomatenketchup diejenigen Packgüter sind, die sich am kritischsten auf die erreichbaren Siegelnahtfestigkeiten auswirken. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf die Eignung von Metalloccen-Polymeren als Siegelschicht und wiesen nach, dass diese speziell katalysierten Kunststoffe bei Kontaminationen (mit Ausnahme von Fleischsaft), weniger an Nahtfestigkeit einbüßen als herkömmliche Polymere. Der Einfluss der unterschiedlichen Kontaminationen auf das Siegelverhalten wird unter anderem durch die Ermittlung der „seal-initiation-temperature“ (SIT) bestimmt. Das ist die minimale Siegeltemperatur, bei welcher sich die benetzten Folien siegeln

lassen und dabei eine definierte Mindestnahtfestigkeit (hier 5 N/24mm) erreichen. Diese Temperatur ist bei kontaminierten Folien größer als bei den Referenzproben, weil die auf der Folie befindliche Kontamination ebenfalls erwärmt werden muss und die dafür aufgebrauchte thermische Energie im Fügeprozess fehlt. Für die Versuche im Labor wurden die Packgüter mit einem Pinsel manuell aufgetragen, wobei das Kaffeepulver jedoch zusätzlich befeuchtet werden musste um eine Haftung an der Folie zu gewährleisten. Auf Basis der beschriebenen Vorgehensweise ist der Auftrag nur schwer reproduzierbar und wurde für Kaffee unterschiedlich durchgeführt, womit die Ergebnisse und Einflüsse nur bedingt vergleichbar sind. Die Versuche mit flüssigen Kontaminationen wurden an einer vertikalen Schlauchbeutelmaschine durchgeführt. Dazu wurde eine Sprühdüse durch das Füllrohr geführt, um den vorgeformten Schlauch vor der Siegelung benetzen zu können (Abbildung 2-14).

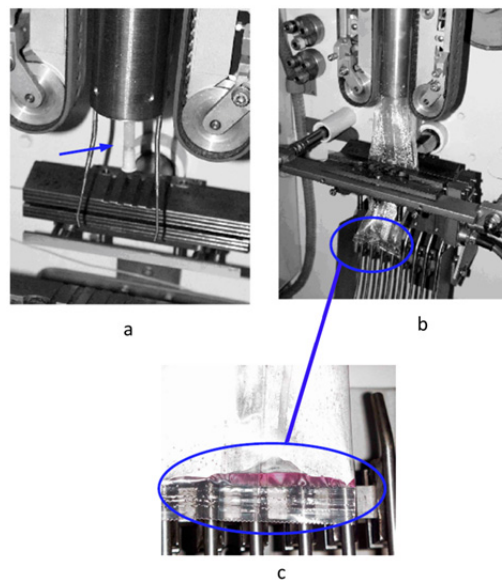


Abbildung 2-14: (a) Sprühbenetzung mittels Sprühdüse im Füllrohr (b) benetzter Schlauch (c) Siegelnaht mit eingeschlossenen Flüssigkeitstropfen [MAH+00]

FALLA konzentrierte sich in seinen Untersuchungen ausschließlich auf die Untersuchung von Olivenöl auf unterschiedlichen Siegelpolymeren [Fal01]. Sein Auftrag des Öls erfolgte auch mit einem Pinsel und ist daher ebenfalls nur schwer zu reproduzieren. Angesichts deutlich unterschiedlicher Ergebnisse zwischen Folientypen, äußerte er sich aber ebenso wenig wie SIMPSON ET AL. bezüglich möglicher Ursachen und Wechselwirkungen zwischen Kontamination und Polymer. Insgesamt wird festgestellt, dass Olivenöl nur geringfügige Verminderungen der Nahtfestigkeiten der benetzten Nähte bei allen untersuchten Materialien verursacht.

GHOSH beschreibt darüber hinaus physikalische Hypothesen zu den Vorgängen während des Wärmekontaktsiegelns mit flüssigen, tropfenförmigen Kontaminationen [Gho09]. In der Praxis gängige Siegeltemperaturen von 140 – 160 °C liegen deutlich über dem Siedepunkt von Wasser. Die Flüssigkeitstropfen die sich im Nahtbereich befinden werden demnach vom Siegelpolymer eingeschlossen und verdampfen. Der hohe wirkende Siegeldruck des Werkzeugs verhindert zunächst das Entweichen und Expandieren des Flüssigkeitsdampfes. Beim Öffnen der Siegelwerkzeuge expandiert das Gas, wodurch die Siegelnaht geschädigt werden kann oder Hohlräume entstehen [Dar09]. Typische tropfenförmige Kontaminationen entstehen z.B. beim Verpacken von

Tiefkühlkost, bei dem es zur Bildung von Kondenswasser kommen kann, welches während des Siegelprozesses verdampft. Dabei dehnt sich der Wasserdampf aus und verdrängt die Schmelze aus dem Siegelbereich. Zudem kühlt sich die Schmelze an den benetzten Siegelflächen schneller ab, sodass folglich der Nahtbildungsvorgang beeinflusst wird.

MIHINDUKULASURIYA und LIM untersuchten den Einfluss von Wasser und Öl auf die Siegelnahtfestigkeit beim Wärmekontaktsiegeln ([ML12a], [Mih12]). Für die Versuche wurden kleine Beutel (10x15 mm) hergestellt, die mit einer definierten Menge Kontaminationsgut (3 ml) gefüllt wurden. Die homogene Verteilung der Kontamination innerhalb des Siegelbereiches wurde nicht bestimmt, jedoch erscheinen diese Versuche als relativ genau im Vergleich zu den anderen genannten Publikationen mit flüssigen Packgütern. Es wurden außerdem kleine Thermoelemente ($\varnothing 50 \mu\text{m}$) zwischen den Folien eingesiegelt, um die Temperatur an den Fügeflächen bestimmen zu können (siehe Abbildung 2-15).

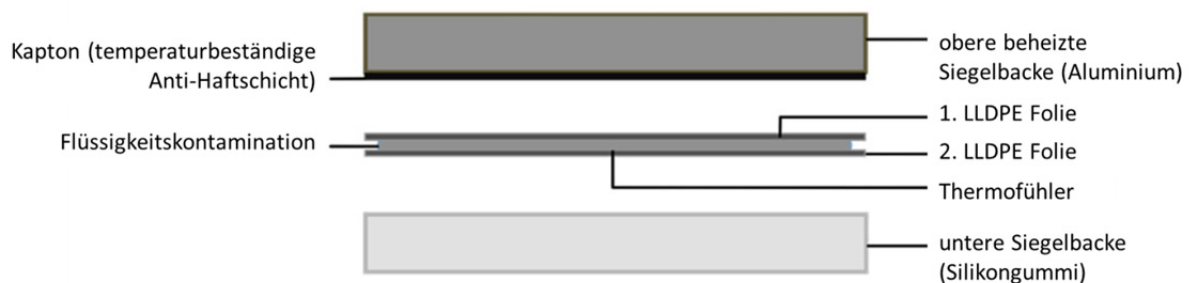


Abbildung 2-15: Messaufbau zur Bestimmung der Oberflächentemperatur beim Siegelvorgang durch flüssige Kontamination [ML12a]

Anschließend wurde der Einfluss der Siegeltemperatur, der Siegelzeit und des Siegeldruckes auf die Siegelnahtfestigkeit ermittelt. Dabei wurde nicht nur die maximale Siegelnahtfestigkeit herangezogen, sondern auch das Nahtbruchbild kategorisiert und in die Analyse einbezogen. Laut der Untersuchungen müssen die Prozessparameter auf die Kontamination abgestimmt werden. Interessanterweise ermittelten MIHINDUKULASURIYA und LIM, dass bei einer Kontamination mit Öl geringere Siegelzeiten und eine geringere Siegeltemperatur günstiger sind, als bei den Referenzsiegelungen ohne Kontamination. In [ML12b] wird ein Modell zum Wärmetransfer beim Wärmekontaktsiegeln durch Flüssigkeitstropfen beschrieben.

SCHENK konzentrierte sich in seinen Untersuchungen auf den Einfluss von flüssigen Kontaminationen an unterschiedlichen Siegelpolymeren [Sch12]. Hintergrund der Untersuchung waren marinierte Fleischstücke, bei deren Verpackungsvorgang Störungen der Siegelnaht auftreten können. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Marinaden, welche mit definierter Tropfengröße auf die zu siegelnden Folien aufgebracht wurden. Nach dem Siegelvorgang wurde die sich ausbildende Tropfengröße in der Naht gemessen. SCHENK stellt abschließend fest, dass Polymere mit guten Eigenschaften hinsichtlich kontaminierter Oberflächen den Tropfen umschließen müssen, um Kapillarbildung durch die Naht zu verhindern.

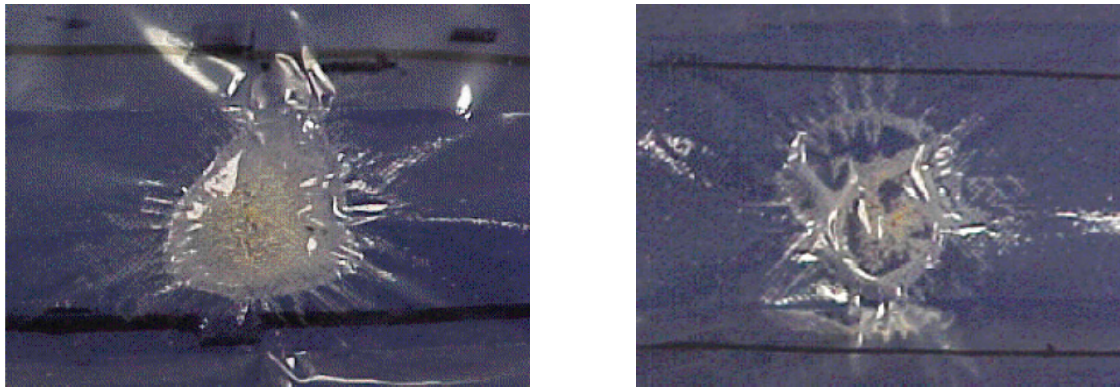


Abbildung 2-16: Unterschiedliches Umschließungsverhalten von tropfenförmig aufgetragenen Kontaminationen aus [Sch12]

2.5.3 Untersuchungen zum Ultraschallsiegeln

Spezielle Verdrängungsmechanismen

Das Ultraschallsiegeln wird immer wieder als vorteilhaft in Bezug auf produktbenetzte Packstoffe genannt ([Fis09], [Hue11], [N.N.11], [N.N.12]). Dabei spielen verschiedene Verdrängungsmechanismen eine Rolle, die in Abbildung 2-17 dargestellt sind.

Durch die systembedingt spitzere Werkzeuggeometrie (ERG) können im Nahtbereich verbliebene Packgutteile schon durch die statische Siegelkraft beim Schließen der Werkzeuge verdrängt werden. Diese Verdrängung wird beeinflusst durch die konkreten Packguteigenschaften (z.B. Festigkeit, Viskosität, Adhäsion), die anliegende statische Siegelkraft und die Menge an Packgut im Nahtbereich.

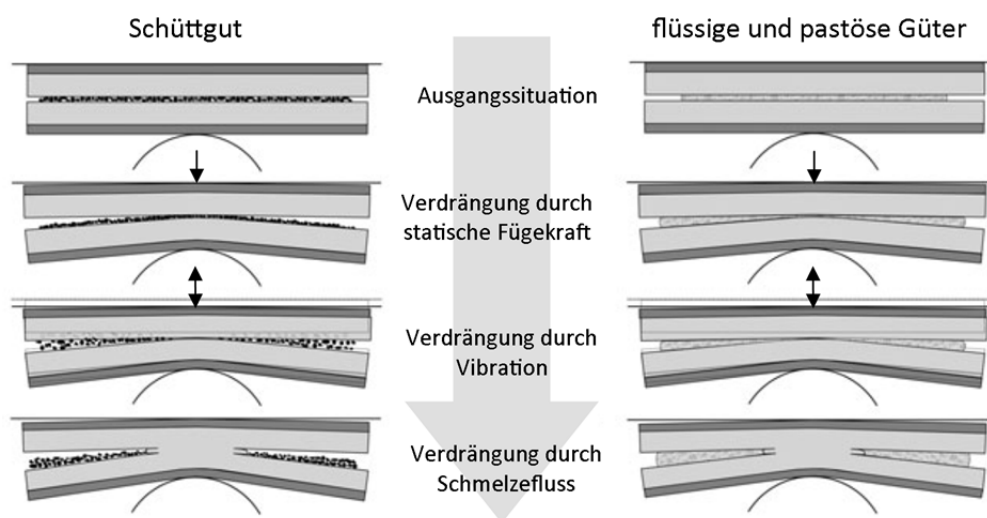


Abbildung 2-17: Verdrängungsmechanismen von Packgütern im Nahtbereich beim Ultraschallsiegeln aus [BTM12]

Durch die Oszillation des Werkzeuges während des Ultraschallsiegeln und die damit verbundene Vibration der Folien, sowie den auftretenden Schalldruck werden insbesondere Schüttgüter im Nahtbereich zusätzlich verdrängt, was in eigenen Voruntersuchungen ([TBK11], [BTM12]) bestätigt werden konnte (siehe Abbildung 2-18). Die Verdrängung durch die Werkzeugoszillation wird dabei von der Schwingamplitude und den zuvor genannten Packguteigenschaften beeinflusst.

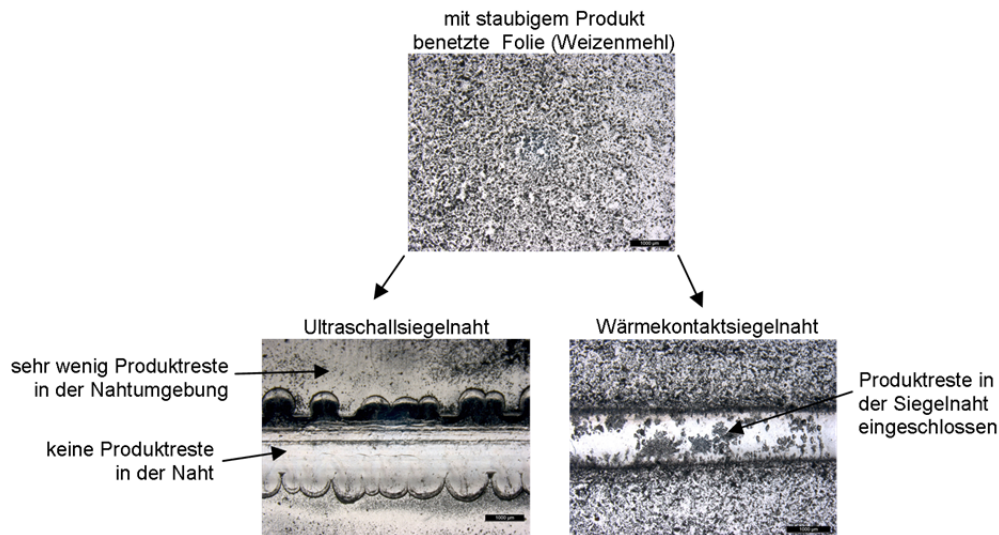


Abbildung 2-18: Mikroskopische Aufnahme von mit staubigem Produkt benetzten Siegelnähten bei Ultraschall- und Wärmekontaktsiegelverfahren nach [TBK11]

Der dritte Verdrängungsmechanismus entsteht durch den verfahrensspezifischen Schmelzfluss beim Ultraschallsiegeln. Die zu fügenden Folien erwärmen sich zuerst an ihrer Grenzfläche, weshalb aus der Nahtmitte sehr viel Schmelze zu den Nahträndern verdrängt wird. Eingeschlossene Packgutreste befinden sich genau an dieser Grenzfläche und werden deshalb durch den Schmelzfluss mitgenommen und aus der Nahtmitte verdrängt, was in Abbildung 2-19 dargestellt ist.

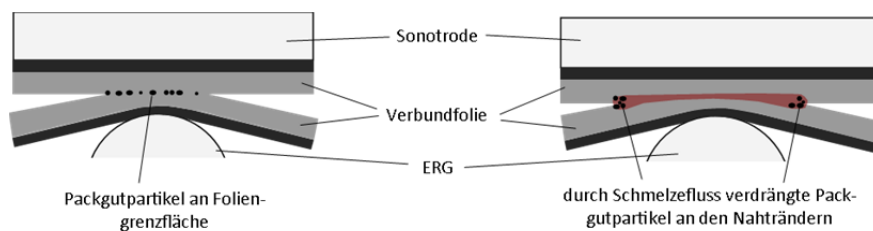


Abbildung 2-19: links) Packgutpartikel an der Foliengrenzfläche vor dem Siegeln, rechts) Packgut durch Schmelzfluss aus der Nahtmitte verdrängt

Wissenschaftliche Untersuchungen

ERNST führte vergleichende Untersuchungen zwischen Ultraschall- und Wärmekontaktsiegelungen an unterschiedlich kontaminierten Folien durch und untersuchte dabei pulvrige (Mehl und Kaffee) und flüssige (Wasser, Milch, Sonnenblumenöl, Shampoo) Packgüter[Ern90]. Er stellte fest, dass pulvrige Kontaminationen keinen wesentlichen Einfluss auf die Siegelnahtfestigkeit beim Ultraschallsiegeln haben. Jedoch musste bei höheren Frequenzen die Siegelzeit erhöht werden, was von ihm nicht weiter diskutiert wird. Eine Erklärung wäre, dass durch die systembedingt kleineren

Amplituden bei Ultraschallsystemen höherer Frequenzen (siehe 2.4.4.) ein geringerer Schalldruck erzeugt wird, sodass pulvrige Packgüter weniger gut verdrängt werden. Größeren Einfluss hatten die Kontaminationen beim Wärmekontaktsiegeln, wobei im schlimmsten Fall Nahtfestigkeitseinbußen von 50 % gemessen wurden. Mehl war dabei kritischer als Kaffee, wobei die Ursache laut ERNST die unterschiedliche Benetzungsmenge gewesen sein könnte. Bei seinen Versuchen mit Flüssigkeiten wurden sehr große Unterschiede ersichtlich, die sowohl verfahrens-, packstoff- und flüssigkeitsspezifisch sind. Als kritischstes Produkt erwies sich Milch, wohingegen Öl am unkritischsten war. Bei diesen Versuchen wurden mit flüssigem Packgut gefüllte Beutel hergestellt, die anschließend mittig durch die Flüssigkeit gesiegelt wurden. Es muss jedoch kritisch hinterfragt werden, wie reproduzierbar ein gefüllter Beutel zwischen den Siegelwerkzeugen positioniert werden kann und wie sichergestellt worden ist, dass die Flüssigkeitsmenge welche sich im Nahtbereich befand, auch konstant war.

Von BACH ET AL. wurden exemplarische Versuche zur Durchsiegelung von verschiedenen Packgütern mit Ultraschall untersucht (siehe Abbildung 2-20), bei denen der Auftrag jedoch manuell erfolgte und dadurch nur schwer reproduzierbar ist [BTM12]. In den Untersuchungen wurde aber deutlich, dass die resultierenden Nahteigenschaften beim Siegeln durch das Produkt sehr stark vom jeweiligen Packstoff abhängen. Eine identische Kontamination hatte bei einem Packstoff mit Metalloccen-Siegelschicht fast keinen Einfluss auf die Nahtfestigkeit, führte bei einem zweiten Packstoff mit einer Siegelschicht aus PE-LLD jedoch zu Nahtfestigkeitseinbußen von über 50 %.

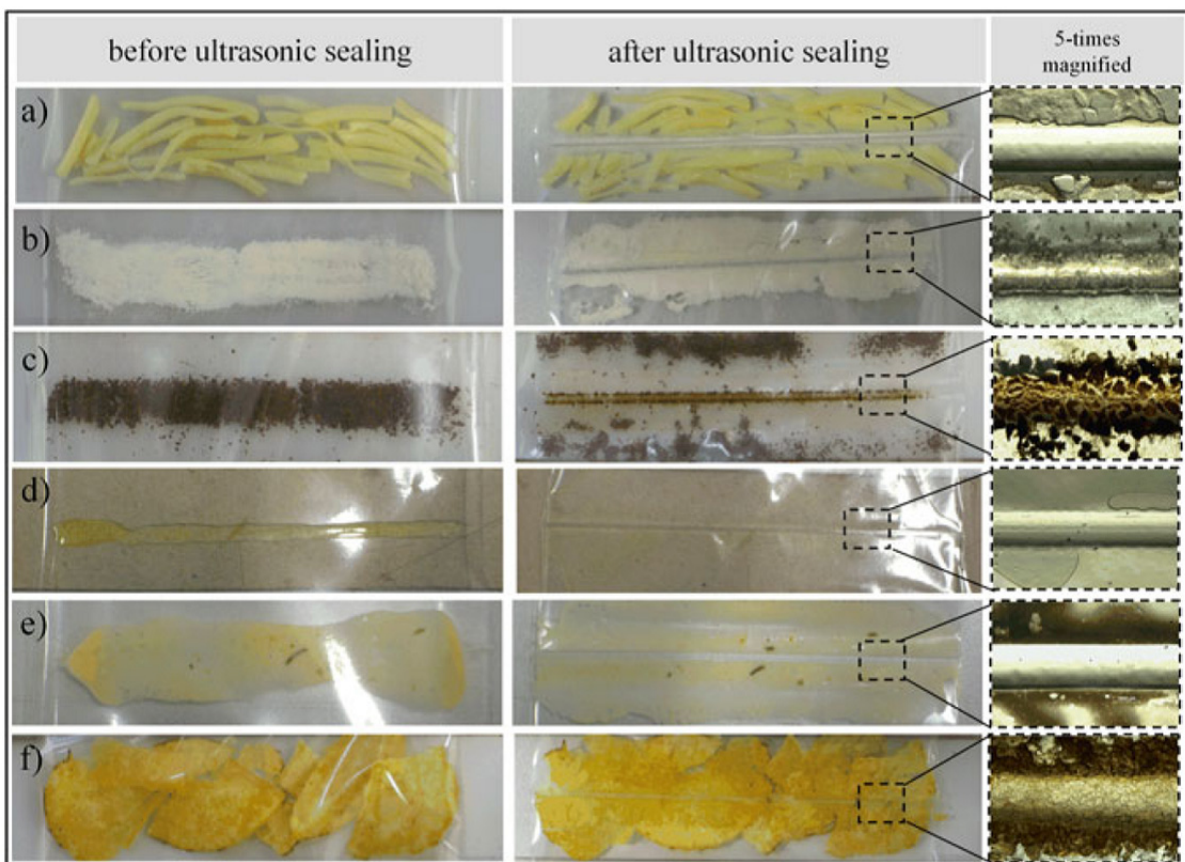


Abbildung 2-20: Darstellung produktbenetzter Nähte vor und nach dem Ultraschallsiegeln durch verschiedene Packgüter: a) geriebener Käse, b) Weizenmehl, c) Kaffeepulver, d) Olivenöl, e) Salatdressing, f) Kartoffelchips aus [BTM12]

2.6 Prozessüberwachung

2.6.1 Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung

Bezogen auf Verarbeitungsmaschinen bedeutet Qualitätssicherung sicherzustellen, dass die produzierten Güter ihre Funktionen (in Bezug auf Verpackungsmaschinen s. Kap. 1.2) erfüllen. Dazu sind verschiedene Prüfungsarten je nach konkretem Anwendungsfall unterschiedlich gut geeignet. Bei der 100%-Prüfung werden alle produzierten Güter, hinsichtlich definierter Qualitätsmerkmale von der eigentlichen Produktion entkoppelt, mit geeigneten Messmitteln geprüft [DIN 55350-17]. Diese Prüfungsart kann nur zerstörungsfrei durchgeführt werden und ist, wenn sie nicht automatisiert erfolgt, mit einem hohen Aufwand verbunden [Ric97]. Sie ist vor allem für Güter und Qualitätskriterien mit hohen Anforderungen an die Produktsicherheit sinnvoll, wie z.B. die optische Kontrolle des Mindesthaltbarkeitsdatums auf einer Verpackung.

Im Gegensatz dazu gibt es die sog. Stichprobenprüfung, bei der in definierten Abständen aus der Gesamtproduktion ein Prüflös zur Qualitätsprüfung entnommen wird [DIN 55350-17]. Anhand dieses Loses werden dann meist mehrere Qualitätsmerkmale geprüft, wobei auch zerstörende Prüfungen zum Einsatz kommen können, wie z.B. die Analyse von Nahtfestigkeit und -dichtigkeit. Die Prüfkosten der Stichprobenprüfung sind gering und sie wird beispielsweise zu Beginn und am Ende einer Charge oder Schicht durchgeführt, um davon auf die Qualität der gesamten produzierten Güter zu schließen.

Qualitätsmerkmale, die ausschließlich mittels zerstörender Prüfungen bewertet werden, können nie an jedem produzierten Gut durchgeführt werden. Daher wird angestrebt, die Prozessgüte stattdessen anhand von Prozessdaten zu bewerten, um daraus auf die Qualitätsmerkmale rückschließen zu können. Prozessdaten sind alle verfügbaren Daten, die in Zusammenhang mit dem jeweiligen Prozess und seiner Güte stehen.

Die Prozessüberwachung ist die Bewertung der Prozessgüte anhand der Ergebnisse der Qualitätsprüfung und/oder der Prozessdaten. Der Eingriff in den Prozess auf Grundlage der Ergebnisse aus der Prozessüberwachung stellt eine Prozessregelung dar.

2.6.2 Arten der Prozessüberwachung

Die Prozessüberwachung lässt sich in statistische und kontinuierliche Prozessüberwachung unterteilen [Neh11]. Bei der statistischen Prozessüberwachung werden, ähnlich zur Stichprobenprüfung, periodische Prüfungen an definierten Qualitätsmerkmalen der produzierten Güter durchgeführt, und die daraus ermittelten statistischen Größen mit Hilfe sogenannter Qualitätsregelkarten erfasst. Die mit den Regelkarten erfassten Werte werden anhand definierter Vorgaben ausgewertet und dadurch der Prozess geregelt [Sch00]. Zum Beispiel kann die Varianz der Nahtfestigkeiten periodisch kontrolliert werden und bei Überschreiten eines gewissen Grenzwertes oder Auftreten eines Trends, wird die optische Prüfung und Reinigung des Siegelwerkzeuges veranlasst. Neben der statistischen Analyse von messbaren Qualitätsmerkmalen am produzierten Gut (z.B. Nahtfestigkeit) wird diese Methode auch häufig für Prozessparameter verwendet. Diese Art der Prozessüberwachung wird zunehmend auch auf einfach zu ermittelnde Kenngrößen aus der

Maschinensteuerung des Prozesses angewandt (z.B. Leistungsaufnahme, Motorströme), die in Zusammenhang mit der Produktqualität stehen ([Neh11] [Lot08]). Ein großer Nachteil der statistischen Methode ist der zeitliche Verzug zwischen Auftreten eines Fehlers und dessen Erkennung ([Neh11], [Sch00], [Ric97]).

Die kontinuierliche Prozessüberwachung erfolgt sowohl anhand von direkt messbaren Qualitätsparametern (z.B. Bauteilabmessungen), als auch durch die indirekte Messung von Ersatzkenngrößen [Suw99]. Die direkten Größen lassen sich meist nicht messen ohne den Prozess zu stören, weshalb häufiger die indirekten Größen genutzt werden [KK05]. Die Prozessüberwachung anhand von Prozessparametern setzt einen Zusammenhang zwischen Qualitätsmerkmal und entsprechender Größe voraus. Dieser Zusammenhang ist teilweise sehr komplex und nicht immer eindeutig [Neh11]. Weil die Parameter anhand jedes einzeln produzierten Gutes kontrolliert werden, kommen analog zur 100%-Prüfung keine zerstörenden Prüfungen zur Anwendung. Die kontinuierliche Prozessüberwachung ist außerdem genauer, weil einzelne fehlerhafte Güter sicher erkannt werden können [Neh11].

Neben der Prozessüberwachung gibt es die sog. Maschinenüberwachung, bei welcher aber der Schutz der Maschine im Vordergrund steht und vor allem bei Werkzeugmaschinen zum Einsatz kommt. Beide Überwachungssysteme ähneln sich hinsichtlich der Datenakquise und -verarbeitung [WB06].

2.6.3 Ablauf einer Prozessüberwachung

Datenakquise und -aufbereitung

Es existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Datenaufbereitung, zur Verarbeitung und zur Interpretation von Prozessdaten. Eine Sammlung und Sortierung erfolgt u.a. durch KRÜGER und SUWALSKI, auf deren Basis die hier vorgenommene Ausführung erfolgt ([Suw99], [Krü99]). Die eigentliche Erfassung der Prozessdaten geschieht mit Hilfe geeigneter Sensoren. Die aufgezeichneten Rohdatenverläufe werden anschließend für die automatisierte Weiterverarbeitung aufbereitet, z.B. unter Anwendung von Filter-, Verstärkungs-, oder Transformationsverfahren [Lot08]. Dadurch können die Signale von vorhandenen Störeinflüssen bereinigt werden. Anhand dieser vorverarbeiteten Signale kann eine Auswertung bzw. Merkmalsgewinnung erfolgen, z.B. durch Berechnung von Mittelwert und Streuung, Integration von Datenverläufen und Berechnung statistischer Parameter [WB06]. Die Merkmalsgewinnung erfolgt vor allem zur Reduktion der zu verarbeitenden Datenbasis auf den interessierenden Informationsgehalt [Krü99].

Dateninterpretation

Die aufbereiteten Prozessdatenverläufe und extrahierten Prozesskennwerte müssen vor der Klassifikation und zur Zustandsbewertung zunächst interpretiert werden. Dazu existieren verschiedene Ansätze zur Dateninterpretation ([Hil03], [Lot08], [Neh11]).

Die einfachste Form sind logikbasierte Analyseverfahren, bei denen durch Überwachung von Schaltzuständen oder deren Kombination auf Prozesszustände rückgeschlossen werden kann. So

kann z.B. in Verpackungsmaschinen das Vorhandensein von Packmittel mit Hilfe eines Lichtschrankensensors überwacht werden.

Eine weitere Form ist die Grenzwertüberwachung, bei deren Überschreiten z.B. ein Fehlersignal erzeugt werden kann. Es ist auch möglich, dass sich die Grenzwerte dem Prozesszustand der Maschine anpassen, z.B. je nach Bearbeitungsprogramm. Es gibt auch die Möglichkeit dynamischer Grenzwerte, welche sich einem veränderlichen Datensignal anpassen. Diese sind vor allem bei sehr plötzlich auftretenden Kennwertabweichungen geeignet [WB06].

Die modellbasierte Prozessüberwachung erfolgt durch den modellierten Zusammenhang zwischen ermittelten Prozesskennwerten und der Qualität des Prozesses oder des produzierten Gutes. Die Dateninterpretation erfolgt dabei durch den Vergleich der beobachteten Werte mit einem Referenzmodell [Lot08]. Es gibt unterschiedliche Arten von Modellierungsmethoden. Mit mathematisch physikalischen Prozessmodellen kann ein Prozess zwar sehr genau beschrieben werden, jedoch ist die Erfassung aller notwendigen Randbedingungen und Wechselwirkungen praktisch nur schwer möglich. Es kommen deshalb häufig datenbasierte Modelle zum Einsatz, die auf Basis von zuvor gemessenen Messdaten erstellt werden. Die Modellbildung erfolgt dabei mit unterschiedlichen Methoden, wie z.B. Regressionsmodellen oder verschiedenen Typen von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN). Der Nachteil von datenbasierten Methoden ist der vergleichsweise hohe Versuchsaufwand, der für die Modellbildung notwendig ist [Neh11]. KNN vereinfachen zwar die Modellbildung, weil diese durch einen Lernalgorithmus erfolgt [Krü99], als Nachteil gelten jedoch der zum Lernen notwendige Zeitaufwand und die eingeschränkte Nachvollziehbarkeit [Str97].

Die wissensbasierte Prozessdateninterpretation erfolgt mit Hilfe von sog. Fuzzy-Logic-Systemen. Damit ist es möglich sog. Expertensysteme (siehe dazu [Ise94]) mathematisch abzubilden und dadurch für Prozesskennwerte zugänglich zu machen [Neh11].

Es gibt innerhalb der verschiedenen Verfahren zur Dateninterpretation zahlreiche weitere Variationen, auf spezifische Anwendungen optimierte Entwicklungen und auch zahlreiche Kombinationen aus Fuzzy-Logic-Modellen und KNN [Neh11]. Bei der Prozessdiagnose würde der Dateninterpretation eine Klassifizierung der Fehler nachfolgen. Auf deren Basis kann mit einer Prozessregelung der Fehler nach Möglichkeit und Bedarf abgestellt werden [Suw99].

2.6.4 Prozessdaten und Prozessüberwachung beim Fügen mit Ultraschall

Einer der häufig genannten Vorteile des Ultraschallsiegeln ist die Möglichkeit der Prozessüberwachung durch Erfassung der Prozessdaten ([Mah09], [Fis09], [Hue11]). Mit dem Begriff Prozessdaten sind alle messbaren Größen gemeint, die man während eines Fügeprozesses aufzeichnen kann. Dies sind einerseits mittels externer Sensoren messbare Größen (Siegelkraft und Siegelweg) und andererseits eine Vielzahl von Daten, die vom Ultraschallgenerator ausgegeben werden. Dazu zählen Leistung, Frequenz und Amplitude, welche direkt den Fügevorgang betreffen,

sowie elektrische Prozessdaten (ePD)⁶. Die Prozessdaten können einen zeitlich veränderlichen Verlauf während des Fügevorgangs haben und sowohl direkt am Ultraschallsiegelsystem, als auch durch externe Sensoren erfasst werden. Aufgrund eigener Voruntersuchungen [TB13] haben sich dabei folgende Prozessdatenverläufe als relevant für die Bewertung von Ultraschallsiegelungen erwiesen:

- Siegelkraft (extern über Sensor erfasst)
- Siegelweg (extern über Sensor erfasst)
- Leistung (vom Generator ausgegeben)
- Amplitude (vom Generator ausgegeben)

Die Prozessdaten sind für das Ultraschallschweißen von Kunststoffformteilen in einer ganzen Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten untersucht worden, wohingegen für das Ultraschallsiegeln von Folien keine entsprechenden Arbeiten bekannt sind.

Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Prozessablauf und Prozessdaten wurde früh nachgewiesen. So wurde bereits durch BECKER festgestellt, dass die Verlustleistung des Ultraschallgenerators äquivalent zur aufgenommenen Energie der Fügepartner ist und sich deren Verlauf je nach Prozessführung und zu fügendem Material signifikant unterscheidet [Bec71].

RITTER untersuchte die verschiedenen Energiewandlungsmechanismen beim Ultraschallschweißen [Rit86]. Er zeichnete bei seinen Schweißversuchen den Verlauf der Leistung, der Siegelkraft und die Schwingung der Fügepartner in unterschiedlichen Raumrichtungen auf. Er beurteilte die erzielte Schweißnahtqualität anhand von Zugversuchen und verglich diese mit den aufgezeichneten Prozessdaten. Er hat dabei festgestellt, dass es einen Zusammenhang zwischen maximaler Schweißnahtfestigkeit und maximal abgegebener Energie (aus integriertem Leistungsverlauf) gibt: Es existiert demnach ein überkritischer Siegeldruck, bei dessen Überschreitung die Nahtqualität abnimmt (siehe Abbildung 2-21). Dieser überkritische Druck ist ebenfalls anhand der Energie zu erkennen. Bei der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Nahtqualität und Schweißenergie wurden die Leistungsverläufe von RITTER jeweils nur integral über die gesamte Schweißzeit betrachtet.

⁶ Die elektrischen Prozessdaten haben sich beim Ultraschallsiegeln als nicht aussagekräftig erwiesen, weshalb sie im folgenden Abschnitt genannt, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht erklärt werden, es sei dazu auf die entsprechenden Literaturangaben verwiesen.

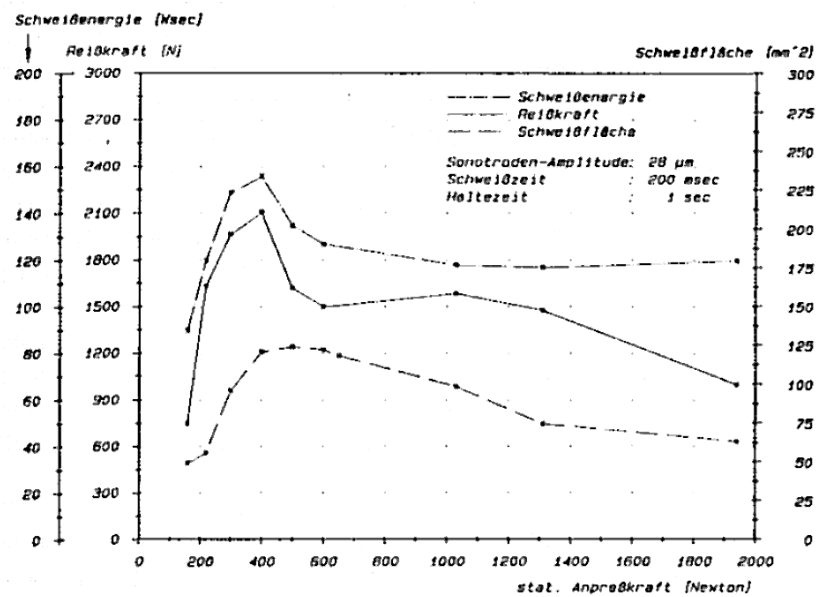


Abbildung 2-21: Zusammenhang von maximaler Nahtfestigkeit mit maximaler Schweißenergie [Rit86]

BENATAR untersuchte das Ultraschallschweißen von thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen und erkannte einen Zusammenhang zwischen optimaler Nahtfestigkeit und einem Anstieg der dynamischen Impedanz (ePD). Die höchsten Nahtfestigkeiten wurden erreicht, sobald der ERG komplett aufgeschmolzen und verdrängt war, was gleichzeitig zu einem sprunghaften Anstieg der dynamischen Impedanz führte. Dieser Anstieg konnte als Abschaltkriterium des Fügeprozesses genutzt werden. BENATAR empfiehlt eine indirekte Messung des Anstieges der dynamischen Impedanz durch Erfassung der Leistung und Beschleunigungsverläufe, die zum selben Zeitpunkt ansteigen [Ben87], [BG89].

Von EL BARBARI wurde ein Messaufbau und ein Berechnungsverfahren beschrieben, mit deren Hilfe sich der mechanische Verlustfaktor $\tan \delta$ aus den ePD (akustische Impedanz, effektive HF-Spannung, effektiver HF-Strom, Phasenwinkel und Frequenz) näherungsweise berechnen lassen [Bar88].

In [FI95] wird ausgeführt, wie sich anhand von Prozessdaten des Schweißprozesses die ePD (Schallkennimpedanz, Blindimpedanz, Impedanz) berechnen lassen.

In [MO00] wurden die ePD (elektrische Impedanz und akustische Impedanz) während eines Schweißprozesses aufgezeichnet und verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass beide Größen in ihrem Verlauf korrelieren. Es wurde gezeigt, dass damit auf den Zustand des Schweißprozesses geschlossen werden kann und es wurde die Möglichkeit der automatischen Prozessabschaltung nach bestimmten Prozessdatenkriterien diskutiert.

KHEMELEV ET AL. beschreiben ebenfalls den Zusammenhang zwischen Schweißkraft und ePD (Strom- und Spannungsverlauf, Impedanz) während einer Siegelung. Auch sie führen unterschiedliche Prozessdatenverläufe auf unterschiedliche Prozessabläufe, insbesondere des Amplitudenverlaufs, zurück und nehmen an, dass daraus auch unterschiedliche Nahtqualitäten resultieren ([KTB04], [KSB+06], [KSA08]).

Auch die Verwendung der Prozessdaten zur direkten Prozessüberwachung und Vorherbestimmung der Fügenahtqualität wurde anhand von Kunststoffformteilen untersucht, jedoch mit unterschiedlichen Ergebnissen. NETZE kommt zu dem Schluss, dass die Leistung und Energie nicht sensibel genug reagieren, um anhand dieser Größen eine Qualitätskontrolle beim Ultraschallschweißen durchzuführen [Net92]. Er untersuchte das Schweißverhalten von hochfesten und hochtemperaturbeständigen Thermoplasten und empfiehlt die Schweißkraft zu überwachen, weil diese einen größeren Einfluss auf den Prozessverlauf hat. Er erklärt dies durch den größeren Einfluss der Schweißkraft auf Energieeinleitung und die Fließprozesse der Schmelze, welche hauptsächlich die erreichbaren Nahtqualitäten beeinflussen.

KORTE untersuchte das Ultraschallschweißen von spritzgegossenen, teilkristallinen Kunststoffformteilen aus Polyoxymethylen (POM) und Polypropylen (PP) [Kor96]. Er variierte die Herstellbedingungen des Spritzgießprozesses und erkannte deutlich unterschiedliches Ultraschallschweißverhalten, aufgrund der Gefügestruktur der Bauteile. Dieses Verhalten war ebenso im messtechnisch erfassten Fügewegverlauf erkennbar. Unterschiedliche Fügegeschwindigkeit und Schmelzeschichtdicke führen zu einer verschiedenen Nahtausformung und Morphologie und beeinflussen dadurch die Nahtfestigkeit der Schweißverbindung. Er verglich außerdem die maschinenseitig ausgegebenen, integralen Prozessdaten mit den extern erfassten, zeitlich veränderlichen Prozessdatenverläufen und daraus abgeleiteten Kennwerten. Zur Qualitätskontrolle sind die integral erfassten Größen demnach ungeeignet.

MICHAELI und KORTE entwickelten außerdem statistische Prozessmodelle, mit denen Schweißnahtfestigkeit und Schweißnahtdichtigkeit auf Basis der erfassten Messdaten vorherberechnet werden konnten ([MWK94], [MKD+94], [MK95], [MWK97]). Die Genauigkeit dieser Vorhersage war jedoch mit relativ großen Standardabweichungen behaftet und wurde durch Einbeziehung der Daten aus dem Spritzgießverfahren genauer. Für verlässliche Modelle war die Methode jedoch noch nicht geeignet. Eine wichtige Erkenntnis war, dass auch vorgelagerte Produktionsprozesse (z.B. das Spritzgießen) durch unterschiedliche Gefügeausbildung die Schweißigenschaften beeinflussen können [MK94].

Die Analyse der Prozessdaten mit dem Ziel der Prozessüberwachung wurde auch durch GREITMANN untersucht, welchem mit Hilfe neuronaler Netze die Bewertung der Schweißgüte gelang [Gre03]. Dabei wurde der Leistungs-, Kraft-, Schweißweg- und Beschleunigungsverlauf während einer Schweißung erfasst, automatisch ausgewertet und nachgewiesen, dass eine automatisierte Analyse der Prozessdaten in der Lage ist, die Güte des Schweißvorgangs zu bewerten.

In [LLL+06] wurde ebenfalls mit Hilfe eines neuronalen Netzes die Voraussage der erreichbaren Nahtfestigkeit aus den ePD (elektrische Impedanz) während einer Schweißung beschrieben (Abbildung 2-22).

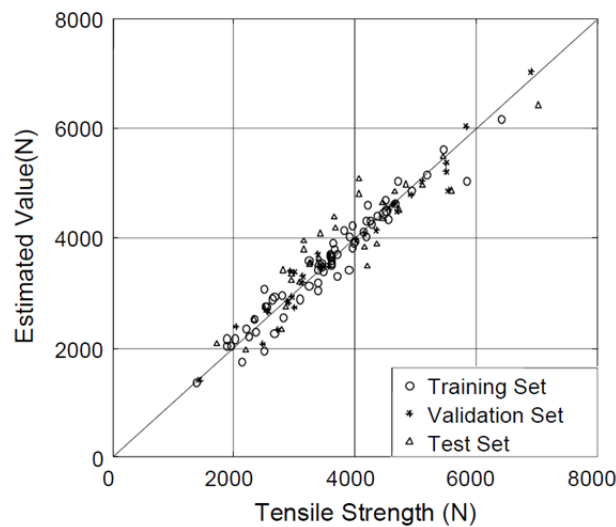


Abbildung 2-22: Vorhersage der Nahtfestigkeit mit Hilfe neuronaler Netze aus [LLL+06]

HABERSTROH und KUHLMANN beschreiben in [HK04b] die resultierende Schmelzeschichtdicke (ebenso wie KORTE) als Qualitätskriterium für Ultraschallfügenähte. KUHLMANN führte Ultraschallschweißuntersuchungen an spritzgegossenen Kunststoffformteilen durch und verglich außerdem die Prozessdaten intakter und beschädigter Schwingsysteme [Kuh06]. Er berechnete einen Kennwert, mit dessen Hilfe sich beschädigte Schwingsysteme erkennen lassen. Ein beschädigtes Schwingsystem hat unterschiedliches Schwingverhalten und führt dadurch zu einem unterschiedlichen Prozessablauf, der bestenfalls eine höhere Energieaufnahme zur Folge hat, schlimmstenfalls aber auch zu verminderten Nahtqualitäten oder zum Produktionsstopp führen kann.

KUHLMANN versuchte anhand der aufgenommenen Prozessdaten die entstehenden Nahtfestigkeiten vorherzubestimmen, was jedoch zu keinen brauchbaren Ergebnissen führte. Er erklärt dies damit, dass beim Ultraschallschweißen die Schmelzebildung und die Verdrängung der gebildeten Schmelze zeitgleich ablaufen und sich dadurch überlagern. Daher können beide Effekte anhand der Prozessdaten nicht getrennt betrachtet werden, was bei anderen (langsameren) Schweißverfahren möglich ist und dort bessere Vorhersagemöglichkeiten schafft ([Sch89], [Kai92]). KUHLMANN zufolge ist die Festigkeit einer Schweißnaht vor allem auf deren Morphologie zurückzuführen. Die Informationen lassen sich jedoch aus den Prozessdaten nicht ablesen, weil die Morphologie vor allem von den Materialeigenschaften der verwendeten Thermoplaste abhängig ist und weniger vom Fügeverfahren (siehe auch [Bac14]).

MICHAELI und WEBER beschreiben in [MW09] eine Möglichkeit zur Bewertung der Schweißnahtqualität von Kunststoffformteilen anhand einer einmaligen mikroskopischen Bestimmung der minimalen Restnahtdicke und anschließender Messung durch Überwachung des Fügeweges. Die erzielten Ergebnisse sind aber sehr stark von Geometrie und Polymermaterial der Werkstücke abhängig.

NEHER beschäftigte sich mit der Prozessüberwachung beim Ultraschallschweißen von Kunststoffformteilen und wählte dazu eine Neuro-Fuzzy-Modellierung [Neh11]. Er betrachtete, analog zu KORTE, auch den vorgelagerten Spritzgießprozess, um verlässliche Aussagen über die erreichbaren Nahtqualitäten zu generieren. Mit der gewählten Methode war es ihm möglich, allein

aus den Daten des Schweißprozesses auch Störungen aus vorgelagerten Prozessen zu erkennen. Laut NEHER seien Wirkleistung und Energie nicht geeignet, den Schweißprozess zu überwachen, weil die Leistungsaufnahme des Konverters nicht mit der Schweißkraft korreliert. Dies steht jedoch im Widerspruch zu Ergebnissen von KORTE und BACH, die einen deutlichen Zusammenhang zwischen Leistungsaufnahme und Schweißkraft gemessen haben ([Kor96], [Bac14]).

In [N.N.12] wird die industrielle Anwendung einer Prozessdatenüberwachung des Generators beim Ultraschallsiegeln beschrieben, mit der sich u.a. Packstofffalten erkennen lassen.

2.7 Zusammenfassung des Wissensstandes

Auf Grundlage der dargestellten Arbeiten lässt sich zusammenfassend feststellen, dass Störungen in Verpackungsprozessen ein Qualitätsrisiko darstellen, welches aus diesem Grund Gegenstand von unterschiedlichsten, wissenschaftlichen Untersuchungen war. Der Fokus der Arbeiten lag vor allem auf der Siegelfähigkeit der Polymere beim Wärmekontaktverfahren. Nur ERNST und BACH führten Untersuchungen zum Ultraschallsiegeln durch. Gleichzeitig sind diese Untersuchungen aber sehr vereinzelt durchgeführte Analysen, die sich untereinander nur schwer vergleichen lassen. Die Applikation von Störungen in das Siegelverfahren erfolgte je nach Kontaminationsstoffsystem unterschiedlich. Für wissenschaftlich belastbare, vergleichbare und verallgemeinerbare Analysen ist jedoch ein stoffgruppenabhängiger Auftrag unter identischen Bedingungen notwendig, der reproduzierbar ist.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass es eine Vielzahl von Untersuchungen gab, die sich mit der Analyse der Prozessdaten beim Ultraschallschweißen beschäftigt haben, jeweils mit dem Ziel, auftretende Schwankungen im Schweißprozess zu erkennen, bzw. anhand dieser Daten die Schweißnahtqualität beurteilen zu können. Eine exakte Vorhersage der Schweißnahtqualität ist demnach nur sehr schwer möglich und erfordert auch die Einbeziehung von Daten aus vorgelagerten Prozessen. Generell kommen die aufgeführten Studien zu dem Ergebnis, dass sich Veränderungen im Fügeprozess von Formteilen erkennen lassen. Ähnliche Untersuchungen beim Siegeln von Packmitteln sind nicht bekannt. Da sich der Prozessablauf und die Prozessbedingungen beim Ultraschallsiegeln von Packmitteln deutlich vom Ultraschallschweißen unterscheiden, muss die Übertragbarkeit der Ergebnisse geprüft werden. Entsprechend NEHER in [Neh11] muss verifiziert werden, ob ein Zusammenhang zwischen den erfassten Prozessdaten und der Nahtqualität beim Ultraschallsiegeln gegeben ist. Störeinflüsse bei Packmitteln sind komplexer, da auch hier die Herstellbedingungen einen Einfluss auf den Fügeprozess haben und sich mit den Störungen durch das Packgut überlagern können. Derartige Störeinflüsse sind beim Fügen von Formteilen nicht vorhanden. Die Qualitätsunterschiede im Herstellprozess von Formteilen sind meistens Unterschiede im Gefüge, welche sich beim anschließenden Schweißprozess in einem unterschiedlichen Erwärmungsverhalten darstellen. Der Erwärmungsprozess des ungeschmolzenen Gefüges ist jedoch nur ein kurzer Bruchteil zu Beginn des Prozesses. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich die auftretenden Störungen durch Packgüter sogar deutlicher auf die Prozessdaten auswirken, weil diese auch den Vorgang der Schmelzeverdrängung beeinflussen. Von einer modell- oder wissensbasierten Dateninterpretation wird im Rahmen dieser Arbeit abgesehen, weil dafür eine große Menge an Daten aus gleichförmigen Prozessen notwendig wäre. Das Ultraschallsiegeln wird aber je nach

Packstoff und Packgut bei sehr unterschiedlichen Parametereinstellungen angewendet, weshalb die Menge der zu erfassenden Daten zur Modellbildung extrem groß wäre.

3. Zielsetzung

3.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Die sichere Produktion von qualitätsgerechten Verpackungen muss das Ziel von Verpackungsprozessen im Konsumgüterbereich sein, um den gestellten Anforderungen an genannte Prozesse und Packgüter gerecht zu werden (s. Kap. 1.2). Eine absolut fehlerfreie Produktion ist jedoch technisch nicht möglich aufgrund begrenzter Zuverlässigkeit technischer Prozesse und schwankender Prozesseinflüsse. Im Bereich der Verpackung von Lebensmitteln ist die Beeinträchtigung der Verpackung durch Packgutteile im Nahtbereich eine der häufigsten Ursachen für fehlerhafte Verpackungen. Daher wird versucht, mittels einer nachgeschalteten Kontrolle die Produktqualität zu prüfen. Es existieren jedoch nach heutigem Stand der Technik keine Methoden, um die Nahtqualität (Festigkeit und Dichtigkeit) mittels 100%-Prüfung zu kontrollieren, weil diese nur durch zerstörende Verfahren ermittelt werden kann. Ein Beitrag zur sichereren Produktion ist daher die Prozessüberwachung einzelner kritischer Teilprozessschritte. Voraussetzung dafür ist ein Zusammenhang der überwachten Prozessdaten mit der Prozess- bzw. Produktqualität. Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass es durch Analyse der Prozessdaten beim *Ultraschallschweißen* möglich ist, Abweichungen vom Soll-Fügevorgang bei zyklisch-identischen Prozessen zu erkennen. Das *Ultraschallsiegeln* von dünnen Packstoffen unterscheidet sich aber teilweise erheblich vom *Ultraschallschweißen* von Formteilen und findet bei häufig wechselnden Siegelparametern Anwendung, weshalb die Übertragbarkeit solcher Erkenntnisse untersucht werden muss. Außerdem sind die möglichen, auftretenden Störungen sehr viel komplexer, aufgrund der breiten Eigenschaftspalette der unterschiedlichen Packgüter. Das *Ultraschallsiegeln* wird aufgrund seiner spitzen Werkzeuggeometrie und der Schwingung des Werkzeugs als besser geeignet für diejenigen Verpackungsprozesse beschrieben, bei denen von häufig kontaminierten Nähten ausgegangen werden muss. Der tatsächliche Einfluss von Störungen auf die resultierende Nahtqualität beim Siegeln wurde aber bisher nur vereinzelt untersucht und die einzelnen Studien sind untereinander kaum vergleichbar, weil die Applikation und Menge der Störungen stark variierten. Besteht ein Zusammenhang zwischen Nahtqualität und Prozessdaten, wäre es damit möglich einen Beitrag zur Qualitätssicherung von Verpackungsprozessen zu leisten, indem Störungen des Siegelvorgangs erkannt und durch Ausschleusen der Packung reagiert werden kann.

3.2 Arbeitshypothese

Aufgrund des dargestellten Stands der Wissenschaft und aus eigenen Voruntersuchungen ist bekannt, dass unterschiedliche Fügeprozessabläufe, welche z.B. durch unterschiedliche Siegelmaterialien und Fügeparameter hervorgerufen werden, auch unterschiedliche Prozessdatenverläufe beim *Ultraschallsiegeln* zur Folge haben [TB13]. Wenn Störeinflüsse des Siegelprozesses einen Einfluss auf die Nahtqualität und damit auf den Fügeprozess haben, dann ist davon auszugehen, dass diese Störeinflüsse auch einen Einfluss auf die Prozessdaten beim *Ultraschallsiegeln* haben. Das bedeutet, dass sich die Störeinflüsse auch anhand der Prozessdaten detektieren lassen.

3.3 Vorgehen

Zur Untersuchung der Arbeitshypothese ist beabsichtigt typische Störungen, die im Verpackungsprozess auftreten können, reproduzierbar auf Packmittel aufzubringen, um damit Ultraschallsiegelnähte unter Störeinfluss herzustellen. Bei gleichzeitiger Erfassung der Prozessdaten wird es dadurch möglich, jeweils den Einfluss der Störung auf Nahtqualität und Prozessdaten zu untersuchen.

Die Arbeit gliedert sich in folgende Teilziele:

- Systematisierung der möglichen Störeinflüsse im Verpackungsprozess
- Ableiten von experimentellen Simulationsmöglichkeiten solcher Störungen und Definition von geeigneten Modellstoffsystemen
- Entwicklung einer Methode zur Untersuchung von Störeinflüssen auf den Siegelprozess
- Entwicklung eines Versuchsaufbaus auf Basis der Methode
- Durchführung von Siegelversuchen mit/ohne Störeinfluss
 - Erfassung und Analyse der Nahtqualität
 - Erfassung und Analyse der Prozessdaten
- Vergleich der Nahtqualität von Siegelnähten mit/ohne Störeinfluss anhand von Nahtqualität und Prozessdaten

Durch die geringe Anzahl wissenschaftlicher Untersuchungen zu dieser Thematik lässt sich der Einfluss der einzelnen Störungen nur schwer abschätzen und der sich eröffnende Parameterraum für die angestrebten Untersuchungen ist gleichzeitig sehr groß. Deshalb wird ein sogenanntes „eskalierendes“ Prüfverfahren gewählt, bei dem die Störungen mit den mutmaßlich geringsten Auswirkungen nur punktuell untersucht werden. Die mutmaßlich gravierenderen und messtechnisch einfacher zu erfassenden Auswirkungen werden in einem erweiterten Parameterraum untersucht.

4. Analyse und Systematisierung von Störeinflüssen

4.1 Vorgehen

Um die Erkennbarkeit von Einflüssen auf das Ultraschallsiegelverfahren anhand der Prozessdaten des Schwingsystems untersuchen zu können, ist es zunächst sinnvoll, die Vielzahl möglicher Störungen zu systematisieren. Dazu wird eine erste Unterteilung von Störeinflüssen ausgehend vom Ort des Entstehens relativ zum Ultraschallsiegelvorgang vorgenommen. Dabei können sich unterschiedliche Störungen aus physikalischer Sicht identisch auswirken. Zum Beispiel haben kondensiertes Wasser aus vorgelagerter Heißdampfsterilisation und Packgutspritzer von wässrigen Packgütern den gleichen physikalischen Effekt während des Nahtbildungsvorgangs: mutmaßlich eine kühlende und dadurch prozessverlangsamende Wirkung. Für eine systematische Betrachtung von unterschiedlichen Störungen mittels eines Versuchsstands ist daher eine Systematisierung der möglichen Störungen nach physikalischem Effekt bzw. Störprinzip vorzunehmen.

4.2 Analyse des verarbeitungstechnischen Systems

Die Kombination aus Verarbeitungsgut und Siegelwerkzeug (sog. Arbeitsorgan) wird als Wirkpaarung bezeichnet und überführt das Verarbeitungsgut unter Einbringung von Energie von einem Eingangs- in einen Ausgangszustand [Gol78]. Eine Ultraschallsiegeleinheit einer Verpackungsmaschine ist demnach eine Wirkpaarung, bestehend aus einer gefüllten offenen Verpackung und dem Ultraschallsiegelwerkzeug. Durch die Einwirkung von Energie und mit Hilfe der Ultraschallwerkzeuge wird die geöffnete Packung zu einer geschlossenen Packung verarbeitet. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt.

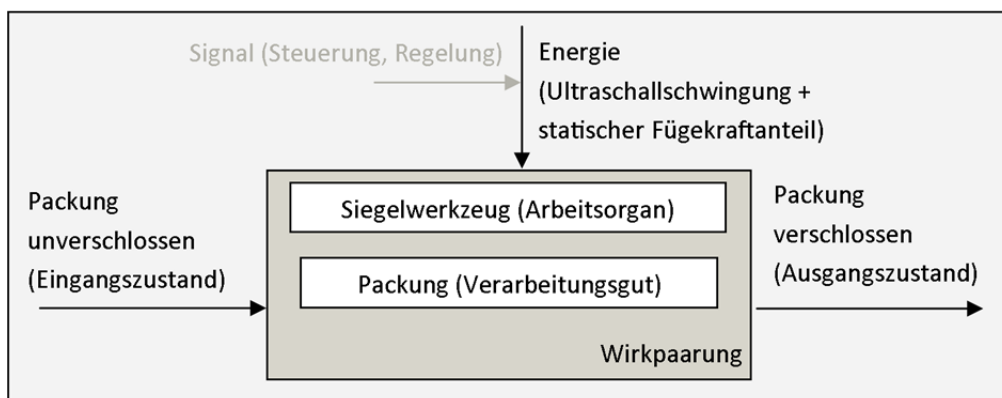


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der betrachteten Wirkpaarung nach [GK12]

4.3 Ursachen und Systematisierung von Störeinflüssen relativ zur Wirkpaarung

Betrachtet man den Ort des Entstehens bzw. das verursachende System der möglichen Störung auf das Siegelverfahren aus Sicht der Wirkpaarung, können diese im Prozessablauf vorgelagert sein oder innerhalb der Wirkpaarung entstehen. Insbesondere packgutbedingte Störungen können sowohl vor

als auch innerhalb der Wirkpaarung verursacht werden. Da der Siegelvorgang beim Verlassen der Wirkpaarung abgeschlossen ist, können keine nachgelagerten Störungen auftreten. Die entsprechende Einordnung ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

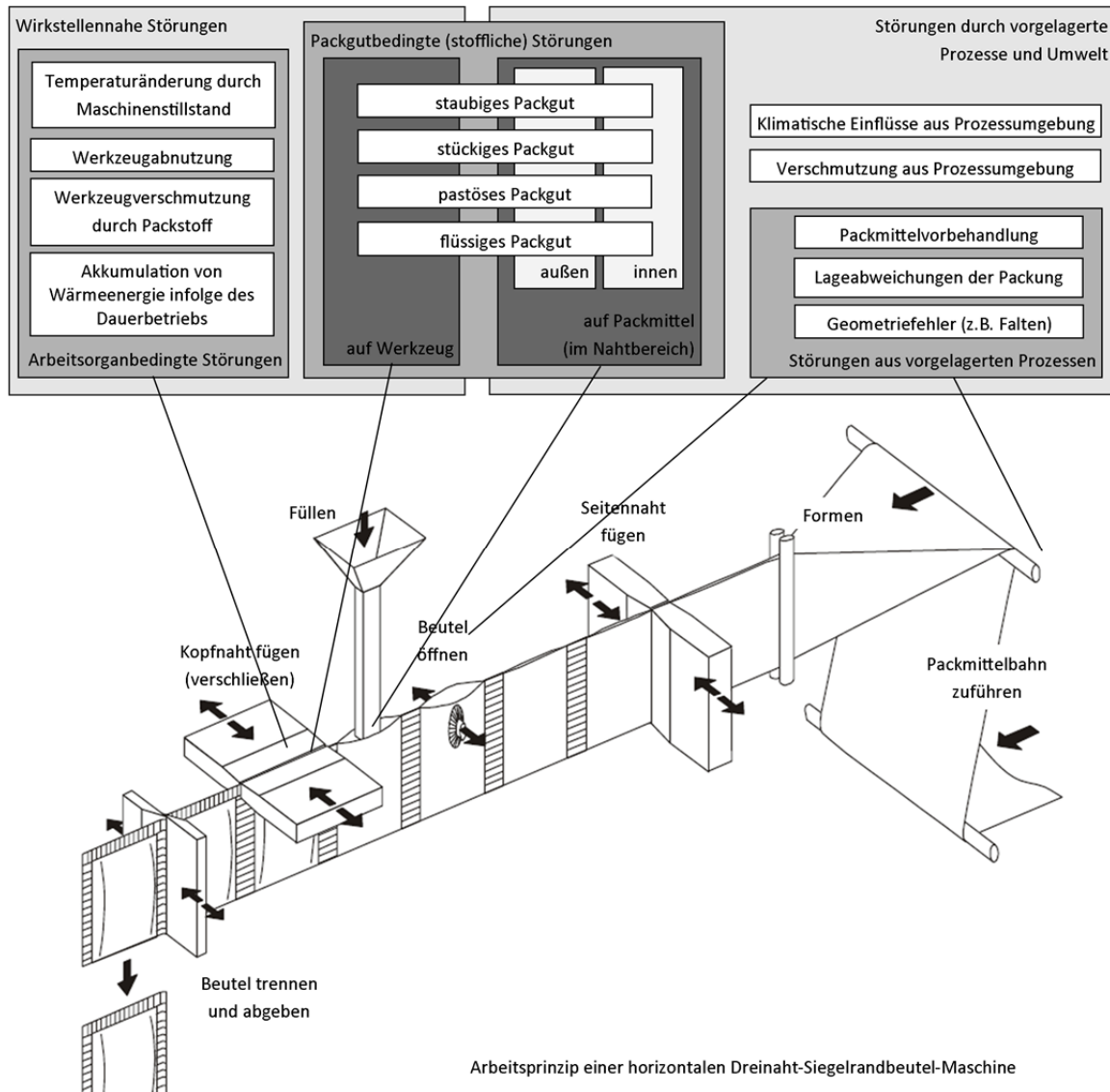


Abbildung 4-2: Einordnung von Störeinflüssen nach Ort des Auftretens relativ zur Wirkpaarung (Arbeitsprinzip nach [BLM14])

Die Mehrheit der möglichen auftretenden Störeinflüsse entsteht in vorgelagerten Prozessen, was dadurch bedingt ist, dass der Fügevorgang am Ende einer großen Zahl von Prozessschritten zum Herstellen einer Verpackung steht.

4.3.1 Klimatische Einflüsse aus der Prozessumgebung

Ursachen

Als eine mögliche Störquelle ist das Umgebungsklima, bzw. die Packmittelkonditionierung zu nennen. Aufgerollte Packmittelbahnen zum Bestücken von Verpackungsmaschinen werden

üblicherweise unter dem in [DIN EN ISO 139] definierten Normklima der kunststoffverarbeitenden Industrie (23 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit) gelagert. Die klimatischen Bedingungen in der Produktionsumgebung unterscheiden sich davon häufig, da beim Verpackungsprozess die richtige Konditionierung der Packgüter im Vordergrund steht. So werden z.B. Käse und Fleischwaren bei niedrigen Temperaturen verpackt, während Backwaren bei höheren Temperaturen verarbeitet werden. Entscheidend für die tatsächliche Kondition der Packmittelbahn während des Verarbeitens ist die Verweildauer im jeweiligen Produktionsklima. In größeren produzierenden Unternehmen gibt es deshalb zeitliche Vorgaben für die Konditionierung von Packmitteln, in denen festgelegt wird, mit wie viel Vorlaufzeit die nächste Packmittelrolle dem Produktionsklima ausgesetzt wird, um konstante Packstoffeigenschaften zu gewährleisten [VDMA 8748]. Es kann jedoch nicht immer garantiert werden, dass diese Vorgaben im Produktionsumfeld eingehalten werden können, bzw. die komplette Packmittelrolle bis zum Rollenkern entsprechend des Produktionsklimas temperiert ist. Weiterhin können ungeplante Maschinenstillstände dazu führen, dass das Packmittel unterschiedlich lange in bestimmten Maschinenabschnitten mit jeweils verschiedenen Temperaturen verweilt, z.B. in einer Verpackungsmaschine, in der die Boden- und Seitennähte mit dem Wärmekontaktverfahren gesiegelt werden. Im Falle eines Maschinenstopps erwärmt sich das dort befindliche Packmittel und beim nächsten Anfahren der Maschine hat der entsprechende Folienabschnitt demzufolge eine höhere Temperatur. Auch die äußeren klimatischen Einflüsse können sich auf die klimatischen Bedingungen der Produktionsumgebung und damit auf das Packmittel auswirken, beispielsweise der Wechsel zwischen Tag und Nacht, Wetterumschwünge oder zwischen Sommer und Winter.

Wirkmechanismen

Durch Temperaturveränderung ändern sich die Packmitteleigenschaften, wodurch sich wiederum die Prozessführungsparameter zum Erreichen einer optimalen Siegelnahtqualität verändern. Bei einem vorgewärmten Packmittel ist zu erwarten, dass der notwendige Energieeintrag zum Aufschmelzen der Siegelschicht geringer ist und bei gleichbleibender Prozessführung zu viel Energie eingebracht wird, was dann zu einer verminderten Nahtqualität führen kann.

4.3.2 Packmittelvorbehandlung

Ursachen

Bestimmte Störungen hängen von der Ausstattung der konkreten Verpackungsmaschine ab. Bei Maschinen mit vorgelagerter Bedampfung zur Kopfraumevakuierung oder Packmittelsterilisation [Buc99] kann es zu einer Vorerwärmung des Packmittels kommen. In Verbindung mit einem Maschinenstopp kann das zu unterschiedlich temperiertem Packmittel beim Fügevorgang führen. Aber auch Wassertropfen aus kondensierendem Wasserdampf im Nahtbereich der Packung (siehe Abbildung 4-3) kann sich störend auswirken.

Wirkmechanismen

Die Verhinderung des Kontaktes der Fügeflächen durch das Wasser ist aufgrund der schmalen Werkzeugkontur (ERG) im Fall des Ultraschallsiegeln unwahrscheinlich. Bei anderen Fügeverfahren mit meist flacher Werkzeuggeometrie ist hingegen zu beobachten, dass

Wassertropfen eingeschlossen werden. Durch die Siegeltemperatur wird das eingeschlossene Wasser verdampft, wodurch die Naht geschädigt werden kann (s. Kap. 2.5.2). Aber auch beim Ultraschallsiegeln kann sich das Wasser störend auswirken, weil es zwar nicht zwischen den Fügeflächen eingeschlossen wird, sich aber im Nahtbereich, also in unmittelbarer Nähe der Fügenaht befindet. Als zusätzliches Medium in Kontakt mit dem Polymer wird das Wasser ebenfalls erwärmt und die dafür notwendige thermische Energie fehlt letztlich zum optimalen Fügen der Siegelschicht. Es hat also eine Kühlwirkung und könnte sich dadurch prozessverlangsamend auswirken.

4.3.3 Packgutbedingte Störungen

Ursachen

Wichtigste und laut DUDBRIDGE ET AL. häufigste Ursache für fehlerhafte Packungen, sind Störungen im Zusammenhang mit dem Packgut [DT09]. Diese Störungen können sowohl in vorgelagerten Prozessen, als auch in der Wirkpaarung selbst entstehen. Die Ursachen dafür sind vielfältig und packgutspezifisch. Beim Abfüllen von flüssigem oder pastösem Packgut in die Verpackung kann es zu Spritzern von Flüssigkeit kommen, vor allem bei der Abfüllung mehrphasiger Packgüter mit Stückgutanteil (z.B. Tiernahrung oder Fertigsaucen). Packgutspritzer können sich aber auch außen an der Packung im Kontaktbereich zwischen Packmittel und Werkzeug oder auf dem Werkzeug selbst befinden. Das Nachtropfen aus Dosierwerkzeugen sowie Schwall- und Schwappvorgänge beim innermaschinellen Transport der Packung sind weitere Benetzungsursachen.



Abbildung 4-3: links) gefüllte Schalenverpackung mit Packgut im Nahtbereich, rechts) Beutelverpackung mit Packgut im Nahtbereich schematisch

Auch stückige Packgüter können am Packstoff anhaften, vor allem Packgüter mit Flüssigkeitsanteil (z.B. Salat oder Sauerkraut) aufgrund von Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und dem Packstoff. Trockene Schüttgüter können durch elektrostatische Adhäsion am Packstoff anhaften. Aufgrund von Reibung durch Formvorgänge der Packmittelbahn innerhalb der Verpackungsmaschine laden sich die Packmitteloberflächen elektrostatisch auf, wodurch Schüttgüter mit leichten und/oder sehr kleinen Körnern am Packstoff haften bleiben (z.B. Mehl, Kaffee). Weiterhin ist die mechanische Penetration von Packgut in Packstoffoberflächen möglich, jedoch nur bei ungünstigen

Kombinationen denkbar z.B. scharfkantige Packgüter mit sehr weichen oder unebenen Packstoffoberflächen. Die chemische Wechselwirkung von Packgut und Packstoff wird als Störungsursache ausgeschlossen, weil die wechselseitige Beeinflussung von Packgut und Packstoff bei der Verpackungsgestaltung ausgeschlossen werden muss [BMW11].

Wirkmechanismen

Befinden sich Packgutspritzer oder -teile im Nahtbereich der Packung (siehe Abbildung 4-3), haben diese eine störende thermische Wirkung, ähnlich wie die zuvor beschriebenen Wassertropfen. Im Unterschied zu den Wassertropfen muss die Verdrängung der Packgutteile aus dem Nahtbereich durch die relativ spitze Ultraschallwerkzeuggeometrie (ERG) differenziert betrachtet werden. Die Möglichkeit des Herausdrängens der Fremdkörper aus dem Nahtbereich durch die statische Siegelkraft ist dabei von den jeweiligen Packguteigenschaften abhängig. Fließfähige Packgutanteile werden relativ leicht verdrängt und umso leichter, je geringer deren Viskosität ist. Das Benetzungsverhalten der fließfähigen Packgüter spielt ebenfalls eine Rolle. Bei schlechter Benetzung des Packstoffs und demzufolge geringeren Adhäsionskräften wird die Verdrängung begünstigt. Bei stückigem Packgut ist die Möglichkeit der Verdrängung durch die statische Siegelkraft insgesamt schwieriger und ebenfalls von dessen mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Festigkeit, aber auch von der Menge der Packguts auf dem Packmittel abhängig.

Für den Fall, dass die im Nahtbereich befindlichen Packgutteile nicht verdrängt werden können, wird ein vollflächiger Kontakt der beiden Fügeflächen verhindert. Je nachdem ob die Kontaminationen durch den Schmelzefluss während des Siegelvorgangs verdrängt werden können (s. Kap. 2.5.3), wird dies zur Beeinflussung der Nahtqualität führen und im schlimmsten Fall zu nicht versiegelten Abschnitten in der Naht kommen. Unmittelbar neben der Naht befindliches Packgut hat während des Siegelprozesses eine Kühlwirkung, weil angenommen werden kann, dass die Packguttemperatur geringer als die Füge­temperatur ist.

Packgut in Kontakt mit dem Schwingsystem beeinflusst dessen Schwingverhalten, weil es als zusätzliches Medium Energie wandelt und damit die Generatorregelung beeinflusst. Dies kann zu einem veränderten Siegelprozessverlauf führen.

4.3.4 Packmittelbedingte Störungen

Die packmittelbedingten Störungen lassen sich in Lagefehler und Geometriefehler unterteilen (siehe Abbildung 4-4).

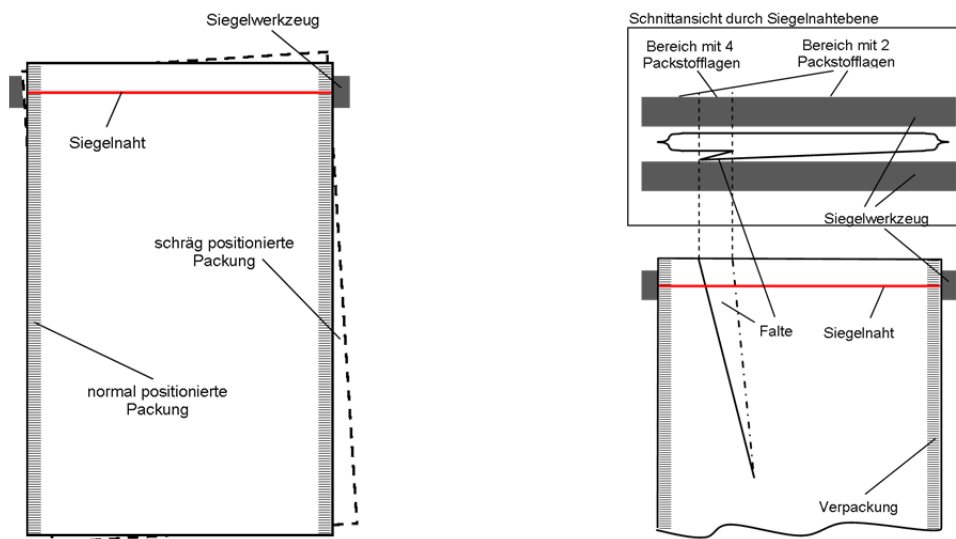


Abbildung 4-4: Packmittelbedingte Störungen: Lagefehler (links) und Geometriefehler (rechts)

Lagefehler

Bei einem Beutel, der relativ zum Siegelwerkzeug falsch positioniert ist entsteht eine falsch angeordnete Siegelnaht, die einen Qualitätsmangel darstellt und daher als Störung anzusehen ist. Dadurch verändert sich z.B. die Länge der Siegelnaht entlang der Packung. Die Nahtlänge beeinflusst den Siegelprozess, weil jeweils unterschiedlich viel Material gefügt wird. Eine veränderte Nahtlänge bei identischen Siegelparametern führt deshalb zu einem unterschiedlichen Nahtbildungsvorgang. Weiterhin verschiebt sich bei falsch positioniertem Packmittel die Position der Naht relativ zum Werkzeug, wodurch ungleichmäßige Siegelnähte entstehen können, weil das Werkzeug dann unsymmetrisch belastet wird. Bei sehr großen Schiefstellungen kann es sogar vorkommen, dass die Naht nicht vollständig vom Siegelwerkzeug abgedeckt wird und die Packung dann nicht geschlossen werden kann. Ein Lagefehler liegt auch vor, wenn die Längsnaht eines Beutels nicht korrekt in der vorgesehenen Aussparung im ERG positioniert ist.

Geometriefehler

Als eine weitere packmittelbedingte Störung seien nicht vorgesehene mehrlagige Packmittelbahnen, bzw. die Faltenbildung genannt. Diese können z.B. durch Falten in der zugrunde liegenden Packmittelbahn hervorgerufen werden, oder beim Herstellen von vorgefertigten Packmitteln (z.B. Beutelrohlinge) entstehen. Diese sind nicht zu verwechseln mit Lagensprüngen, welche bei entsprechenden Packmittelformen ständig vorhanden und in ihrer Breite konstant wären. Bei Packmittelformen mit Lagensprung (z.B. Schlauchbeutel) würde der ERG entsprechend ausgespart werden. Beim Siegeln durch Packmittelfalten können Kapillaren entstehen, die je nach Größe zu verschiedenen Stufen von Undichtigkeiten führen können [VDMA 2006/13].

4.3.5 Prozessbedingte Störungen

Eine weitere wirkstellennahe Störung ist die Abnutzung der Werkzeuge durch Verschleiß, die beim Ultraschallsiegeln zu veränderten Kontaktbedingungen zwischen Sonotrode, Folienpaarung und Amboss führt. Im Vergleich zur Sonotrode werden für den Amboss und ERG zumeist weichere Werkstoffe verwendet (s. Kap. 2.4.4), wodurch diese schneller verschleifen. Dadurch wird das Profil des ERG abgeflacht und die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Packmittel vergrößert sich. Es kommt zu einer vom Normalfall unterschiedlichen Energiewandlung und damit auch zu abweichendem Prozessverhalten. Bei kontinuierlich arbeitenden Siegelwerkzeugen oder Prozessen mit hoher Arbeitsgeschwindigkeit ist außerdem eine Erwärmung der Ultraschall-Siegelwerkzeuge zu beobachten. Durch Erwärmung erhöht sich die Resonanzfrequenz des Schwingsystems, wodurch dessen Schwingverhalten beeinflusst wird. Auch der Packstoff wird durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung der Sonotrode vorgewärmt und dadurch in seinen Eigenschaften verändert.

4.3.6 Werkzeugverschmutzung

Die Verschmutzung der Werkzeuge ist im Vergleich zum Wärmekontaktsiegeln beim Ultraschallsiegeln weniger relevant ([Fis09], [Mah09], [Hue11], [N.N.11]). Durch die unbeheizten Werkzeuge verbleiben auch niedrigschmelzende Packgüter in ihrer festen Phase und haften dadurch weniger gut an (z.B. Schokolade). Auch eventuell aus der Naht verdrängte Packstoffreste erstarren am kalten Werkzeug und haben dadurch geringere Adhäsion. Außerdem bleiben Fremdkörper durch die Oszillation der Sonotrode schlecht auf selbiger haften, ein Effekt der auch beim Ultraschallschneidverfahren beschrieben wird [Zah09]. Es wurde jedoch beobachtet, dass bei ungünstigen Packguteigenschaften in Kombination mit ungünstiger Anordnung der Sonotrode (waagrecht), sich Packgutspritzer auf dem Werkzeug im Laufe des Produktionsprozesses agglomerieren und das Werkzeug dann großflächig bedecken. Auch bei der Benetzung der Werkzeuge mit Packgütern, ist die Vielfalt der Packguteigenschaften zu beachten.

4.4 Systematisierung von Störeinflüssen nach Störprinzip

Unterschiedlich verursachte Störungen können sich mit physikalisch ähnlichem Effekt auf den Siegelprozess auswirken, die im Folgenden als Störprinzipie bezeichnet werden. Es ist daher nützlich, ähnliche Störprinzipie entsprechend zu gruppieren, um diese effizienter beschreiben, abstrahieren und untersuchen zu können. Eine Einordnung der zuvor genannten Störeinflüsse nach Störprinzip ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

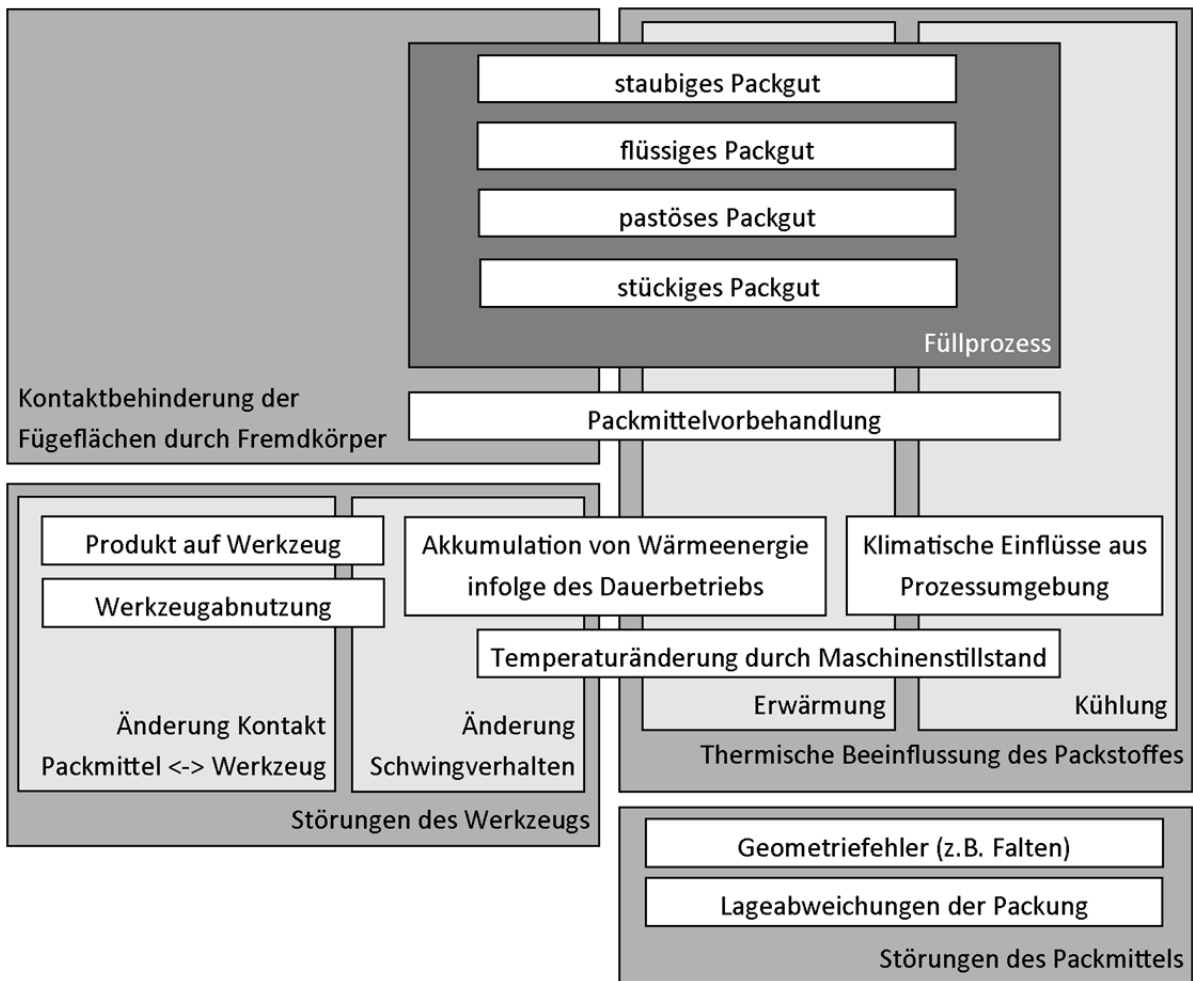


Abbildung 4-5: Einordnung von Störeinflüssen nach Störprinzip

Es lässt sich darin erkennen, dass sich die genannten Störungen in vier grundlegende Störprinzipie einteilen lassen:

- Thermische Beeinflussung des Packstoffs
- Verhinderung des vollflächigen Fügeflächenkontaktes durch Fremdkörper
- Störungen des Packmittels
- Störungen des Werkzeugs

Einige der auftretenden Störungen können dabei unterschiedlichen Störprinzipien zugeordnet werden, z.B. die Packmittelvorbehandlung kann zur Erwärmung des Packstoffs und zur Behinderung des vollflächigen Kontaktes der Fügeflächen führen.

Thermische Beeinflussung der Packstoffe

Die übliche Verarbeitungstemperatur eines Packmittels ist vom konkreten Verarbeitungsprozess abhängig. Die thermische Beeinflussung der Packmittel bedeutet eine Veränderung der Temperatur des Packmittels in Bezug auf dessen übliche Verarbeitungstemperatur unmittelbar vor der Siegelung. Die Temperaturänderung kann verschiedene Ursachen haben (Packguttemperatur, Produktionsklima,

Werkzeug), denen aber die Beeinflussung der konkreten Packstofftemperatur gemein ist. Für die wissenschaftliche Untersuchung ist es daher zulässig nur die eigentliche Packstofftemperatur zu betrachten, unabhängig davon wodurch die Temperaturänderung verursacht wird.

Verhinderung des vollflächigen Fügeflächenkontaktes durch Fremdkörper

Die Verhinderung des vollflächigen Kontaktes der Packstoffoberfläche durch dazwischen befindliche Fremdkörper kann ebenfalls verschiedene Ursachen haben. Durch die mechanischen und rheologischen Eigenschaften dieser Fremdkörper wird beeinflusst, ob die Fremdkörper durch das Werkzeug verdrängt werden können, weshalb die unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften beachtet werden müssen.

Störungen des Packmittels

Die falsche Positionierung der vorgefertigten Beutelrohlinge und Packmittelfalten werden unter Störungen des Packmittels zusammengefasst. Bei der falschen Positionierung ist das Störprinzip eine Veränderung der Packung relativ zur vorgesehenen Position. Bei den Packmittelfalten ist das Störprinzip eine lokal größere Anzahl von Packmittellagen, wodurch die gleichmäßige Siegedruckverteilung oder sogar der vollflächige Fügepartnerkontakt entlang der Naht verhindert wird. Es wird zwar ebenfalls der vollflächige Kontakt der Fügeflächen verhindert, jedoch sind dabei keine Fremdkörper ursächlich.

Störungen des Werkzeugs

Die Störungen des Werkzeugs fassen alle die Störprinzipie zusammen, welche speziell im Zusammenhang mit dem Ultraschallsiegelwerkzeug stehen (Verschleiß des ERG, Packgut auf dem Werkzeug). Diese führen zu unterschiedlichem Schwingverhalten und zu veränderten Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Packmittel, wodurch es zu verändertem Prozessverhalten kommt.

Durch die hier vorgenommene Systematisierung und Reduzierung der Vielzahl möglicher Störungen auf einzelne Störprinzipie wird es nachfolgend möglich eine Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe die Störeinflüsse auf den Siegelprozess analysiert werden können.

5. Methode zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Störeinflüssen und Prozessdaten

5.1 Ziele und Anforderungen

Das Ziel der zu entwickelnden Untersuchungsmethode ist die Bewertung von Störeinflüssen auf Ultraschallsiegelungen. Dazu werden vergleichbare Ultraschallsiegelungen mit und ohne Störeinfluss durchgeführt und gleichzeitig die zu jeder einzelnen Siegelung gehörenden Prozessdaten des Siegelwerkzeugs aufgezeichnet. Anschließend wird es durch die vergleichende Beurteilung der Nahtqualität und der Prozessdaten ermöglicht, Aussagen darüber zu treffen, ob und wie sich Störungen auf das Ultraschallsiegeln auswirken. Auf Basis der Untersuchungen von BACH ET AL. und ERNST muss davon ausgegangen werden, dass sich Störungen auch packmittelspezifisch auswirken können ([Ern90], [BTM12]). Demzufolge muss die Methode geeignet sein, verschiedene Packmittel in ihrem jeweiligen Prozessfenster zu untersuchen. Auf Basis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik ist es nicht möglich abzuschätzen, ob und wie sich die verschiedenen Störprinzipie auswirken werden. Daher muss die Methode eine möglichst breit gefächerte Variation dieser Prinzipie zulassen. Eine Überlagerung von unterschiedlichen Störprinzipien ist zu vermeiden, da sonst die Störeinflüsse nicht mehr einzeln ausgewertet werden können. Die Applikation der Störungen muss also derart erfolgen, dass aus einer definiert applizierten Störung keine ungewollten Sekundärstörungen resultieren (z.B. ungewollte Erwärmung oder Produktbenetzung des Werkzeuges). Damit der Einfluss der Störungen auf Nahtqualität und Prozessdaten beurteilt werden kann, müssen beide Datenmengen so analysiert und evtl. mathematisch verarbeitet werden, dass eine vergleichbare Wertebasis entsteht. Innerhalb der Methode muss weiterhin definiert werden, wie die Ergebnisse des Wertevergleichs zu interpretieren sind. Die Methode muss gewährleisten, dass sich die miteinander zu vergleichenden Packungen ausschließlich durch die applizierte Störung unterscheiden. Außerdem sollte die Versuchsdurchführung nach Möglichkeit so weit wie möglich automatisiert werden, um menschlichen Einfluss ausschließen zu können.

Die Methode unterteilt sich daher in die folgenden Teilgebiete:

- Eingrenzung Ultraschallsiegelverfahren
- Applikation der Störungen
- Analyse der Nahtqualität
- Analyse der Prozessdaten
- Vergleich von Siegelungen mit und ohne Störeinfluss
- Entwicklung eines Versuchsstands

5.2 Ultraschallsiegelung

Beim Herstellen von flexiblen Verpackungen werden die verschiedenen Siegelnähte in einer festgelegten Reihenfolge gesiegelt. Die zuletzt gefertigte Naht im Verpackungsprozess ist dabei generell der größten Anzahl von möglichen Störungen ausgesetzt, weil vor allem die

packgutbedingten Störungen ab dem Zeitpunkt des Kontaktes zwischen Packgut und Packmittel auftreten. Es ist daher sinnvoll die Methode auf die Untersuchung der abschließenden Quer- bzw. Kopfnähte zu fokussieren. Diese Nähte können sowohl kontinuierlich, als auch intermittierend mittels Ultraschall gesiegelt werden [Bac14]. Für die angestrebten Ergebnisse spielt die Verfahrensvariante jedoch keine Rolle, weil der Fügeverfahrensablauf identisch bleibt. Die intermittierende Siegelung ist dennoch vorzuziehen, weil dadurch weniger maschinelle Bewegungsabläufe notwendig sind. Damit sinkt die Anzahl der möglichen systematischen Störeinflüsse, gleichzeitig wird der maschinelle Aufwand verringert. Für die Herstellung hermetisch dichter Nähte mit Lagensprung ist meist die spezielle Anpassung des Ultraschallwerkzeugs (vor allem des ERG) auf den jeweiligen Packstoff notwendig bzw. gelingt dies nur in einem schmalen Prozessparameterbereich [Sch10b]. Bei Nahtsiegelungen ohne Lagensprung ist keine Werkzeuganpassung notwendig, wodurch auch unterschiedlich dicke Packstoffe in einem breiteren Prozessparameterbereich gesiegelt werden können. Für Siegelversuche mit und ohne Störeinfluss kann daher jedes orthogonal wirkende Ultraschallsiegelsystem mit Messersonotrode nach aktuellem Stand der Technik verwendet werden.

5.3 Applikation der Störungen

5.3.1 Thermische Beeinflussung des Packstoffs

Durch die thermische Beeinflussung des Packmittels soll der Einfluss der temperaturbedingten Eigenschaftsänderungen auf das Siegelverfahren untersucht werden. Das bedeutet, die angestrebte thermische Beeinflussung des Packmittels muss eine Veränderung der relevanten Eigenschaften des Packmittels hervorrufen. Als Grenzwerte für die zu untersuchenden Temperaturunterschiede kann davon ausgegangen werden, dass diese innerhalb des verarbeitungsrelevanten Bereiches der Siegelmaterialien (s. Kap. 2.2.2) liegen, also oberhalb der Glasübergangstemperatur und unterhalb des Schmelztemperaturbereichs. Bei Temperaturen außerhalb dieser Grenzen würde der Packstoff spröde oder fließfähig und dadurch nicht mehr verarbeitbar oder sogar zersetzt werden. Die übliche Packmitteltemperatur eines Verpackungsprozesses ist vor allem von dessen Packguttemperatur abhängig und kann von kleiner 0 °C (z.B. Tiefkühlprodukte) bis knapp unterhalb der Siedetemperatur des Wassers liegen (z.B. Verpackung von Fertigenüs). Die Temperaturabhängigkeit der mechanischen und thermischen Packstoffeigenschaften ist innerhalb dieser Grenzen stetig (siehe Abbildung 5-1), d.h. eine Erwärmung führt bspw. zu einer Verminderung der Steifigkeit, bzw. des Schubmoduls und umgekehrt ([Ros83], [Mic06], [Kai07]). Unter diesen Voraussetzungen ist es daher zulässig, die zu untersuchenden Temperaturen auf Werte zwischen 23 °C (Kunststoffnormklima) und unterhalb der Siedetemperatur von Wasser (obere Einsatzgrenze bei Lebensmittelverpackungen) einzugrenzen.

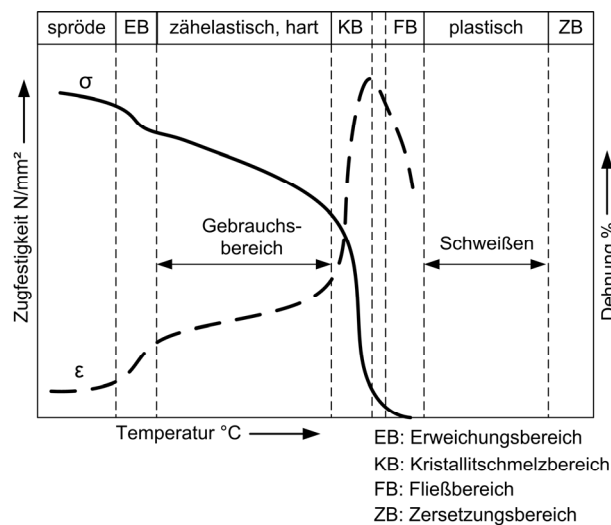


Abbildung 5-1: Temperaturbereiche teilkristalliner Kunststoffe, nach [Mic06]

Zum Temperieren des Packmittels sind generell alle Verfahren denkbar, die auch zum Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen angewendet werden ([DIN 1910-3], [Pot04], [Nen06]). Jedoch sind berührungslose Verfahren vorzuziehen, da bei einer Kontakterwärmung, z.B. mit Heizbacken, die Folie unter der Temperatureinwirkung sehr leicht plastisch verformt werden könnte. Für den angestrebten Vergleich mit der Referenzsiegelung ist eine plastische Verformung jedoch zu vermeiden. Da die Untersuchungen an verschiedenen Packstoffen durchgeführt werden sollen, scheidet diejenigen berührungslosen Verfahren aus, die besondere Anforderungen an den Packstoff stellen (z.B. Hochfrequenzschweißen). Für die Packmittelerwärmung infrage kommen daher Infrarotstrahlung oder Heißluft. Es ist darauf zu achten, dass die Heißlufteerwärmung aufgrund der Luftströmung erhöhte Anforderungen an die Packmittelfixierung nach sich zieht. Durch die Anforderung der Vermeidung von ungewollten Sekundärstörungen, müssten die Siegelwerkzeuge abgeschirmt werden, oder die Packmittelprobe außerhalb der Siegelwerkzeuge erwärmt werden. Dadurch muss die Probe nach dem Erwärmen transportiert werden und kann sich in der dabei verstreichenden Zeit wieder abkühlen. Um dem entgegen zu wirken, ist die indirekte Erwärmung durch temperiert abgefülltes Wasser in vorgefertigte senkrecht stehende Beutel eine Option. Diese Methodenvariante ist relativ einfach zu realisieren und anwendungsnah. Durch die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers wird verhindert, dass sich die erwärmte Packung im Zeitraum zwischen Störungsapplikation und Siegelung wieder abkühlt.

Eine Kühlung der Packmittel auf Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur wäre, im Gegensatz zum Erwärmen, nur mit größerem technischen Aufwand realisierbar und die zu erwartenden Eigenschaftsänderungen sind vor allem abhängig vom Betrag der Temperaturdifferenz, unabhängig davon, ob diese unter- oder oberhalb der Vergleichstemperatur eingestellt werden.

5.3.2 Verhinderung des vollflächigen Fügeflächenkontaktes durch Fremdkörper

5.3.2.1 Definition von Störgutgruppen

Ziel ist die Verhinderung eines vollflächigen Kontaktes der Folienpartner definiert zu simulieren, welcher durch Fremdkörper zwischen den Siegelschichten verursacht wird. Es wird davon ausgegangen, dass sich unterschiedliche Packgüter in Abhängigkeit ihrer stofflichen Eigenschaften unterschiedlich auswirken. Entsprechend [Gol69] gibt es unterschiedliche Verarbeitungsgutgruppen, die sich zu unterschiedlichen Störgutgruppen zusammenfassen lassen.

In Tabelle 1 sind die Verarbeitungsgutgruppen den jeweiligen Störgutgruppen zugeordnet, wobei zur Vereinfachung vernachlässigt wird, dass staubige Anteile auch bei Stückgut, Strang- und Fadenformgut, sowie Flachformgut auftreten können.

Für die Kontaktbehinderung der Fügepartner sind Gase und Aerosole irrelevant, weil diese beim Schließen der Werkzeuge vollständig verdrängt werden.

Flachform-, Strang- und Fadenformgut können aus Sicht der Verpackungstechnik [BLM14] gemeinsam als stückige Güter betrachtet werden. Diese haben eine identische Störwirkung: ein nicht fließfähiges Packgut behindert den Packstoffkontakt, dabei bleibt zu untersuchen, unter welchen Umständen eine Verdrängung durch die Siegelwerkzeuge erfolgen kann. Schüttgut, bzw. staubiges Störgut muss davon getrennt betrachtet werden. Die zu erwartenden Auswirkungen sind beim Ultraschallsiegeln sehr gering, da dieses Fügeverfahren insbesondere beim Verpacken staubiger Packgüter (z.B. Baustoffe) angewendet und als vorteilhaft beschrieben werden (vgl. Abbildung 2-18).

Tabelle 1: Verarbeitungsgutgruppen nach [Gol69] und abgeleitete Störgutgruppen

Verarbeitungsgutgruppen	Störgutgruppen
hochviskos-pastöses Gut	pastöses Störgut
niedrigviskoses Gut / Flüssigkeiten	flüssiges Störgut
Gase / Aerosole	nicht relevant
Schüttgut	staubiges Störgut
Stückgut	stückiges Störgut
Strang- und Fadenformgut	
Flachformgut	

Die hier vorgenommene Trennung zwischen pastösem und flüssigem Störgut, erfolgt aus verarbeitungstechnischer Sicht vereinfachend anhand der Viskosität. Aus rheologischer Sicht wäre auch eine genauere Unterteilung in z.B. newtonsches, nicht-newtonsches oder Bingham-

Fließverhalten möglich. Die hier gewählte verarbeitungstechnische Unterscheidung beschreibt das Verhalten von leicht fließfähigen Flüssigkeiten (z.B. Säfte, Milch, Öl) im Gegensatz zu sehr zähfließenden, pastösen Gütern (z.B. Zahnpasta, Tomatenmark, Butter, Honig). Die dynamische Viskosität beeinflusst sowohl das Benetzungsverhalten zwischen Störgütern und Packstoff [Sch04], als auch die Handhabung der benetzten Packstoffproben. Je höher die Viskosität, desto länger dauert die Benetzung eines Substrats, was innerhalb kurzer Zeiträume (< 1 min) dazu führt, dass sich größere, schlecht benetzende Ansammlungen von pastösem Störgut ausbilden. Niedrigviskose Flüssigkeiten benetzen im gleichen Zeitintervall das Substrat besser, bei vereinfacht angenommener gleicher Oberflächenspannung. In der Handhabung unterscheiden sich die hier definierten Gutgruppen darin, dass bei einem Auftrag auf eine nicht waagrecht liegende Packstoffprobe die Flüssigkeiten innerhalb weniger Sekunden abfließen, während die pastösen Störgüter über einen langen Zeitraum nicht sichtbar fließen. Dieser Effekt wird auch vom Vorhandensein einer Fließgrenze⁷ beeinflusst, welche bei der hier gewählten vereinfachenden Unterteilung jedoch ausgeblendet wird. Aufgrund eventuell notwendiger Handhabungsschritte (bspw. bei Bewegung der benetzten Packstoffe) und gleichzeitiger Vermeidung von Sekundärstörungen, ist diese Unterscheidung notwendig. Es werden weiterhin Unterschiede beim Verdrängen des Störgutes aus der Nahtzone, infolge der statischen Siegelkraft erwartet, weil dies bei den pastösen Störgütern durch die höhere Viskosität erschwert wird.

Für die experimentelle Analyse der einzelnen Störgutgruppen sollten möglichst Modellsubstanzen gewählt werden, mit denen die Packguteigenschaften simuliert werden können, da die Eigenschaften von Naturstoffen und den daraus hergestellten Gütern stark chargenabhängig sind. Die variierenden Eigenschaften von Naturstoffen würden eine belastbare Analyse der Vorgänge und Wechselwirkungen erschweren.

5.3.2.2 Flüssiges Störgut

Modellsubstanzen

Den flüssigen Störgütern wird hier vereinfachend newtonsches Fließverhalten zugeordnet, also eine konstante dynamische Viskosität unabhängig von der Schergeschwindigkeit. Bei flüssigem Störgut ist entsprechend DARBY eine Unterscheidung hinsichtlich des Siedepunktes der Flüssigkeit vorzunehmen [Dar09]. Flüssigkeiten mit einem Siedepunkt unterhalb der Schmelztemperatur der Siegelschicht können während des Fügevorgangs verdampfen und zur Schädigung der Siegelnaht führen. Demgegenüber stehen Flüssigkeiten bei denen zwischen Raumtemperatur und maximaler Schmelztemperatur keine Phasenänderung auftritt. Als Modellsubstanz für Flüssigkeiten mit Siedepunkt unterhalb der maximalen Schmelztemperatur wird Leitungswasser gewählt, da Wasser bzw. wasserbasierende Substanzen, auch aufgrund ihrer weiten Verbreitung im Lebensmittelbereich, eine häufige niedrigviskose Störung darstellen. Da raffiniertes Sonnenblumenöl eine sehr hohe Siedetemperatur aufweist (> 200 °C), kommt es als Modellsubstanz für Flüssigkeiten mit hohem Siedepunkt infrage. Das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf Feststoffen ist u.a. von den Oberflächenspannungen abhängig [HS12]. Um diesen Einfluss bei flüssigen Störgütern als

⁷ Fließgrenze beschreibt die Spannung, die initial überwunden werden muss, damit ein Material plastisch zu Fließen beginnt.

Parameter untersuchen zu können ist es möglich, den beiden gewählten Modellsubstanzen jeweils Tenside beizumengen um deren Oberflächenspannung zu verändern. Es ist außerdem denkbar, dass die Temperatur der Modellsubstanzen einen Einfluss haben könnte, welche als Variationsparameter daher ebenfalls infrage kommt.

Auftragsmethoden

Die Benetzung von Packmitteln durch flüssiges Störgut stellt sich im Verpackungsprozess als Flüssigkeitstropfen dar und bedeckt den Packstoff dabei nie vollflächig, weil flüssige Packgüter vertikal abgefüllt werden und größere Flüssigkeitsmengen in die Packung abfließen würden. Die vollflächige Benetzung tritt nur beim gewollten Siegeln durch flüssiges Produkt auf, ist aber dann nicht als Störung zu betrachten. Mit der Auftragsmethode muss deshalb eine gleichmäßige Verteilung von Flüssigkeitstropfen auf der Packstoffoberfläche erreicht werden. Der Auftrag einzelner Tropfen mit Hilfe einer Pipette, bzw. mittels eines Pipetten-Blocks wäre volumetrisch sehr genau dosierbar. Für die enge Positionierung von einzelnen Tropfen nebeneinander müssten Pipette oder Packstoffprobe jedoch zusätzlich hochgenau bewegt werden. Eine andere Möglichkeit ist das Zerstäuben der Flüssigkeit mit einer Druckdüse, wie sie von MESNIL ET AL. verwendet wurde, womit das Tropfenvolumen aber weniger exakt eingestellt werden kann [MAH+00]. Bei Druckdüsen wird die Tropfenverteilung vom Hersteller angegeben und die Düse kann entsprechend ausgewählt werden [Zog93]. Das Auftragsvolumen kann damit indirekt durch die Sprühzeit und den Druck eingestellt werden. Beim Siegeln der Folien werden die zu fügenden Packstoffe im Nahtbereich übereinander gelegt, weshalb es nicht zu vermeiden ist, dass dazwischen befindliche flüssige Störguttropfen einen Flüssigkeitsfilm bilden. Daher ist die genaue Positionierung einzelner Tropfen nicht notwendig, weil diese sich in Vorbereitung des Siegelvorgangs zwangsläufig verändern würden.

5.3.2.3 Pastöses Störgut

Modellsubstanzen

Im Gegensatz zu den flüssigen Störgütern wird im Rahmen dieser Arbeit den pastösen Störgütern nicht-newtonsches Fließverhalten zugeschrieben, welches sich in strukturviskoses und dilatantes Fließverhalten unterteilen lässt. Bei strukturviskosem Verhalten (das auch bei Polymerschmelzen vorliegt) sinkt mit steigender Scherbeanspruchung die Viskosität. Insbesondere höherviskose Lebensmittel weisen dieses Verhalten auf. Bei dilatantem Fließverhalten erhöht sich die Viskosität bei größer werdender Scherbeanspruchung. Als Modellstoffsystem für die Untersuchung von strukturviskosem Störgut kann eine Mischung aus Xanthan und Wasser genutzt werden. Xanthan ist ein natürlich vorkommendes Polysaccharid, welches industriell hergestellt werden kann und in einer Vielzahl von Lebensmittel- und Kosmetikprodukten angewendet wird. Als Lebensmittelzusatzstoff hat es die Kennzeichnung E 415. Es ist gesundheitlich unbedenklich und wirkt als Stabilisator, Dickungs- und Geliermittel und wird zur Wasserbindung eingesetzt [BGS08]. Xanthan wird als Zusatz in Farben verwendet um die Feuchteadhäsion zu verbessern und sorgt für gute Adhäsion an Glas und Metall [Whi73]. Xanthan ist sehr gut in kaltem und warmem Wasser löslich [Ant06] und je nach Xanthankonzentration verändert sich die Viskosität des Gemisches (siehe Abbildung 5-2) [GSC+00] und kann daher sehr gut eingestellt und untersucht werden. Wegen seiner guten Adhäsionseigenschaften wird Xanthan auch als Klebstoff eingesetzt [HS10]. Im Gegensatz zu

anderen infrage kommenden Verdickungsmitteln erreichen Gemische aus Xanthan und Wasser schon bei sehr geringen Konzentrationen eine sehr hohe Viskosität [NSC11].

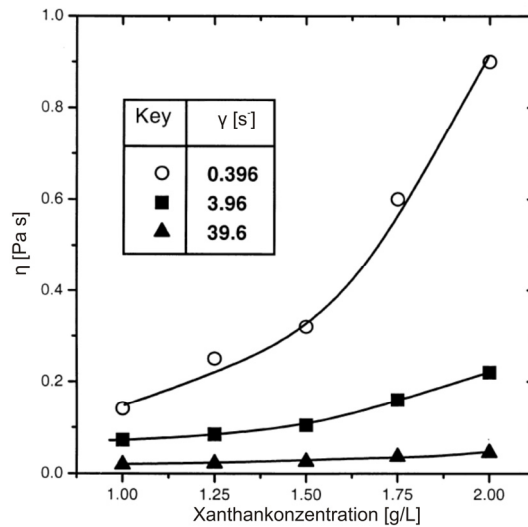


Abbildung 5-2: Zusammenhang zwischen Xanthankonzentration und resultierender Viskosität, aus [GSC+00]

Als Modellsubstanz für dilatantes Materialverhalten kommt eine Wasser-Stärkesuspension infrage. Es sind jedoch keine Verpackungsanwendungen bekannt, bei denen dilatantes Verhalten auftritt und im Lebensmittelbereich ist das einzig bekannte Beispiel Kochkäse.

Auftragsmethoden

Aufgrund ihrer hohen Viskosität können die pastösen Störgüter mit einem Spatel auftragen werden. Hinsichtlich der genauen Dosierung gestaltet sich diese Auftragsmethode aber schwierig. Ansonsten sind dieselben Auftragsmethoden wie bei Flüssigkeiten, mittels Pipette oder Sprühdüse denkbar. Für die Zerstäubung von höherviskosem Störgut sind Zweistoffdüsen zu verwenden, weil der Energiebedarf zum Zerstäuben größer ist und die dafür notwendige Zerstäubungsenergie durch einen zusätzlichen Luftstrom zugeführt werden kann [Ric08].

5.3.2.4 Staubiges Störgut

Modellsubstanzen

Staubende Störgüter verhindern den vollflächigen Kontakt der Fügepartner durch eine nicht genauer quantifizierbare Vielzahl sehr kleinteiliger Fremdkörper auf der Packstoffoberfläche (z.B. Mehl, Salz, Kaffee). Es kommen dabei nur Modellsubstanzen infrage, die im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und Siegelschichtschmelztemperatur keinen Phasenübergang aufweisen, da ansonsten je nach vorliegender Phase unterschiedliche Wirkprinzipie betrachtet werden müssen. Die möglichen Eigenschaften der staubigen Störgüter sind sehr vielfältig, weshalb eine Unterteilung nach Korngröße, Kornform und Formstabilität angebracht ist (siehe Tabelle 2). Für die Korngröße sind Abstufungen in Bezug auf die Siegelschicht- und Packstoffdicke notwendig. Körner die sehr

viel kleiner als die Siegelschichtdicke sind werden andere Auswirkungen haben, als Körner die größer als die Packstoffdicke sind.

Tabelle 2: mögliche Unterteilung von staubigen Modellsubstanzen

Korngröße	Kornform	Formstabilität
kleiner als Siegelschicht	rund	verformbar bei Siegeldruck
entsprechend Siegelschicht		
größer als Siegelschicht, entsprechend Packstoffdicke	eckig, spitz	formstabil bei Siegeldruck
größer als Packstoffdicke		

Die Kornform hat Auswirkungen einerseits auf die Beweglichkeit bzw. Rollneigung der Modellsubstanz und andererseits auf mögliche mechanische Penetration des Packstoffs durch scharfe Kornkanten. Die mechanische Penetration wird zudem zusätzlich von der Formstabilität der Körner unter dem wirkenden Siegeldruck beeinflusst. Die mögliche Zerkleinerung von staubigem Packgut durch den Fügedruck wird bei den Modellsubstanzen über die Korngröße abgebildet. Als Modellsubstanzen für staubige Störgüter eignen sich daher technische Pulver, wie z.B. Schleifkörner, die in ihrer Kornform und Korngrößenverteilung ausgewählt werden können [KK05].

Auftragsmethoden

Als Auftragsmethode für staubige Güter kommen nur Verfahren in Frage mit denen eine möglichst gleichmäßige Verteilung auf der Packstoffoberfläche erzielt werden kann, da kornweiser Auftrag nicht realisierbar ist. Durch elektrostatische Aufladung der Packstoffoberflächen würde die Adhäsion zum pulvrigen Störgut verbessert. Packstoffe unterscheiden sich aber in ihren elektrostatischen Eigenschaften [Ném03], wodurch die anhaftende Pulvermenge variieren würde. Eine andere Möglichkeit wäre das Dispergieren des staubigen Störgutes in einem stark flüchtigen Fluid. Das Fluid darf keine chemischen Wechselwirkungen mit dem Packstoff oder dem Störgut haben. Diese Emulsion könnte dann analog zu den flüssigen Störgütern auf den Packstoff appliziert werden. Nachdem sich die Flüssigkeit verflüchtigt hat, würde nur noch das Pulver als Störgut auf der Packstoffoberfläche zurückbleiben. ZHAO ET AL. beschreiben in [ZDB02] eine Methode, bei der mit Hilfe eines Siebes und einem Ventilator ein Pulver auf die Fügeflächen eines Kunststoffrohres aufgetragen wurde. Der Luftstrom des Ventilators war notwendig, um das Pulver seitlich auf die senkrecht stehenden Fügeflächen aufzutragen. Die zu benetzende Packstoffprobe kann jedoch waagrecht unter einem Sieb positioniert werden, wodurch der Luftstrom überflüssig wäre. Es ist notwendig vergleichbare Benetzungsmengen bei unterschiedlichen Pulvern zu realisieren. Dafür kann entweder das aufgetragene Störgutvolumen oder entsprechend ERNST die Störgutmasse herangezogen werden [Ern90]. Bei einem sehr feinen Auftrag, bei dem keine Überdeckung von pulvrigen Partikeln stattfindet, kann auch eine optische Messung der Benetzungsmenge erfolgen, z.B. durch die Analyse des Grauwertes, welches von MAUERMANN beschrieben wurde [Mau12].

5.3.2.5 Stückiges Störgut

Modellsubstanzen

Um zu vermeiden, dass das Störgut im Nahtbereich schmilzt, kommen als Modellsubstanzen für stückiges Störgut, analog zu den staubigen Störgütern, nur solche Substanzen infrage, die zwischen Raumtemperatur und Siegelschichtschmelztemperatur keinen Phasenübergang durchlaufen. Die Modellsubstanz soll u.a. Lebensmittel abbilden und sollte sich daher unter Krafteinwirkung leicht verformen und zerteilen lassen. Daher sind Metalle oder Schaumstoffe mit sehr großer Dehnung ungeeignet. Eine denkbare Modellsubstanz wären z.B. Papier oder Karton, deren Eigenschaften aber sehr stark von den klimatischen Umgebungsbedingungen abhängen. Eine andere Modellsubstanz sind in kaltem (21 °C) Wasser gequollene flache Pastastücke. Durch den Wassergehalt der Pasta kann deren Festigkeit variiert werden [CGM+03], da zu erwarten ist, dass die Festigkeit einen Einfluss auf den Nahtbildungsvorgang hat. Je nach Festigkeit und wirkender statischer Siegelkraft wird das stückige Störgut, evtl. schon vor dem Einwirken der Ultraschallschwingung, unterschiedlich gut aus dem Nahtbereich verdrängt. Die Störgutmenge kann mittels der Pastabreite sehr einfach variiert werden, indem die Pastastücke im feuchten Zustand auf eine bestimmte Größe konfektioniert werden. Pastastücke stellen jedoch einen Naturstoff dar, weshalb die Festigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes mittels Versuchen quantifiziert werden muss.

Auftragsmethoden

Der Auftrag der stückigen Störgüter kann manuell erfolgen, indem die stückigen Störgüter zwischen die zu siegelnden Packstoffe gelegt werden. Eine automatisierte Zuführung der stückigen Störungen wäre ebenfalls denkbar, aber die Realisierung technisch sehr aufwändig.

5.3.3 Störungen des Packmittels

Ziel ist es, die Störungen nachzustellen, welche in Zusammenhang mit Lagefehlern oder Geometriefehlern des Packmittels stehen. Diese Störungen können unkompliziert und hinreichend genau manuell nachgestellt werden. Für Lagefehler der Packung muss diese in Bezug auf die Siegelbacken abweichend zur normalen Position verschoben werden. Geometriefehler können ebenfalls manuell erzeugt werden. Dazu wird der Packstoff definiert vorgefaltet und fixiert. Eine automatisierte Umsetzung wäre möglich, aber technisch sehr aufwändig.

5.3.4 Störungen des Werkzeugs

Die Störungen im Zusammenhang mit dem Werkzeug unterteilen sich in produktbedingte Störungen und Störungen des eigentlichen Werkzeugs, z.B. durch Erwärmung oder Abnutzung. Die Klassifizierung der Störungen durch Produkt sind identisch zu den in Kap. 5.3.2 vorgenommenen Ausführungen. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass das Produkt in diesem Fall nicht auf das Packmittel, sondern auf das Werkzeug appliziert wird.

Die Erwärmung der Werkzeuge muss differenziert für Amboss und Sonotrode betrachtet werden. Der Amboss kann relativ einfach durch eingebrachte Heizpatronen oder durch das Durchströmen mit

warmen Medien temperiert werden. Eine Temperaturänderung der Sonotrode ist hingegen sehr schwer zu realisieren, weil durch die Oszillation des Werkzeuges keine Heizpatronen integriert werden können und für vergleichbare Versuche eine konstante Temperatur im Werkzeug hergestellt werden müsste. Die Erwärmung des kompletten Schwinggebildes ist nicht möglich, da der Konverter bei zu hohen Temperaturen beschädigt werden kann. Denkbar wäre eine Kontakterwärmung der Fügefläche der Sonotrode durch den Amboss. Dies würde aber sehr lange dauern, weil das Sonotrodenvolumen im Verhältnis zum Amboss deutlich größer ist und Titan-Sonotroden schlechte thermische Leiter sind.

Die Störung durch Abnutzung der Werkzeuge kann durch unterschiedliche Gestaltung des ERG simuliert werden. Defekte Schwingsysteme wurden von Kuhlmann [Kuh06] für das Ultraschallschweißen untersucht. Ein Werkzeugdefekt könnte durch absichtliche Verstellung der Generatorregelparameter simuliert werden, jedoch bleibt ungewiss, ob das dem tatsächlichen Verhalten eines defekten Werkzeugs entspricht.

5.4 Analyse der Nahtqualität

5.4.1 Siegelnahtfestigkeitsmessungen

Die Beurteilung der Siegelnahtqualität hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Die Nahtfestigkeit kann indirekt durch Messung des Berstdrucks einer Verpackung ermittelt werden. Dabei wird die geschlossene Verpackung an einer Packungsmantelfläche punktiert und mit Hilfe einer Kanüle in der Packung ein kontinuierlich steigender Überdruck erzeugt, bis die Packung versagt, bzw. birst. Diese Messung kann nur an kompletten Verpackungen durchgeführt werden und der Versagensort ist dabei stets der schwächste Punkt der gesamten Packung, welcher unterschiedlich sein und vorher nicht festgelegt werden kann. Die erreichbaren Berstdruckwerte einer Packung hängen von deren Gestaltung ab und können keine orts aufgelösten Festigkeitswerte entlang einer Naht liefern. Ein industriell häufig eingesetztes Verfahren zur indirekten Bestimmung der mechanischen Nahteigenschaften ist die Differenzdruckmethode im Wasserbad. Die verschlossene Verpackung wird dabei in einem sog. Exsikkator unter Wasser mit einem definierten Unterdruck belastet. Hält die Verpackung stand, kann dadurch eine gewisse Mindestpackungs- bzw. Mindestnahtfestigkeit ermittelt werden.

Für wissenschaftliche Untersuchungen ist jedoch die genormte Messung des Schälwiderstandes nach [DIN 55529] vorzuziehen. Dabei werden aus der zu prüfenden Naht 15 mm breite Probenstreifen senkrecht zur Naht entnommen und der gesiegelte Probestreifen mit Siegelnaht in einer uniaxialen Zugprüfmaschine (zwicki Z2.5 TS, Fa. Zwick) entsprechend Abbildung 5-3 eingespannt. Die Probeneinspannungen werden mit der vorgegebenen Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min auseinander bewegt und währenddessen die dabei wirkende Kraft aufgezeichnet. Die während des Trennvorgangs auftretende Maximalkraft wird für jede Messung erfasst und aus den einzelnen Messungen wird der arithmetische Mittelwert für die gesamte Naht berechnet. Bei Bedarf kann mit dieser Analyseverfahren die Nahtfestigkeit orts aufgelöst ermittelt werden. Bei größeren Unterschieden entlang einer Naht kann dadurch z.B. auf Schiefstellungen des Siegelwerkzeuges rückgeschlossen werden. Die Siegelnahtfestigkeit wird auf die Probenbreite bezogen und deshalb

mit der Einheit N/15 mm angegeben. Je höher die ermittelten Nahtfestigkeiten sind, desto größeren Belastungen widersteht eine Verpackungsnaht. Mit Ausnahme von Verpackungen, welche „Easy-to-Open“ Eigenschaften haben sollen, werden möglichst hohe Nahtfestigkeiten angestrebt. Hohe Nahtfestigkeitswerte sind also positiv zu bewerten.

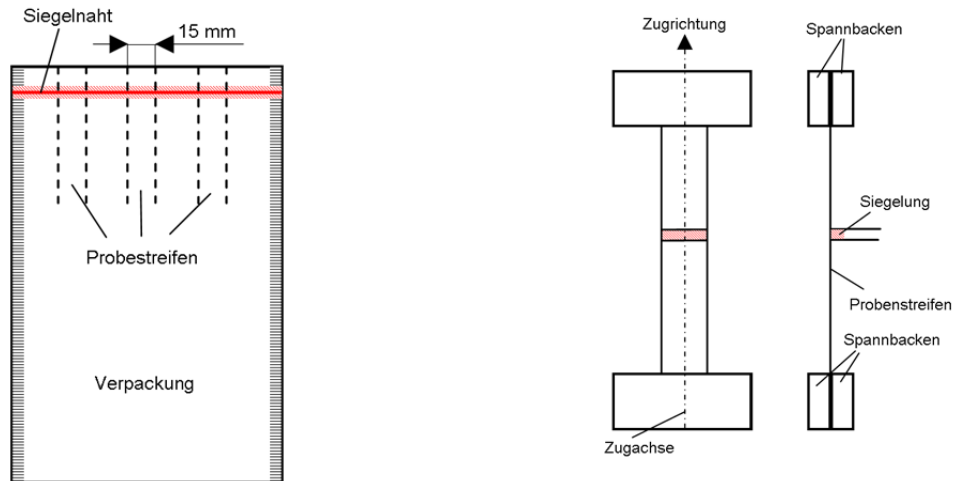


Abbildung 5-3: Siegelnahtfestigkeit links) Zuschnitt der Probenstreifen rechts) schematische Darstellung der Prüfanordnung nach [DIN 55529]

5.4.2 Dichtigkeitsmessungen

Ein weiteres Kriterium der Nahtqualität ist die Nahtdichtigkeit, welche mit verschiedenen Methoden ermittelt werden kann. Der Zusammenhang zwischen Prüfklassen, Größe der Undichtigkeiten und Prüfmethode ist in [VDMA 2006/13] beschrieben. Mit den Prüfmethode zur Dichtigkeit besteht die Möglichkeit qualitative Aussagen zu generieren. Anwendungsbereite quantitative Messmethoden sind nicht bekannt und Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten⁸. Im Rahmen dieser Arbeit sollen vor allem Aussagen darüber getroffen werden können, ob Undichtigkeiten durch Störungen des Siegelvorgangs entstehen, dabei ist die genaue Größe der Undichtigkeit unerheblich.

Eine häufig angewandte Methode ist die beschriebene Messung mittels Wasserbad im Exsikkator, womit Undichtigkeiten bis Klasse III nachgewiesen werden können. Die weite Verbreitung rührt daher, dass mit dieser Methode Dichtigkeit und Festigkeit einer Packung gleichzeitig bestimmt werden können. Bei anliegendem Unterdruck kann durch austretende Gasblasen aus der Packung auch der Ort der Undichtigkeit bestimmt werden. Die Nahtdichtigkeit kann weiterhin durch Penetration mit einer „kriechenden“ Farblösung ermittelt werden. Dazu wird die Farblösung mit geringer Oberflächenspannung auf die Naht einer aufgeschnittenen Packung appliziert und nach einer ausreichend langen Einwirkzeit (teils mehrere Stunden) geprüft, ob die Farblösung durch die Naht penetriert ist. Mit dieser Methode können Undichtigkeiten bis Klasse 4/5 ermittelt werden. Der Nachteil dieser Methode ist die lange Prüfdauer. Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der

⁸ In unveröffentlichter studentischer Arbeit ([Bun12]).

Nahtdichtigkeit ist die Wasserstoffprüfgasmethode. Dazu wird die geschlossene Verpackung an ihrer Mantelfläche punktiert und die Packung mit einem wasserstoffhaltigen Gasgemisch (sogenanntes Formiergas) gefüllt. Anschließend wird die Punktion abgedichtet und manuell ein leichter Überdruck in der Packung erzeugt. Mit einem Prüfgasdetektor und zugehöriger Sonde (Hydrogene Leak Detector H2000, Fa. Inficon) werden mögliche Leckagen entlang der Verpackungsnähte gesucht. Die Wasserstoff-Prüfmethode gehört zur Dichtigkeitsprüfklasse B [VDMA 2006/13] und ist damit die zweitgenaueste Prüfung nach der Helium-Prüfgasmethode, jedoch günstiger als diese. Die angestrebten Untersuchungen werden mit dieser Methode durchgeführt, weil diese sehr genau und vergleichsweise schnell durchführbar ist.

5.5 Analyse der Prozessdaten

Mit jedem Siegelversuch werden die zeitveränderlichen Datenverläufe von Fügeweg und Leistung erfasst. Es ist generell möglich weitere Datenströme des Ultraschallwerkzeugs zu erfassen und zu analysieren. In eigenen Voruntersuchungen hat sich aber gezeigt, dass unterschiedliche Prozessabläufe am ehesten in den beiden genannten Datenverläufen zu erkennen sind. Aus den durchgeführten Einzelversuchen lässt sich anschließend je Siegelparameterset eine Mittelwertkurve für Fügeweg und Leistung berechnen, welche in Abbildung 5-4 beispielhaft dargestellt sind.

Anhand der beiden Mittelwertkurven können folgende Kennwerte ermittelt werden:

- Wegniveau vor der Siegelung
- Wegniveau nach der Siegelung
- Maximale Fügengeschwindigkeit
- Energieaufnahme während des Siegelvorgangs

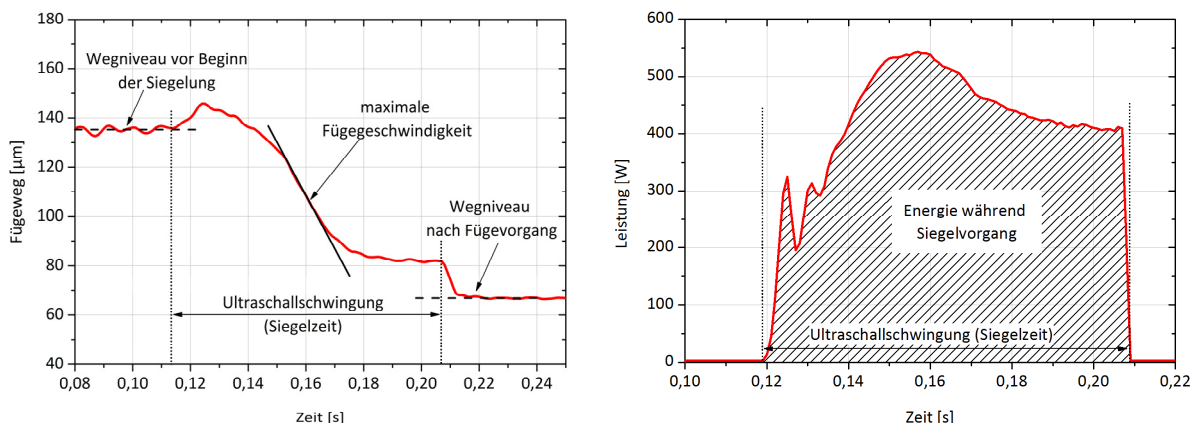


Abbildung 5-4: Ermittelte Kennwerte links) im Wegverlauf und rechts) im Leistungsverlauf

Durch einen Wegsensor kann der Abstand zwischen der Fügefläche der Sonotrode und dem ERG gemessen werden [Bac14]. Wenn Sonotrode und Amboss sich berühren ist das Wegsignal = 0, wenn sich Packstoff zwischen den Werkzeugen befindet, dann wird das Wegsignal > 0. Vor dem Start des

Siegelvorgang wird der Packstoff, infolge der statischen Siegelkraft, komprimiert. Das ermittelte Wegniveau vor der Siegelung entspricht dem Werkzeugabstand zum Startzeitpunkt des Ultraschallsiegelvorgangs, also der komprimierten Packstoffdicke. Das Wegniveau nach der Siegelung beschreibt den Abstand der Werkzeuge nach dem Siegelvorgang, also die mittlere Restnahtdicke des gesiegelten Packstoffs. Die maximale Fügegeschwindigkeit ist die größte auftretende Geschwindigkeit während des eigentlichen Fügevorgangs. Das Einsinken zum Ende des Fügevorgangs findet nach dem Abschalten der Ultraschallschwingung des Werkzeugs statt und ist damit nicht gemeint. Die Energieaufnahme während des Siegelvorgangs wird durch Integration der aufgenommenen Leistung während des Fügevorgangs ermittelt.

5.6 Vergleich von Stör- und Referenzsiegelung

5.6.1 Siegelnahtqualität

Die Untersuchungen zum Einfluss der jeweiligen Störungen auf Nahtqualität und Prozessdaten erfolgt durch vergleichende Betrachtung der messbaren Größen. Eine Beeinflussung der Nahtqualität lässt sich daran erkennen, dass bei einer Siegelung mit Störung veränderte Nahtfestigkeit und Nahtdichtigkeit auftreten. Bei gleichen Siegelparametereinstellungen sollte die ungestörte Referenzsiegelnaht bessere Eigenschaften (dicht und höhere Nahtfestigkeit) als die gestörte Siegelnaht (undicht und geringere Nahtfestigkeit) aufweisen.

5.6.2 Prozessdaten

Für die Entscheidung, ob Störungen des Siegelprozesses anhand der Prozessdaten erkannt werden können, müssen die Datenverläufe von Referenz- und Stör-siegelung miteinander verglichen werden. Deshalb ist es notwendig, die Größe der Abweichung beider Kurven voneinander mit Hilfe eines Skalars zu beschreiben. In Abbildung 5-5 ist beispielhaft der Verlauf zweier zu vergleichender Kurvenverläufe dargestellt.

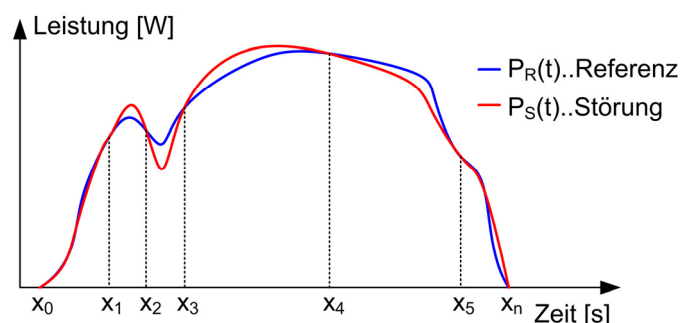


Abbildung 5-5: Beispielhafter Leistungsverlauf von Referenz- und Störungssiegelvorgang

Zur Beschreibung der Abweichung beider Kurvenverläufe bietet sich eine integrale Betrachtung an: bei unterschiedlichem Leistungsverlauf kann das Integral dieser Kurve unterschiedlich sein. Zur Beschreibung der Abweichung mit einem einzelnen Kennwert werden beide Integrale voneinander subtrahiert (6).

$$\int_{x_0}^{x_n} P_S(t) dt - \int_{x_0}^{x_n} P_R(t) dt \quad (6)$$

Falls sich beide Kurven in ihrem Verlauf schneiden, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, wäre es dennoch möglich, dass trotz unterschiedlichem Kurvenverlaufes das Ergebnis von (6) ≈ 0 wird. Dies kann vermieden werden, indem die zuvor beschriebene Subtraktion der Integrale für jeden Bereich zwischen zwei Schnittpunkten ($x_0 \dots x_n$) einzeln durchgeführt wird und diese Differenzen für den gesamten Kurvenverlauf aufsummiert werden. Bei dem in Abbildung 5-5 gezeigten Kurvenverlauf wechselt zwischen jedem Schnittpunkt das Wertenniveau beider Kurven, weshalb das einfache Aufsummieren wiederum zu Werten gegen Null führen kann. Um diesen Effekt auszugleichen wird jeweils der Betrag der Integrale zwischen den Schnittpunkten summiert (7).

$$\sum_{k=1}^n \left| \int_{x_{k-1}}^{x_k} P_S(t) dt - \int_{x_{k-1}}^{x_k} P_R(t) dt \right| \quad (7)$$

Für den angestrebten Skalar zum Vergleich zweier Kurvenverläufe bei identischen Siegelparametern ist Gleichung (7) ausreichend. Zum Vergleich mit Siegelversuchen, die ein generell unterschiedliches Leistungsniveau oder unterschiedliche Siegelzeiten aufweisen, ist eine weitere Normierung notwendig. Dies wird mit einer Division durch das Gesamtintegral der Referenzleistung möglich (8).

$$D_P = \frac{\sum_{k=1}^n \left| \int_{x_{k-1}}^{x_k} P_S(t) dt - \int_{x_{k-1}}^{x_k} P_R(t) dt \right|}{\int_{x_0}^{x_n} P_R(t) dt} \quad (8)$$

Der mit Gleichung (8) ermittelte Wert, der die Größe der Abweichung zweier Kurvenverläufe beschreibt, wird im Folgenden mit D bezeichnet und je nachdem, welche Prozesskenngröße betrachtet wird, erhält dieser Kennwert eine entsprechende Fußnote. $D = 1$, wenn der Datenverlauf der Störung = 0 oder exakt doppelt so groß wie die Referenzmessung ist.

Aus den aufgenommenen Referenzmessungen wird für Fügwegverlauf und Leistungsverlauf eine Referenz-Mittelwertkurve gebildet. Die Parameter D_P und D_S werden anschließend für alle durchgeführten Messungen mit Störeinfluss berechnet und erhalten einen entsprechenden zusätzlichen Index. $D_{P,Stör}$ und $D_{S,Stör}$ beschreiben also die Abweichung der Prozessdatenverläufe einer Siegelung mit Störeinfluss von der Referenz-Mittelwertkurve (siehe Abbildung 5-6 oben rechts). Aber auch innerhalb der verschiedenen Referenzsiegelungen kommt es zu leichten Abweichungen der einzelnen Messungen untereinander. Diese werden ebenfalls mit entsprechendem Index ($D_{P,Ref}$ und $D_{S,Ref}$) bezeichnet und beschreiben die Abweichung der einzelnen Referenzmessung von deren Mittelwertkurve (Abbildung 5-6 oben links). Diese Einzelwerte können für jedes Parameterset bspw. in einem Box-Plot-Diagramm dargestellt werden (Abbildung 5-6 unten links).

Für die eindeutige Identifikation einer Störung im Siegelvorgang ist entscheidend, ob die Prozessdatenunterschiede der Störungsmessungen größer sind, als die Unterschiede der Referenzmessungen. Dies kann anhand eines Wertes ΔD_P (auch ΔD_S) beantwortet werden, der sich entsprechend (9) berechnet:

$$\Delta D_P = D_{P,Stör,min} - D_{P,Ref,max} \quad (9)$$

Das Minimum der Abweichungen in den Prozessdaten einer Siegelung mit Störeinfluss wird demnach vom Maximum der Abweichungen der Referenzsiegelungen subtrahiert. Die Detektion einer Störung ist möglich, wenn $\Delta D_P > 0$ ist und je größer der Wert, desto eindeutiger lassen sich Prozessdatenschwankungen infolge einer Störung von den prozessimmanenten Schwankungen unterscheiden. ΔD_P kann zum Beispiel durch ein 2-D-Flächendiagramm in einem Parameterraum dargestellt werden (Abbildung 5-6 unten rechts).

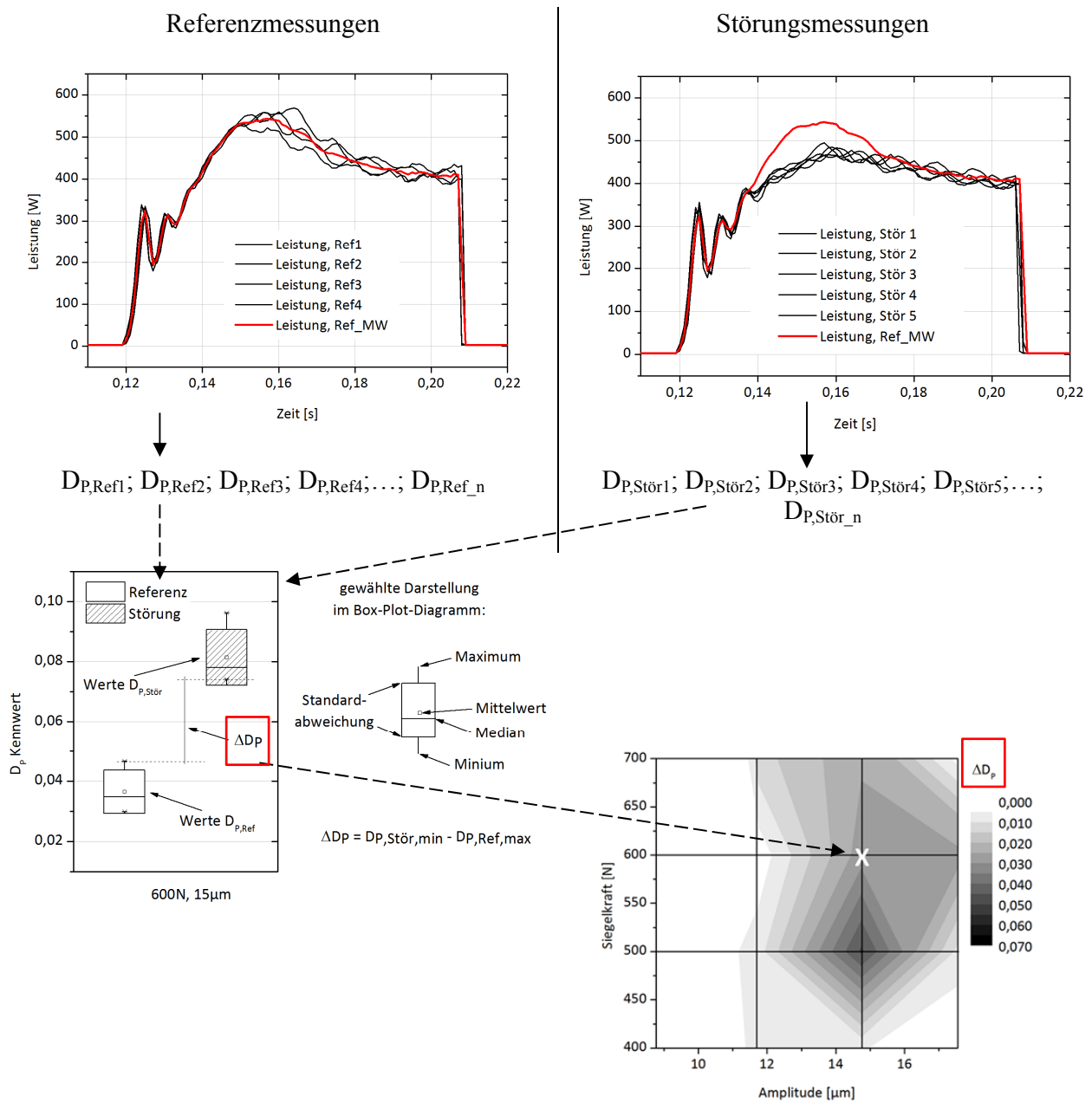


Abbildung 5-6: Auswertung der Prozessdaten und Darstellung der Unterschiede am Beispiel des Leistungsverlaufs bei transPE @600N; 15μm (oben links) Referenzsiegelungen, oben rechts) Störungssiegelungen, unten links) Box-Plot-Diagramm, unten rechts) Flächendiagramm

5.7 Entwicklung des Versuchsstands

5.7.1 Anforderungen und Eingrenzung

Automatisierung, Ultraschallvariante, Nahtform

Auf Basis der vorhergehenden Systematisierung der Störeinflüsse wird ein Versuchsstand entwickelt, mit dessen Hilfe Störungen auf das Ultraschallsiegelverfahren und dessen Prozessdaten experimentell untersucht werden können. Es wird dabei eine weitest mögliche Automatisierung angestrebt, weil damit menschliche Einflüsse während der Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden können und ein wiederholbarer Ablauf notwendige Voraussetzung für verlässliche Aussagen und Ergebnisse ist. Die angestrebte weitest mögliche Automatisierung bezieht sich auf das Applizieren der Störung, den Siegelvorgang und die Erfassung der Prozessdaten. Innerhalb dieser Schritte sind ungewollte, durch manuelle Handhabung verursachte Quereinflüsse unbedingt zu vermeiden. Eine Automatisierung der Nahtqualitätsanalyse ist nicht notwendig, da die beschriebenen halbautomatischen Laborprüfmethoden keine messbaren Einflüsse auf die Nahtqualität haben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Untersuchungen auf Nähte ohne Lagensprung begrenzt. Für die Auswirkungen von Störungen spielt es eine untergeordnete Rolle, ob ein Lagensprung entlang der Naht vorhanden ist. Mit einfachen, durchgehend zweilagigen Nähten ist außerdem eine breitere Variation der Packstoffe möglich, die Prozessführung wird vereinfacht und der untersuchbare Parameterraum vergrößert sich.

Beim Auftrag von flüssigen und pastösen Gütern hat es einen Einfluss, ob die zu benetzende Packstofffläche waagrecht oder senkrecht orientiert ist, weil bei senkrechter Orientierung die aufgetragenen Störgüter infolge der Schwerkraft ab einer bestimmten Tropfengröße abfließen. Bei waagrecht orientierter Packstofffläche würde der Auftrag zunächst auf die untere der beiden Folien erfolgen und die zweite Folie anschließend aufgelegt werden. Bei einer senkrechten Anordnung der Folienproben könnten beide hängenden Probestreifen mit Störgut benetzt werden und anschließend aneinander gelegt werden. Dafür lassen sich vorgefertigte Beutelrohlinge verwenden, bei denen alle Nähte, außer der Kopfnäht bereits gesiegelt sind. Dadurch könnte das Störverfahren analog zum maschinellen Füllvorgang gestaltet werden, bei dem das Abfüllen von flüssigen Packgütern in die Packung ebenfalls stets in Wirkrichtung der Schwerkraft erfolgt. Das ist anwendungsnah und ermöglicht die Verwendung vorhandener Baugruppen.

Es wird eine räumliche Trennung zwischen Applikation der Störung und Siegelvorgang vorgenommen, um ungewollte Sekundärstörungen zu vermeiden. So wird gewährleistet, dass beim Auftragen von Störgut oder der Packmittelerwärmung die Siegelwerkzeuge davon nicht beeinflusst werden. Dadurch entsteht ein zeitlicher Verzug, in dem die Packstoffprobe mit Störung zum Siegelwerkzeug transportiert werden muss.

Umsetzung der Störprinzipie

Die vollständige Umsetzung und Untersuchung aller beschriebenen möglichen Varianten der Störprinzipie sind im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten, weshalb eine entsprechende Fokussierung vorgenommen werden muss. Aufgrund der geringen Anzahl vorheriger

wissenschaftlicher Untersuchungen speziell zum Störeinfluss beim Ultraschallsiegeln, ist diese Eingrenzung jedoch sehr schwierig. Auf eine Untersuchung von staubenden Packgütern wird verzichtet, weil das Verfahren bei diesen Gütern als vorteilhaft bekannt ist und auch im industriellen Umfeld dafür eingesetzt wird. Die zu erwartenden Störeinflüsse sind daher gering und die notwendigen Variationen innerhalb dieser Störgutgruppe würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Der reproduzierbare, automatisierte Auftrag von staubigem Störgut auf den Packstoff ist technisch schwierig zu realisieren und die zu erwartende Staubentwicklung bedeutet zusätzlichen Aufwand zum Schutz von Bediener und Maschinenteknik.

Es wird weiterhin davon abgesehen dilatante, pastöse Störgüter zu untersuchen, weil die zu erwartenden extrem hohen Viskositäten infolge der hohen Schergeschwindigkeit beim Ultraschallsiegeln das Schwingensystem beschädigen könnten. Durch das dilatante Verhalten wird ein automatisierter Auftrag erschwert, weil z.B. Düsen verstopfen würden und es sind keine Ultraschallverpackungsanwendungen mit entsprechenden Packgütern bekannt.

Die flüssigen Störgüter werden anhand von Wasser als Modellsubstanz untersucht, weil eine störende Kühlung des Nahtbildungsvorgangs erwartet wird. Aufgrund der hohen Wärmekapazität bei gleichzeitig hoher thermischer Leitfähigkeit verglichen mit Öl, ist bei Wasser diese mutmaßliche Kühlwirkung am größten [Mih12].

Die stückigen Störgüter werden anhand von gequollenen Pastastreifen untersucht. Damit kann vor allem der Festigkeitseinfluss des Störgutes untersucht werden und im Gegensatz zu Papier und Karton gibt es keinen Einfluss durch Fasern im Störgut.

Bei den thermischen Störungen wird die Variante gewählt, bei der temperiertes Wasser in vorgefertigte Beutel abgefüllt wird. Weil das Wasser als thermischer Energiespeicher fungiert und dadurch die größtmögliche thermische Beeinflussung realisiert werden kann.

Die Störungen des Packmittels werden als möglicher Einfluss in dieser Arbeit zwar genannt und systematisiert, sollen in den vertiefenden Untersuchungen jedoch keine Rolle spielen, da vor allem die Störungen durch Packgut eine Ursache für defekte Nähte darstellen und wissenschaftlich bisher kaum untersucht wurden. Es sind außerdem Siegelssysteme im industriellen Einsatz, mit denen z.B. Geometriefehler erkannt werden können [N.N.12], weshalb der dahingehende Forschungsbedarf als weniger groß eingeschätzt wird.

Die Störungen in Zusammenhang mit dem Werkzeug werden ebenfalls ausgeklammert. Es wird davon ausgegangen, dass sich Störungen durch packgutbenetzte Werkzeuge weniger stark auswirken, als Packgut zwischen den Fügeflächen der Packstoffe. Das Packgut auf dem Werkzeug kann z.B. gar keinen Kontakt zum Packmittel haben und wandelt dann nur zusätzlich Energie während des Fügevorgangs, der deshalb evtl. unvollständig verläuft. Für den Fall, dass sich Packgut zwischen Werkzeug und Packstoffaußenfläche befindet, ist eine ähnliche Kühlwirkung zu erwarten, wie bei Störgut zwischen den Packstoffinnenflächen. Ein Kontakt zwischen dem eigentlichen Siegelpolymer und dem Störgut wird dabei nicht erwartet, weshalb die Auswirkungen der packgutbenetzten Werkzeuge auf die Nahtqualität als geringer eingeschätzt werden. Defekte Siegelwerkzeuge lassen sich sehr schwer simulieren, weil es keine Datenbasis gibt, mit deren Hilfe abgeschätzt werden könnte, welche Defekte auftreten können und wie sich diese im Prozess

auswirken. Es ist außerdem davon auszugehen, dass Störungen durch Werkzeugdefekt vergleichsweise selten auftreten und auch im Rahmen der statistischen Prozessüberwachung erkannt werden können. Die Werkzeugstörung durch Erwärmung des Schwinggebildes führt zu verändertem Schwingverhalten und dadurch unterschiedlichen Reglerparametern des Generators (s. Kap. 2.4.5). Damit wären die Auswirkungen der thermischen Störungen auf die Prozessdaten nicht mehr vom Einfluss der Reglereinstellung zu unterscheiden.

5.7.2 Grundstruktur

Aus den Anforderungen lässt sich das verarbeitungstechnische Funktionsschema des zu entwickelnden Versuchsstands ableiten und ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Kernstücke dieses Versuchsstands sind eine Siegelstation mit der die Packstoffe gesiegelt werden und eine sog. Störstation, in der bei Bedarf Störungen des Packmittels vorgenommen werden können. Die Packung muss also zuerst die Störstation durchlaufen und anschließend zur Siegelstation transportiert werden. Zur Erfassung der Prozessdaten einer jeden Siegelung ist zusätzlich ein Messsystem notwendig, mit dem diese Daten aufgezeichnet werden können. Im Sinne der angestrebten Automatisierung werden die vorgefertigten Beutelrohlinge zunächst aus einem Packstoffspeicher entnommen und durch ein Transportsystem zwischen den einzelnen Stationen gefördert. Nach durchgeführter Siegelung werden die Packungen zu einer Entnahmestation geführt, in der sie entnommen werden können.

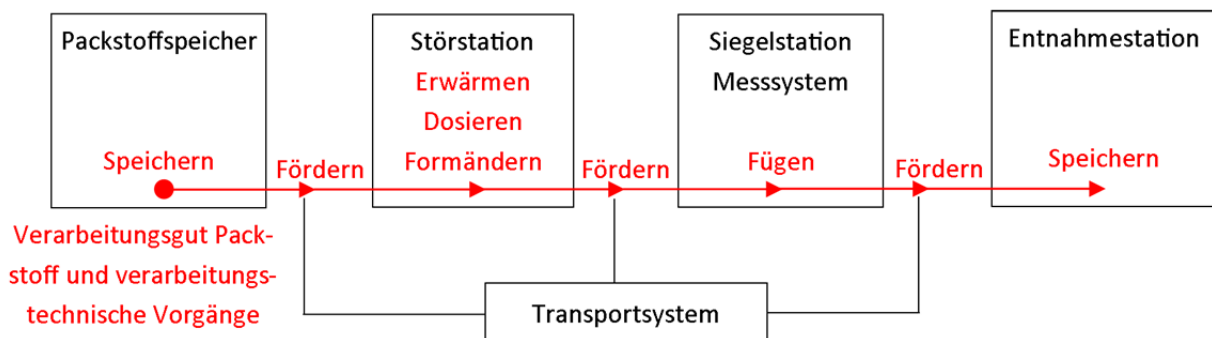


Abbildung 5-7: Funktionsschema des Versuchsstands

Aufgrund der dargestellten Grundstruktur wird ein Versuchsstand mit mindestens vier Stationen benötigt. Aus Platzgründen wird als Basis ein Rundläufersystem (Fa. HDG Verpackungsmaschinen) in Tischbauweise genutzt, bei dem ringsum im Abstand von 90° die folgenden Module angeordnet sind:

- Packmittelmagazin für vorgefertigte 3- oder 4-Randsiegelbeutel mit offener Kopfnah
- Störstation zum definierten Stören der Packung
- Ultraschallsiegelstation mit Messsystem
- Entnahmestation

5.7.3 Packmittelmagazin, Entnahmestation, Transportsystem und Antrieb

In dem verwendeten Rundläufersystem der Fa. HDG Verpackungsmaschinen sind Packmittelspeicher, Transportsystem und Antrieb bereits integriert. Der Packmittelspeicher ist ein Magazin, in dem die ungefüllten, flachen Beutelrohlinge vertikal hintereinander gestapelt werden [BLM14]. Ein Stapelschieber sorgt dafür, dass der jeweils zuerst zu fördernde Beutel am Ende des Magazins gegen ein Halteblech gedrückt wird. Das verwendete Transportsystem ist ein zentral angeordneter Rundläufer mit Vakuumsauggreifern, der das Packmittel zwischen den einzelnen Stationen transportiert und von einem Servomotor über einen Riemen angetrieben wird. Der Rundläufer vollzieht zwischen den einzelnen Stationen jeweils eine Bewegung um 90° und verharrt innerhalb der einzelnen Stationen in Ruhe. Das entspricht einer Wirkpaarung zweiter Klasse (intermittierender Transport des Verarbeitungsgutes) [GK12]. Der Beutelrohling wird durch den Vakuumsauggreifer aus dem Packstoffmagazin entnommen und von diesem während des gesamten Durchlaufes festgehalten. Die relative Position vom Rundläufer zu den einzelnen Stationen ist nicht variabel und dadurch die Position des Beutels bei jedem Durchlauf identisch. Einzig die Position des Packstoffmagazins kann relativ zum Rundläufer feinjustiert werden. Damit wird auch die Position des Beutels relativ zum Rundläufer und demzufolge auch zu allen anderen Stationen fein eingestellt. In der Entnahmestation wird die Packung vom Sauggreifer freigegeben und kann aus dem Rundläufersystem vom Bediener entnommen werden.

5.7.4 Siegelstation

Für die Siegelversuche wird eine Standard-Ultraschallsiegeleinheit (Fa. Herrmann Ultraschalltechnik) verwendet. Diese besteht aus einem 35 kHz-Schwingsystem mit Sonotrode (SN: 56.693/1, Übersetzung 1:1,8, Breite 110 mm), Booster (Übersetzung 1:1,5) und Konverter (max. Amplitude $6,5 \mu\text{m}$), sowie zugehörigem Generator (ULTRAPLAST digital 1200). Dadurch ergibt sich eine maximale Amplitude von $\sim 18 \mu\text{m}$. Das zur Siegeleinheit gehörende Gegenstück des Schwingsystems ist ein kompaktes Ambossmodul (ERG-Radius 2,5 mm). Die Siegelstation ist schematisch in Abbildung 5-8 dargestellt.

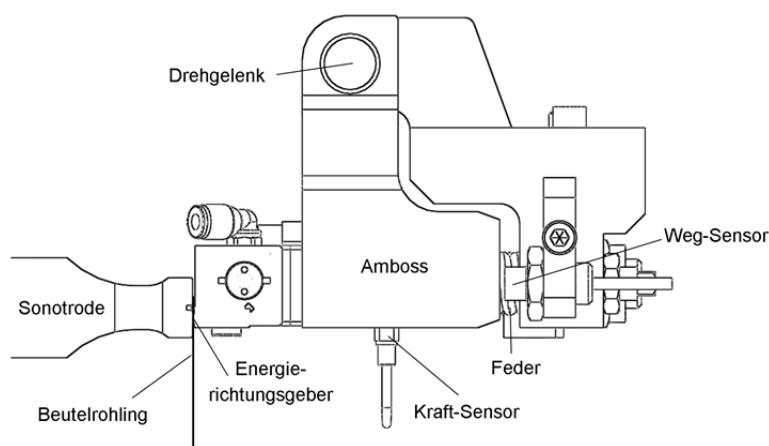


Abbildung 5-8: Ambossmodul mit integrierten Sensoren, Packmittel und Sonotrode

Der Amboss ist kippbar in einem Drehgelenk gelagert und wird durch zwei Federn verspannt, über deren Vorspannung die Siegelkraft eingestellt wird. Schwingsystem und Ambossmodul der Siegelstation sind über eine Zangenkonstruktion am Rundläufer befestigt, wodurch Sonotrode und Amboss pneumatisch dem Packmittel zugestellt werden können. Die Schweißparameter (Siegelzeit und Amplitude) werden über das Mess- und Bediensystem vorgegeben. Für die Versuche wird ein fabrikneues Werkzeug verwendet und bei der vergleichsweise geringen Anzahl angestrebter Versuche sind messbare Verschleißerscheinungen ausgeschlossen. Ein Einfluss von Sekundärstörungen durch Abnutzung kann im Rahmen dieser Arbeit daher ausgeschlossen werden.

5.7.5 Störstation

Innerhalb der Störstation werden thermische Störungen simuliert, flüssige oder pastöse Störgüter aufgesprüht, oder manuell weitere Störeinflüsse appliziert. Die Störstation wird deshalb modular und leicht austauschbar konzipiert um unterschiedliche Störprinzipien effizient untersuchen zu können.

Packung öffnen

An der Störstation befindet sich ein zweiter Vakuum-Sauggreifer mit dem die Packung geöffnet werden kann, damit beispielsweise die Störgüter auf die innere Packmittelloberfläche aufgetragen werden können. Der komplette Versuchsstandsaufbau mit den einzelnen Stationen ist in Abbildung 5-9 schematisch dargestellt. Die konstruktive Realisierung der Störstation wird nachfolgend beschrieben.

Thermische Störung

Die thermische Beeinflussung der Packmittel soll durch das Abfüllen von heißem Wasser in die geöffnete Verpackung simuliert werden. Das abzufüllende Wasser fließt deshalb von einem Wasseranschluss durch einen Durchlauferhitzer in dem das Wasser temperiert werden kann. Dessen Temperatur wird mit Hilfe einer Heizpatrone (Typ 1, Fa. Under Control Instruments), eines Temperaturfühlers (NTC-LPS-XXS, Fa. Enda) und eines Temperaturreglers (ET1412, Fa. Enda) geregelt und kann manuell eingestellt werden. Für die Abfüllung wird eine Vollstrahldüse (Mod. 544.400, Fa. Lechler) verwendet mit der das Wasser als dünner Strahl in die geöffnete Packung gefüllt wird. Vor der Vollstrahldüse befindet sich ein elektrisches 2/2-Wegeventil (VDW31-5G-4-02F-Q, Fa. SMC), mit dem das Füllen der Packung gesteuert werden kann.

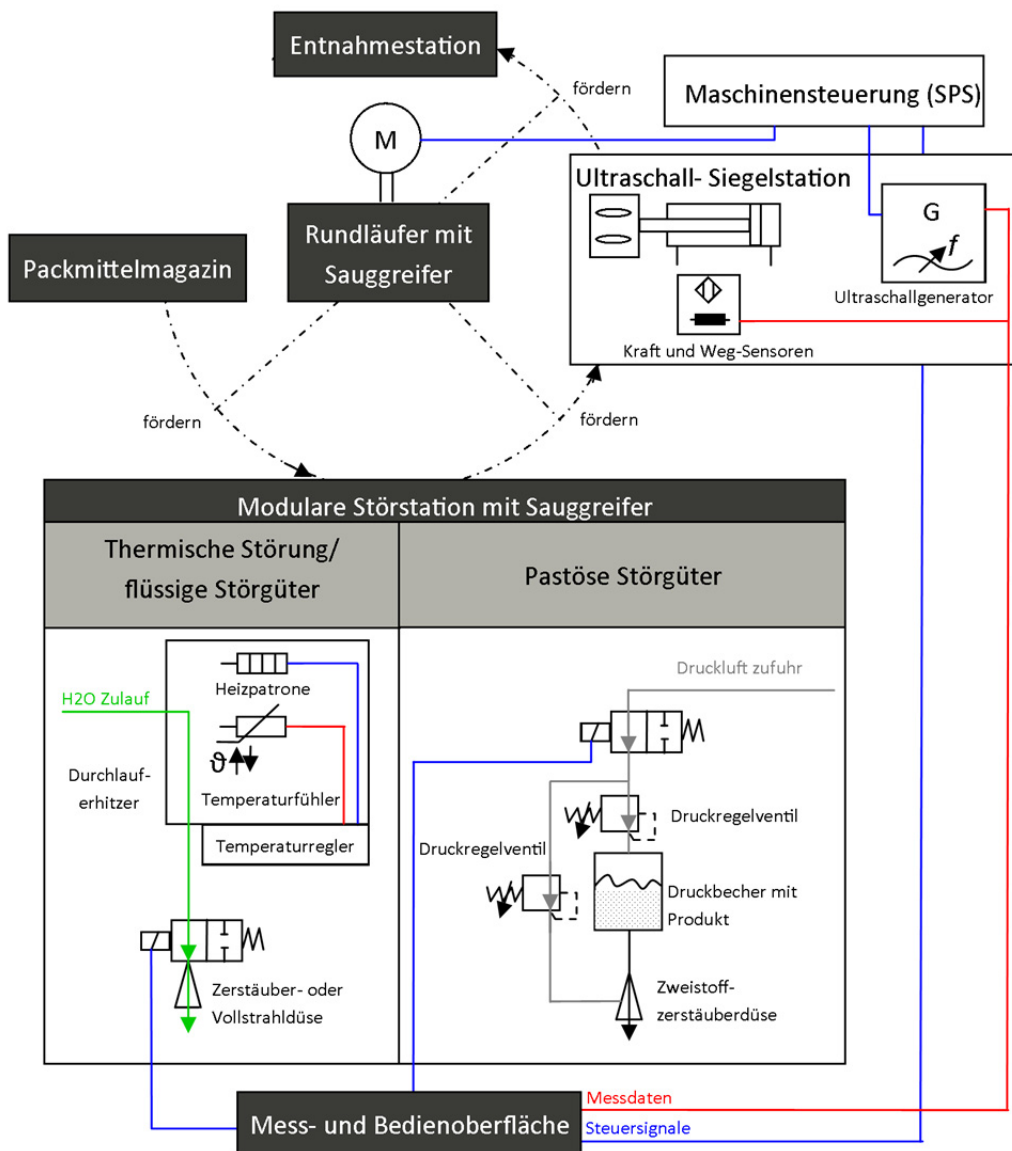


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung des Versuchsstands

Flüssige Störgüter

Bei der Untersuchung der flüssigen Störgüter wird sich im Rahmen dieser Arbeit auf die Benetzung mit Wassertropfen beschränkt. Daher kann, bei Verwendung einer entsprechenden Zerstäuberdüse, der zuvor beschriebene Aufbau für die thermischen Störungen weiterverwendet werden. Für die Erzeugung eines gleichmäßigen und feinen Wassersprühnebels kommt eine Einstoff-Zerstäuberdüse (Mod. 212.004, Fa. Lechler) zum Einsatz, weil diese zur Zerstäubung von niedrigviskosen Gütern besser geeignet sind [Ric08]. Bei geöffneter Kopfseite der vorgefertigten Beutel hat die Siegelnahtebene einen elliptischen Querschnitt. Zum Aufbringen der Störung auf die Innenseite der geöffneten Packung ist daher ein Kegelstrahl die geeignete Strahlform. Da der Nahtbereich nur ein schmaler Streifen auf der inneren Mantelfläche der geöffneten Packung ist, wird eine Hohlkegeldüse gewählt (Abbildung 5-10). Es wäre ebenfalls möglich eine Vollkegeldüse zu verwenden, dadurch würde aber lediglich mehr Störgut verbraucht werden und an Stellen im Inneren der Packung gelangen, an denen es für die Untersuchungen irrelevant ist.



Abbildung 5-10: CAD-Modell des Auftrags flüssiger Störgüter mit Hohlkegeldüse

Pastöse Störgüter

Die pastösen Störungen werden durch Xathan-Wasser-Gemische mit unterschiedlicher Konzentration untersucht. Für den automatisierten Auftrag muss die Modellverschmutzung zunächst gespeichert werden. Dafür wird ein sog. Druckbecher (Mod. 25775, Fa. SATA) verwendet, der mit einem Überdruck (mit zugehörigem Druckregelventil manuell einstellbar) beaufschlagt wird, um das Störgut vom Druckbecher zur Zerstäuberdüse zu fördern. In diesem Fall kommt eine Zweistoff-Zerstäuberdüse (Mod. 943/6, Fa. Schlick) zum Einsatz, in der das pastöse Störgut mit Druckluft zerstäubt wird um es mittels Spühauftrag applizieren zu können. Der Druck der Zerstäuberluft wird manuell mit einem Druckregelventil (LR-1/4-DB-7-MINI, Fa. Festo) eingestellt. Das Zerstäuberluft- und Druckbecherventil sind hinter einem elektrisch zu betätigenden 2/2-Wegeventil (VDW31-5G-4-02F-Q, Fa. SMC) angeordnet, welches von der zentralen Mess- und Bedieneroberfläche geschaltet werden kann.

Stückige Störgüter

Anhand von gequollenen Pastastreifen werden stückige Störgüter untersucht. Die Pastastücke lassen sich innerhalb der Störstation einfach und hinreichend genau per Hand in die geöffnete Packung einlegen, weil die feuchte, gequollene Pasta gut an der senkrecht stehenden Siegelseite der Packmittel haftet.

5.7.6 Messsystem

An beiden Federn des Ambossmoduls ist jeweils ein Kraftsensor (CMC/5kN, Fa. HBM) integriert mit dessen Hilfe die Fügekraft eingestellt werden kann. Mit zwei Wegsensoren (ZXEM02T, Fa. Omron) wird der Federweg gemessen. Dieser ist äquivalent zum Fügeweg der Sonotrode, weil mit Bildung und Verdrängung der Schmelze und daraus resultierender Verjüngung der Naht (s. Kap. 2.3.2.2), die Feder entlastet wird. Beide Wegänderungen sind also äquivalent und durch entsprechende Kalibrierung kann der Fügeweg indirekt über den gemessenen Federweg ermittelt werden. Da der zurückgelegte Werkzeugwegverlauf beim Siegeln, also die Nahtverjüngung sehr klein ist, sind vor allem die Anforderungen an die minimale Messwertauflösung und die Genauigkeit

des Wegesensors entscheidend. Die üblichen Foliendicken von Lebensmittelverpackungsfolien liegen im Bereich von $< 100 \mu\text{m}$, die Schwingweite des Werkzeugs beträgt maximal $18 \mu\text{m}$. Durch die Benetzung des Packstoffs mit stückigem Störgut kann es vor der eigentlichen Siegelung zu einem Werkzeugabstand im einstelligen Millimeterbereich kommen, falls das Störgut nicht verdrängt werden kann. Bei der Auswahl der Sensoren muss immer ein Kompromiss zwischen Messbereichsgröße und minimaler Auflösung gefunden werden. Bei den geplanten Untersuchungen ist die minimale Auflösung die wichtigere Größe, weil dadurch feinere Unterschiede im *Fügeweg* betrachtet werden können. Der Werkzeugabstand vor der Ultraschallschwingung ist von nachrangiger Bedeutung. Der gewählte Wegsensor hat eine Auflösung von $1 \mu\text{m}$ und einen Messbereich von 2 mm , bei einer Messbereichslinearität von $0,5\%$ und ist damit für die Versuche geeignet. Das Messsystem zeichnet die während einer Siegelung gemessenen Sensor-Datenverläufe mit einer gewählten zeitlichen Auflösung von 4 kHz auf. Dadurch wird der Ultraschallfügevorgang hinreichend genau erfasst und das anfallende Datenvolumen begrenzt. Am Generator werden außerdem die Datenverläufe von Ultraschallleistung und Schwingamplitude gemessen und ebenfalls aufgezeichnet. Die Weg- und Kraftdaten sind eigentlich keine generatorimmanenten Daten, sondern stellen mittels zusätzlicher Sensoren streng genommen eine externe Prozessüberwachung dar. In der hier verwendeten Standard-Ultraschallsiegeleinheit wird im realen Anwendungsfall ebenfalls ein Wegsensor eingesetzt [N.N.12]. Damit wird aber nicht der zeitabhängige *Fügeweg* gemessen, sondern nur anhand von punktuellen Messungen kontrolliert, ob sich ein Beutel zwischen den Siegelbacken befindet (um das Schwingsystem vor Beschädigungen zu schützen) oder Falten im Nahtbereich des Beutels sind. Die Genauigkeit und Auflösung der Standard-Sensoren sind dementsprechend gering. Durch das prinzipielle Vorhandensein eines solchen Sensors können die *Fügeweg*daten aber ebenfalls zu den Prozessdaten des Ultraschallsystems gezählt werden.

5.7.7 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf entspricht in seiner Reihenfolge einem realen Verpackungsprozess, mit der Ausnahme, dass im Versuchsstand kein Packgut abgefüllt wird. Nachdem der Bediener an der Mess- und Bedienoberfläche ein Startsignal gegeben hat, entnimmt der Rundläufer einen Beutelrohling aus dem Packmittelmagazin und transportiert diesen, durch Drehung um 90° , zur Störstation. Die folgende Beschreibung der Einzelschritte des Störauftrags orientiert sich an der Störung mit pastösem Störgut. Alle automatisiert ablaufenden Störungen verlaufen entsprechend. Auch die manuelle Störungsapplikation erfolgt dann, wenn die Packung sich in der Störstation befindet.

Der schrittweise Ablauf der einzelnen Schritte innerhalb der Störstation ist in Abbildung 5-11 dargestellt. Die Packung wird geöffnet (Abbildung 5-11 a – c), sodass Störgüter auf die Siegelflächen des Beutels aufgebracht werden können. Dann wird die zur Anwendung kommende Düse über der geöffneten Packung abgesenkt (Abbildung 5-11 d) und für eine zuvor festgelegte Zeit erfolgt der Sprühauftrag des Störgutes (Abbildung 5-11 e). Danach wird die Sprühdüse aus der Packung herausgefahren (Abbildung 5-11 f) und der Beutel vom Sauggreifer freigegeben (Abbildung 5-11 g).

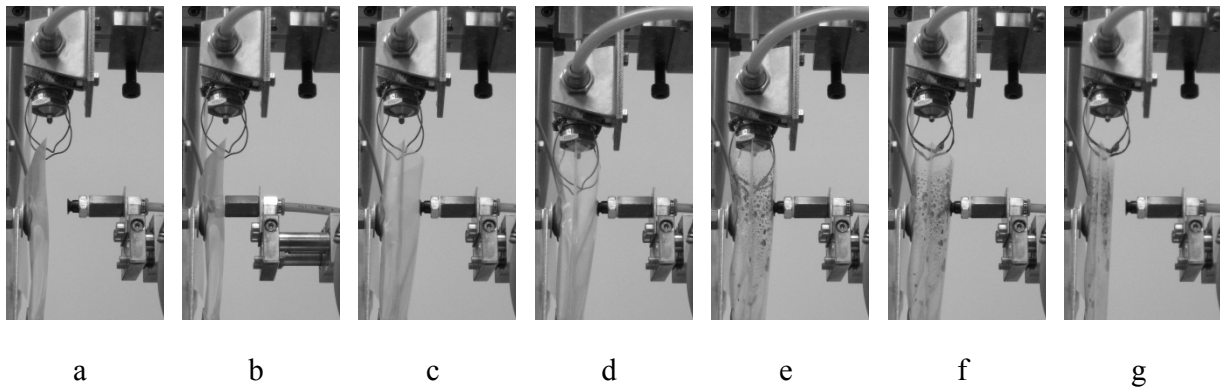


Abbildung 5-11: Schrittweiser Ablauf des Auftrags mit pastösem Störgut a) Beutel wird mit Sauggreifer des Rundläufers in Störstation gefördert b) Sauggreifer der Störstation greift Beutel c) Beutel wird geöffnet d) Zweistoffdüse wird abgesenkt e) Sprühauftrag des pastösen Störgutes f) Düse wird angehoben g) Sauggreifer der Störstation gibt Beutel frei

Bei der Herstellung von Referenzsiegelungen ohne Störung wird der Beutel ebenfalls automatisch geöffnet, aber es entfällt der Sprühauftrag des Störgutes. Dadurch wird verhindert, dass die zum Aufbringen der Störung notwendigen maschinellen Handhabungsschritte zu systematischen Fehlern in den Prozessdaten führen können. Nachdem der Sauggreifer die Packung freigegeben hat, wird diese durch 90°-Drehung des Rundläufers zur Siegelstation weiterbewegt. In der Siegelstation wird die Packung zunächst zwischen die geöffneten Siegelwerkzeuge geführt. Sonotrode und Amboss werden mit der zuvor eingestellten Siegelkraft dem Beutel zugestellt und nach Erreichen der eingestellten Kraft beginnt die Oszillation des Werkzeugs mit der zuvor definierten Amplitude und für die Dauer der vorgegebenen Siegelzeit. Während des Siegelvorgangs werden die Prozessdaten (Leistung, Amplitude, Fügeweg und Fügkraft) aufgezeichnet. Nach Beendigung des Siegelvorgangs werden die Werkzeuge geöffnet und der gesiegelte Beutel wird zur Entnahmestation gefördert, wo er entnommen werden kann. Daran anschließend kann die Analyse der Nahtqualität erfolgen. In Abbildung 5-12 ist beispielhaft ein Beutel vor und nach der Siegelung durch pastöses Störgut dargestellt.

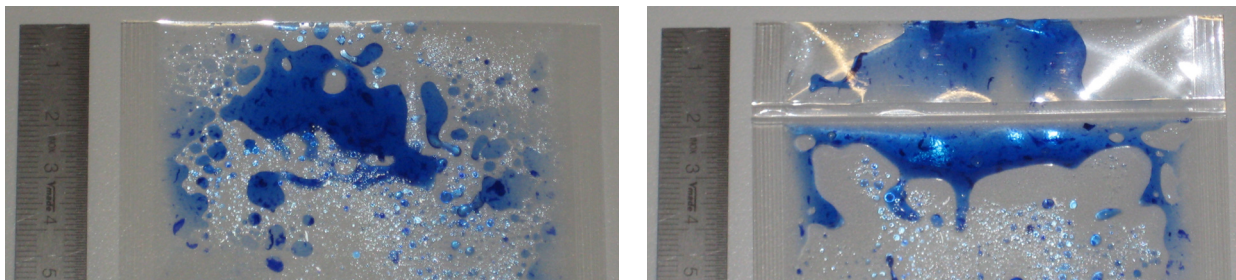


Abbildung 5-12: Pastöser Störgutauftrag links) vor der Siegelung und rechts) nach der Siegelung

Mit dem dargestellten Versuchsstand ist es somit möglich reproduzierbare Störungen des Siegelvorgangs vorzunehmen. Die Reproduzierbarkeit der Verschmutzungsmenge wird u.a. durch den zeitlich konstanten Auftrag der Störgüter gewährleistet. Bei den Düsen, welche für die flüssigen Störgüter zur Anwendung kommen, lässt sich das aufgetragene Störgutvolumen anhand der Düsenkenndaten berechnen. Bei den Zweistoff-Zerstäuberdüsen für die pastösen Störgüter ist die tatsächliche Auftragsmenge auch von der Viskosität abhängig und muss daher messtechnisch erfasst werden.

6. Versuchsplanung

6.1 Erwartete Einflüsse auf Nahtqualität und Prozessdaten

6.1.1 Erwartete Einflüsse der Störprinzipie

Es ist davon auszugehen, dass sich die zu untersuchenden Störprinzipie unterschiedlich stark auf Nahtqualität und Prozessdaten auswirken werden. Nachfolgend sind daher die angenommenen Auswirkungen der einzelnen Störprinzipie dargestellt.

Thermische Störung

Bei den thermischen Störungen durch Erwärmung der Packstoffe wird erwartet, dass durch den zusätzlichen thermischen Einfluss während des Fügevorgangs zu viel Energie zugeführt wird (s. Kap. 4.3.1). Je nachdem mit welchen konkreten Siegelparametern gearbeitet wird, kann sich das auf die verschiedenen Bereiche des Prozessfensters unterschiedlich auswirken: Im Prozess-optimum wird davon ausgegangen, dass die zusätzliche Energie dazu führt, dass „übersiegelt“ wird, d.h. im Vergleich zur Referenzsiegelung mehr Material aufgeschmolzen wird. Je nach Packstoff kann das zur Verminderung der Nahtqualität führen. Bei Siegelparametern unterhalb des Optimums, also Punkten im Prozessfenster mit weniger Energieeintrag (geringere Amplituden und Siegelkräfte), könnte die zusätzliche thermische Energie zu einer Verbesserung der Nahtqualität führen, wohingegen bei Parametern oberhalb des Optimums eine Zerstörung der Naht eintreten kann. Eine Beeinflussung der Nahtdichtigkeit wird durch die thermischen Störungen nicht erwartet.

Störung durch flüssige Störgüter

Bei den Störungen wird eine Prozessverlangsamung erwartet, weil die Flüssigkeit im Nahtbereich kühlend wirkt (s. Kap. 4.3.2). Im Prozessoptimum werden daher mutmaßlich geringere Nahtqualitäten (geringere Nahtfestigkeit) erzielt, weil der Fügevorgang nicht bis zum Erreichen optimaler Nahtqualität vollzogen werden kann. In Bereichen des Prozessfensters mit geringerem Energieeintrag wird die Nahtfestigkeit ebenfalls niedriger sein, bzw. die Nahtbildung eventuell verhindert. Bei Parameter-Sets mit höherem Energieeintrag steigt die Nahtfestigkeit vermutlich an, weil dem zu hohen Energieeintrag („Übersiegeln“) entgegengewirkt wird.

Störung durch pastöse Störgüter

Die pastösen Störgüter werden sich ebenfalls verlangsamernd auf den Fügevorgang auswirken. Im Vergleich zu den flüssigen Störgütern ist dabei eine höhere Störwirkung zu erwarten, weil sich während des Siegelns größere Mengen von Störgut im Nahtbereich befinden. Das wird u.a. durch die höhere Viskosität verursacht, die dem Abfließen der aufgespritzten Störgüter vom senkrecht stehenden Packstoff entgegen wirkt. Eine Kontaktbehinderung der Fügeflächen durch pastöse Störgüter wird aufgrund der speziellen Verdrängungsmechanismen beim Ultraschallsiegeln nicht erwartet, weil die Fließgrenze der Modellsubstanz aus dem Lebensmittelbereich von den auftretenden Spannungen beim Schließen der Werkzeuge und infolge der Ultraschallschwingung überschritten wird. Es ist davon auszugehen, dass sich die Nahtfestigkeit verringert.

Störung durch stückige Störgüter

Auch bei den stückigen Störgütern wird davon ausgegangen, dass diese sich kühlend und dadurch verlangsamernd auf den Fügevorgang auswirken. Dabei kann es je nach Prozessführungsparameter und Festigkeit der Modellschubstanz vorkommen, dass das Störgut von den Siegelwerkzeugen nicht zerteilt und verdrängt werden kann. Durch einzelne in der Naht verbleibende Störgutrückstände werden sich vermutlich Nahtfestigkeit als auch Nahtdichtigkeit verringern.

Klassifizierung der Störprinzipie

Entsprechend der erwarteten Auswirkungen werden die Störprinzipie nach dem Grad ihrer erwarteten Störwirkung klassifiziert:

- i. thermische Störung (geringste angenommene Störwirkung)
- ii. Störung mit flüssigem Störgut
- iii. Störung mit pastösen Störgut
- iv. Störung mit stückigem Störgut (größte angenommene Störwirkung)

Durch die angestrebten Versuche gilt es zu verifizieren, ob die hier vorgenommene Sortierung zutreffend ist, welche der genannten Störungen anhand der Prozessdaten identifiziert werden können und wie stark die Störungen sich jeweils auf die Nahtqualität auswirken. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Sortierung keine Allgemeingültigkeit besitzt, weil dabei sowohl die konkreten Eigenschaften der Störgüter und speziell bei iii. und iv. die Menge des Störgutes außer Acht gelassen werden. Eine große Menge an hochviskosem pastösem Produkt kann sich durchaus gravierender auf den Fügeprozess auswirken, als eine geringe Menge weichen, stückigen Störguts. Diese Klassifizierung ist jedoch für die Eingrenzung des Versuchsumfangs hilfreich.

6.1.2 Erwartete Einflüsse aus Prozessführung und Packstoffen

Die angestrebten Ergebnisse werden von den Ultraschallsiegelparametern und den Packstoffen beeinflusst.

Ultraschallsiegelparameter

Die Variation der Ultraschallsiegelparameter beeinflusst den Prozessablauf und damit auch die Prozessdaten und Nahtqualität. Es wird angenommen, dass Siegelkraft und Schwingamplitude einen deutlich größeren Einfluss auf das Siegelverhalten durch packgutbenetzte Nähte haben, als die Siegelzeit. Bei großen Siegelkräften wird im Nahtbereich befindliches Störgut vermutlich leichter zerteilt und herausgequetscht. Ebenso sollten höhere Schwingweiten und dadurch höhere mechanische Penetration der Folien dazu führen, dass Kontaminationen besser aus der Fügenaht herausgedrückt werden. Größere Siegelzeiten haben hingegen, vor allem beim Erreichen des prozesstypischen Gleichgewichtszustandes, nachweislich keinen prozessrelevanten Einfluss mehr [TB13]. Diejenigen Störungen, die verhindern, dass genügend Energie in der Nahtzone gewandelt wird, werden sich eher bei kurzen Siegelzeiten kritisch auswirken. Aus den vorgenannten Gründen und weil sich dadurch die Variation der Siegelparameter erheblich verringert, wird die Siegelzeit

nicht variiert und im Rahmen der Versuche auf 100 ms fixiert, weil dies einen typischen Wert für Ultraschallsiegelanwendungen bei hohen Arbeitsgeschwindigkeiten darstellt.

Die Prozessdatenverläufe beim Ultraschallsiegeln werden durch unterschiedliche Reglereinstellungen beim Lernen des Generators (s. Kap. 2.4.5) beeinflusst. Eine konstante Einstellung der Reglerparameter bei der Untersuchung der einzelnen Störprinzipie kann jedoch nicht sichergestellt werden, weil durch Umbauten am Versuchsstand oder beim Trennen der Stromversorgung jedes Mal Generator und Schwingsystem neu „angelern“ werden müssen. Dadurch wird die Auswertung von Prozessdatenunterschieden erschwert. Die Generatorregelung wurde daher während der Untersuchungen einzelner Störprinzipie nicht verändert, wodurch vergleichende Aussagen innerhalb dieser Messreihen möglich sind. Für vergleichende Aussagen zwischen den Störprinzipien ist dies zu beachten.

Packstoffe

Auf Basis der Untersuchungen von BACH ET AL. und ERNST ist bekannt, dass sich Störungen beim Ultraschallsiegeln je nach Packstoff unterschiedlich auf die Nahtqualität auswirken ([Ern90], [BTM12]). Es wird daher davon ausgegangen, dass auch die Störungserkennbarkeit anhand der Prozessdaten je nach Packstoff unterschiedlich ausgeprägt ist. Vor allem bei den thermischen Störungen ist davon auszugehen, dass das Vorhandensein gut wärmeleitender Schichten im Packmittelverbund eine Rolle spielt. Bei der in dieser Arbeit vorgenommenen Umsetzung zur Simulation der thermischen Störung mittels Abfüllen von temperiertem Wasser in geöffnete Beutel, ist die Packstofftemperatur im Nahtbereich von der planaren Wärmeleitung des Packmittels abhängig.

Die speziellen Verdrängungsmechanismen beim Ultraschallsiegeln werden vermutlich durch die Biegesteifigkeit der Folien beeinflusst. Je biegesteifer ein Packmittel ist, desto weniger gut kann das Packmittel der spitzen Werkzeuggeometrie des ERG folgen und desto weniger gut kann das Störgut verdrängt, bzw. zerteilt werden.

6.2 Untersuchte Packstoffe

6.2.1 Auswahl

Für die experimentellen Untersuchungen werden vorgefertigte, senkrecht stehende Beutel verwendet. Die Fertigung solcher Beutel erfolgt auf Spezialmaschinen oder auf Verpackungsmaschinen, wobei die beiden abschließenden Verarbeitungsvorgänge des Füllens und Verschließens nicht ausgeführt werden. Für die Untersuchungen werden drei verschiedene, handelsübliche Packmittel verwendet, um die Verarbeitung auf den zuvor genannten Maschinen gewährleisten zu können. Die Breite der vorgefertigten Beutel beträgt 90 mm. Um den Einfluss der planaren Wärmeleitung der Packmittel untersuchen zu können, wird ein Packmittelverbund mit Aluminiumschicht, ein metallisierter Verbund und ein reiner Kunststoffverbund untersucht. Der hohe E-Modul des Aluminiums führt zu hoher Biegesteifigkeit solcher Verbunde, wodurch dieser Einfluss ebenfalls anhand dieses Verbundes untersucht werden kann.

6.2.2 Schichtaufbau

Der Schichtaufbau der drei gewählten Verbunde ist in Tabelle 3 dargestellt. Der erste Verbund wird mit AluPP bezeichnet und hat einen dreischichtigen Aufbau. Der Verbund besteht aus einer Siegelschicht aus PP (70 μm dick), einer Barrierschicht aus Aluminium (8 μm dick) und einer bedruckten Trägerschicht aus PET (12 μm dick). Der Verbund ist ein typisches autoklavierbares⁹ Packmittel für Beutel-Verpackungen mit hohen Anforderungen an die Barriere Wirkung der Folie [Ahl97]. Alle drei Verbundbestandteile sind mittels eines Klebers gegeneinander kaschiert.

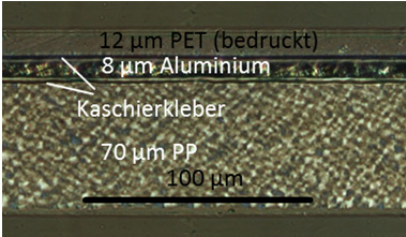

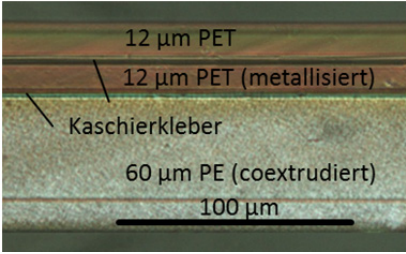

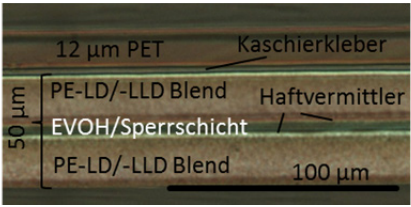

Der zweite Verbund hat als Siegelschicht eine coextrudierte PE-Schicht (60 μm dick), deren Trennebene deutlich im Mikrotomschnitt in Tabelle 3 zu erkennen ist. Der genaue PE-Typ ist nicht bekannt. Als Barriere wird eine innere, metallisierte PET-Schicht (12 μm dick) verwendet, die mit einer weiteren, äußeren PET-Schicht (12 μm dick) verbunden ist. Die metallisierte Oberfläche befindet sich dabei zwischen den beiden PET-Schichten, um besser vor Beschädigung (z.B. durch Abrieb) geschützt zu sein. Die coextrudierte PE-Siegelschicht ist mit den beiden PET-Schichten durch einen Haftvermittler verbunden und der Verbund wird im weiteren Verlauf als metPE bezeichnet.

Der dritte Verbund besitzt eine Barrierschicht aus EVOH, welche mit Haftvermittler zwischen zwei äußere Schichten aus PE coextrudiert wird. Das PE ist die Siegelschicht. Der gesamte Co-Ex-Aufbau ist 50 μm dick und ist gegen eine PET-Folie (12 μm dick) kaschiert. Die beiden PE-Schichten sind jeweils ein Blend aus PE-LD und PE-LLD. Die Folie ist transparent und wird daher im Folgenden als transPE bezeichnet.

Alle hier gemachten Angaben bezüglich der Polymerarten und deren Dicke basieren auf Herstellerangaben.

⁹ Autoklavieren ist ein Sterilisationsverfahren u.a. für Lebensmittel und Pharmazeutika. Die gefüllten Verpackungen werden dabei unter hohem Druck mit Hitze behandelt.

Tabelle 3: Schichtaufbau der untersuchten Packmittelverbunde

Bezeichnung	Schichtaufbau	Beuteldraufsicht
AluPP		
metPE		
transPE		

6.2.3 Thermische Analyse mittels DSC

Zur Charakterisierung der drei Packstofffolien wurden DSC-Messung durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 6-1 dargestellt. Anhand der jeweiligen Schmelzpeaktemperatur lassen sich die verschiedenen Polymere identifizieren und so die im vorherigen Abschnitt genannten Herstellerangaben verifizieren und spezifizieren. In Abbildung 6-1 weisen alle drei Packstoffe einen Schmelzpeak bei 250 °C auf, welcher der PET-Trägerschicht zuzuordnen ist. TransPE besitzt als einziger einen Schmelzpeak bei 180 °C, der die EVOH-Barriere in diesem Verbund charakterisiert. Das PP in AluPP ist an dem Schmelzpeak zwischen 140 °C und 170 °C zu erkennen. Die beiden anderen Materialien haben jeweils einen PE-typischen Schmelzpeak im Bereich von 80 °C bis 130 °C. Der doppelte PE-Schmelzpeak des transPE ist charakteristisch für ein Polymerblend, bei dem sich die Schmelzpeaks beider beteiligter PE-Typen überlagern. Das transPE hat außerdem eine niedrigere Schmelztemperatur als das metPE.

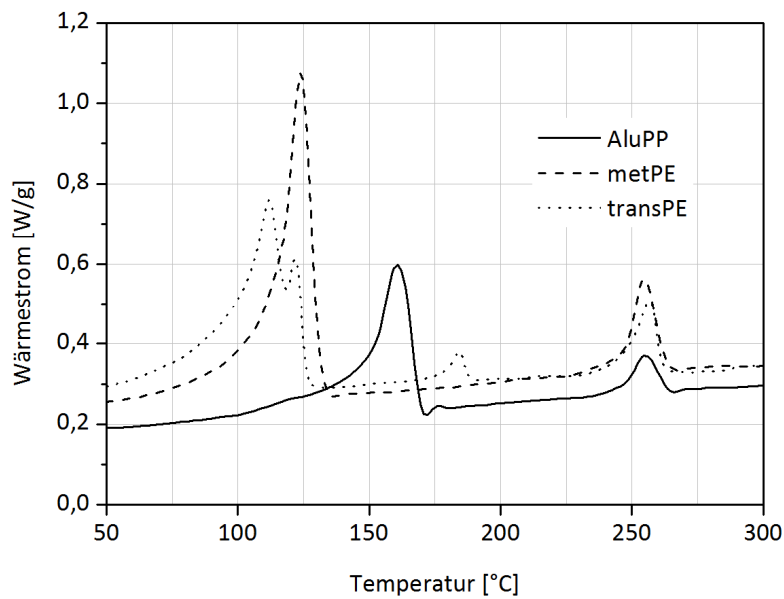


Abbildung 6-1: DSC-Analyse der Packstoffe¹⁰

Anhand des Thermogramms lässt sich abschätzen, dass der AluPP-Verbund ein deutlich größeres Prozessfenster aufweisen wird, als die beiden anderen Packstoffe, was an der niedrigeren Wärmestrommenge im Schmelzpeakmaximum und der Breite des Peaks erkennbar ist [TBM10]. Die beiden Materialien mit PE-Siegelschicht besitzen eine deutlich höhere Umwandlungsenthalpie, weshalb für das Ultraschallsiegeln ein etwas kleineres Prozessfenster zu erwarten ist (s. Kap. 2.3.2.2).

6.2.4 Nahtfestigkeit beim Wärmekontaktsiegeln

Das klassische Wärmekontaktsiegelverfahren wird industriell am häufigsten angewendet, weshalb eine dahingehende Packstoffcharakterisierung für vergleichende Aussagen zweckmäßig ist [Bac14]. Die Siegelnahtfestigkeiten beim Wärmekontaktsiegeln sind hauptsächlich von der Temperatur der Siegelwerkzeuge abhängig und in Abbildung 6-2 entsprechend dargestellt. Jedes Material hat dabei eine gewisse „seal-initiation-temperature“ (SIT), ab deren Überschreiten überhaupt relevante Nahtfestigkeiten ($> 5 \text{ N/mm}$) erreicht werden. Diese korreliert in etwa mit dem Schmelzverhalten der Packmittelverbunde: die beiden Materialien mit der PE-Siegelschicht haben eine deutlich geringere SIT als das Material mit der PP-Schicht. Die SIT des metPE liegt jedoch unterhalb der des transPE, obwohl metPE die größere Schmelzpeaktemperatur der Siegelschicht aufweist.

¹⁰ Messungen: Neda Stöhr, SKZ Das Kunststoffzentrum, Würzburg, Messgerät NETZSCH DSC 204F1 Phoenix

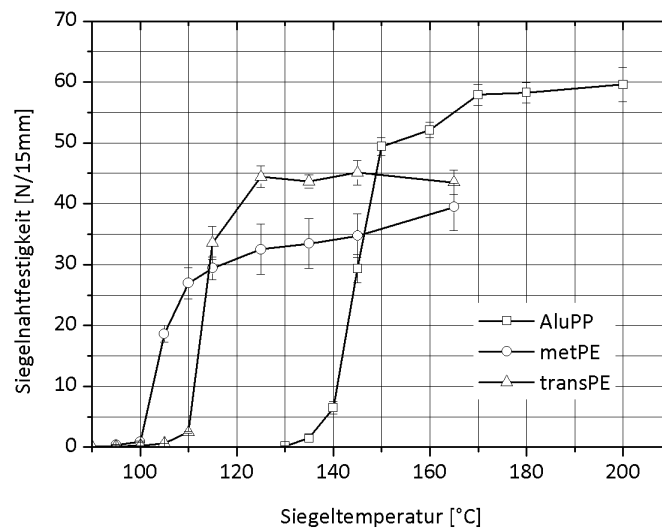


Abbildung 6-2: Siegelnahtfestigkeiten der ausgewählten Packmittel beim Wärmekontaktsiegeln

Dieser Effekt wird zum einen durch die verbesserte Wärmeleitung des metallisierten metPE, als auch durch die geringere Wärmeleitfähigkeit des EVOH [DEE+08] im transPE verursacht. Ein weiterer Grund ist die dünnere Siegelschicht des transPE-Packstoffs, weil für hohe Nahtfestigkeiten vor allem die Randbereiche einer Naht entscheidend sind [Bac14]. Diese müssen den aufgebrachtten Kräften bei der Messung der Nahtfestigkeit widerstehen. Größere Siegelschichtdicken und bessere Erwärmung der Randbereiche infolge lateraler Wärmeleitung beeinflussen die Gestalt der Nahtränder derart, dass bessere Nahtqualitäten erreicht werden können. Alle drei Packstoffe erreichen bei Überschreiten einer materialspezifischen Temperatur ein relativ konstantes Nahtfestigkeitsniveau, bei dem keine deutliche Steigerung mehr zu verzeichnen ist. Dieses Niveau kennzeichnet die maximal erreichbare Festigkeit, welche eine Naht mit diesem Siegelverfahren erreichen kann. Die Niveauhöhe ist dabei vor allem von der Packstoffstruktur abhängig. Der AluPP Verbund erreicht die höchsten Nahtfestigkeiten mit bis zu 60 N/15mm, was auf die Aluminiumschicht im Verbund zurückzuführen ist. Aluminium hat einen E-Modul, der um eine Größenordnung höher ist als der E-Modul der in den Folien verwendeten Polymere. Beim metPE-Material sorgen vor allem die beiden PET-Schichten für höhere Festigkeiten, weil PET einen höheren E-Modul als PE hat [Sae01].

6.3 Versuchsdurchführung

6.3.1 Randbedingungen für Referenzsiegelungen

Zur vergleichenden Untersuchung von Störeinflüssen auf den Siegelprozess ist es zunächst notwendig, die Randbedingungen für eine ungestörte Siegelung zu spezifizieren.

Die ungestörten Referenzsiegelungen werden unter folgenden Bedingungen hergestellt:

- Packstoff- und Werkzeugtemperatur: 23 °C (das Umgebungsklima bei den Versuchen hat 50% rel. Feuchte)
- keine Kontamination durch Störgut im Nahtbereich des Packstoffs und am Werkzeug
- keine Falten im Packmittel
- keine Schiefstellung des Packmittels zum Werkzeug
- Variation der Prozessführungsparameter des Ultraschallsiegelwerkzeugs (Amplitude und Siegelkraft)

Die jeweiligen Störprinzipie werden definiert, reproduzierbar und jeweils einzeln appliziert, also nicht miteinander kombiniert.

6.3.2 Eskalierendes Prüfvorgehen

6.3.2.1 Beschreibung

Um Aussagen über die Erkennbarkeit von Störungen anhand der Prozessdaten einer Ultraschallsiegeleinheit treffen zu können, werden vergleichende Siegelversuche mit und ohne Störbeeinflussung durchgeführt. Die genannten Einflüsse können jeweils sehr breit variiert werden, daher ist zur Bewältigung des Versuchsumfangs eine begründete Eingrenzung vorzunehmen.

Zunächst wird das Prozessfenster der zu untersuchenden Packstoffe ermittelt, also die Nahtqualität abhängig von den zu variierenden Ultraschallsiegelparametern, wodurch sich spezifische Punkte innerhalb des Prozessfensters (z.B. optimaler Arbeitspunkt) definieren lassen. Bei gleichzeitiger Erfassung der zugehörigen Prozessdaten können anhand dieser Referenzmessungen bereits allgemeine Aussagen zum Einfluss der Prozessführung auf die Prozessdatenverläufe getroffen werden.

Um den verbleibenden Versuchsaufwand weiter einzudämmen und weil nicht abgeschätzt werden kann, welche Störungen einen erkennbaren Einfluss haben werden, wird ein sogenanntes eskalierendes Prüfvorgehen gewählt. Das bedeutet, dass zunächst orientierende Versuche mit den Störprinzipien durchgeführt werden, bei denen die geringsten Auswirkungen auf Nahtqualität und Prozessdaten erwartet werden (die in Kap. 6.1 definierten Klasse i. und ii.). Diese orientierenden Versuche werden nur an definierten Punkten innerhalb des Prozessfensters durchgeführt und es wird auf eine Eigenschaftsvariation des untersuchten Störprinzips verzichtet. Stattdessen wird das Störprinzip so angewendet, dass die maximal mögliche Störwirkung erzielt wird. Abhängig davon, wie stark sich die Störungen auf Nahtqualität und Prozessdaten auswirken, werden darauf aufbauend Versuche mit dem nächst gravierenderen Störprinzip durchgeführt und dabei der zu untersuchende Siegelparameterraum vergrößert.

6.3.2.2 Exemplarisches Prüfverfahren

Spezifische Punkte im Prozessfenster

Beim exemplarischen Prüfverfahren werden die Versuche nur an packstoffspezifisch ausgewählten Parametersets innerhalb des Prozessfensters durchgeführt. Im Rahmen dieser orientierenden Versuche werden nur die zwei Packmittel metPE und AluPP untersucht, da sich vor allem bei den thermischen Störungen deren gute planare Wärmeleitung auswirkt. Das Prozessfenster (Siegelnahtfestigkeit und Energieverbrauch beim Fügen) von AluPP ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

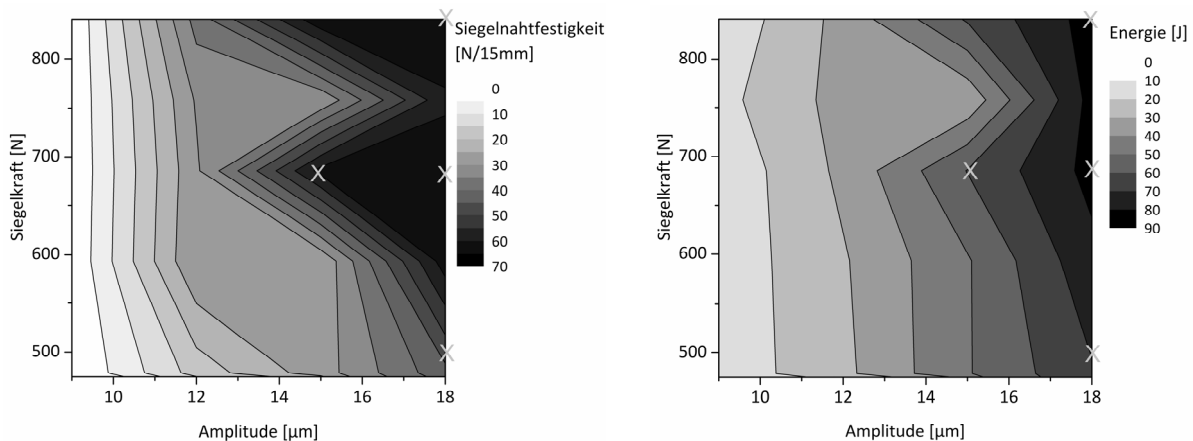


Abbildung 6-3: Prozessfenster des AluPP-Verbundes links) Siegelnahtfestigkeiten, rechts) zugehörige Siegelenergie mit ausgewählten Parametersets

Anhand von Siegelnahtfestigkeit und notwendiger Energie zum Fügen wurden beim AluPP-Verbund 4 Punkte innerhalb des Prozessfensters gewählt, die in Abbildung 6-3 markiert sind:

- Optimum (690 N, 15 µm): der Punkt bei dem höchste Nahtfestigkeiten bei geringster Energie erreicht werden
- Randbereich 1 (690 N, 18µm): selbe Kraft wie Optimum, bei maximaler Siegelamplitude
- Randbereich 2 (850 N, 18µm), maximale Krafteinstellung bei maximaler Siegelamplitude, hoher Energieeintrag in den Nahtbildungsvorgang
- Randbereich 3 (500 N, 18µm), minimale Krafteinstellung bei maximaler Siegelamplitude, niedriger Energieeintrag in den Nahtbildungsvorgang

Das Prozessfenster (Siegelnahtfestigkeit und Energieverbrauch beim Fügen) des metPE ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

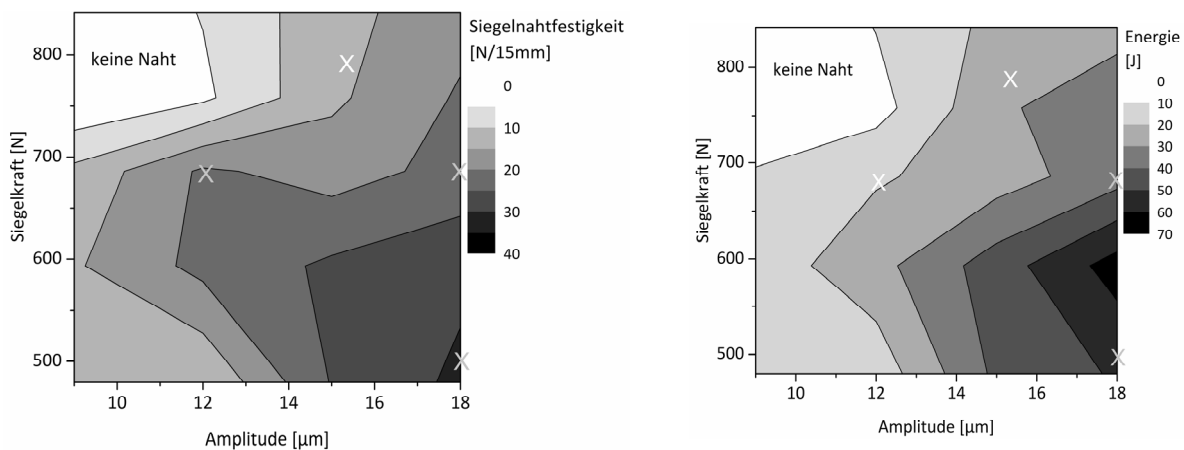


Abbildung 6-4: Prozessfenster des metPE-Verbundes links) Siegelnahtfestigkeiten, rechts) zugehörige Siegelenergie mit definierten Parametersets

Beim metPE-Verbund wurden ebenfalls 4 Punkte innerhalb des Prozessfensters gewählt, die in Abbildung 6-4 links) markiert sind:

- Optimum (500 N, 18 μm): der Punkt bei dem höchste Nahtfestigkeiten bei geringster Energie erreicht werden
- Randbereich 1 (690 N, 12 μm): höhere Kraft als Optimum, bei kleiner Siegelamplitude
- Randbereich 2 (790 N, 15 μm), höhere Kraft als Optimum, bei mittlerer Siegelamplitude
- Randbereich 3 (690 N, 18 μm), höhere Kraft als Optimum, bei großer Siegelamplitude

Eingrenzung der Variationsmöglichkeiten der Störprinzipie

Um die größtmögliche thermische Beeinflussung der Nahtzone zu erreichen, wird auf eine Variation der Wassertemperatur verzichtet und stattdessen die Beutel mit maximal temperiertem Wasser ($T = 90\text{ }^\circ\text{C}$) befüllt. Die Öffnungsdauer des Ventils beträgt 2 s, wodurch mit der gewählten Düse beim anliegenden Leitungsdruck von 6 bar ca. 60 ml Wasser in den Beutel gefüllt werden.

Die erwartete Kühlwirkung bei der Störung mit flüssigem Störgut ist umso größer, je kälter das applizierte Wasser ist. Um die größtmögliche Beeinflussung zu erreichen, wird daher die Wassertemperatur nicht variiert, sondern mit Raumtemperatur ($23\text{ }^\circ\text{C}$) appliziert (eine aktive Kühlung wurde in Kap. 5.3.1 ausgeschlossen). Beim Sprühauftrag der Wassertropfen mit einer Zerstäuberdüse werden sich mit steigender Sprühzeit immer größere Tropfen agglomerieren. Da die Beutel im Versuchsstand senkrecht stehen, werden die am Packstoff anhaftenden Tropfen von der Schwerkraft beeinflusst. Mit steigender Tropfengröße nimmt deren Gewichtskraft zu und die Tropfen fließen vom Packstoff ab, weil die Gewichtskraft die Adhäsionskraft zwischen Wassertropfen und Packstoff übersteigt. Durch das daraus folgende Abrollen der Tropfen verringert sich die Flüssigkeitsmenge im Nahtbereich wieder, gleichzeitig werden aber neue Tropfen aufgesprüht. Dadurch wird mit dem Zeitpunkt des Abrollens der Tropfen die maximal mögliche

Benetzung erreicht. In Vorversuchen¹¹ wurde mit Hilfe von Highspeedaufnahmen die dazu notwendige Sprühzeit des Versuchsstands zu 1 s ermittelt. Es wurde auf eine genaue, flächenbezogene Quantifizierung der aufgetragenen Wassermenge verzichtet, da der benetzte Packstoff vor dem eigentlichen Siegelvorgang durch die relativ spitze Siegelwerkzeugkontur deformiert wird. Dadurch wird die aufgebrachte Flüssigkeit vor dem Siegelvorgang verdrängt und die tatsächlich an der Naht befindliche Wassermenge ist extrem schwierig zu quantifizieren. Daher wurde das Aufbringen einer maximalen Flüssigkeitsmenge für die hier angestrebten Versuche als hinreichend genau angesehen. Der Düsenabstand von der Packungsoberkante beträgt 10 mm.

Umfang

Der Versuchsumfang für das exemplarische Prüfverfahren ist in Tabelle 4 dargestellt. Es wird für jedes untersuchte Parameterset eine definierte Anzahl von Referenz- und Störsiegelungen mit dem jeweiligen Störeinfluss durchgeführt (vgl. Abs. 5.7.7) und dabei die genannten Daten mit Hilfe des Mess- und Steuersystems aufgezeichnet.

Tabelle 4: Proben- und Versuchsumfang beim exemplarischen Prüfverfahren

Exemplarisches Prüfverfahren							
2 Packmittel x 4 Parameter-Sets (Siegelkraft, Amplitude)							
Thermische Störung der Packmittel Befüllung mit 60 ml H ₂ O bei 90°C				Störung durch flüssiges Störgut Sprühzeit: 1 s, Temperatur: 23 °C, Düsenabstand 10 mm			
Referenz		Störung		Referenz		Störung	
Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Nahtfestigkeit	Prozessdaten
je 3 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 3 Siegelnähten	je 3 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 3 Siegelnähten	je 3 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 4 Siegelnähten	je 3 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 4 Siegelnähten

¹¹ In unveröffentlichter studentischer Arbeit ([Roc13]).

6.3.2.3 Feinaufgelöstes Prüfverfahren

Prozessführungsparameter

Die Versuche mit feinaufgelöstem Prüfverfahren werden an allen drei Packstoffen durchgeführt und zur besseren Vergleichbarkeit werden alle drei Packstoffe im gleichen Prozessparameterraum untersucht. Dieser Bereich ergibt sich aus den Variationsmöglichkeiten der Ultraschallsiegeleinheit des Versuchsstandes und einer erfolgreichen Nahtbildung bei allen drei Packstoffen. Die Siegelkraft wird von 400 – 700 N variiert und die Amplituden werden zwischen 9 μm und 18 μm variiert. Beide Prozessführungsparameter werden dabei jeweils in 4 Schritten gleichmäßig variiert, wodurch sich 16 Parametersets ergeben.

Variation pastöses Störgut

Es wird angenommen, dass die Auswirkungen durch pastöses Störgut von den viskosen Eigenschaften des Modellstoffsystems abhängen. Deshalb werden zwei verschiedene Konzentrationen des Xanthan-Wasser-Gemisches untersucht:

- 1 g Xanthan je 100 ml Wasser
- 3 g Xanthan je 100 ml Wasser

Die Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit beider Xanthan-Wasser-Gemische ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

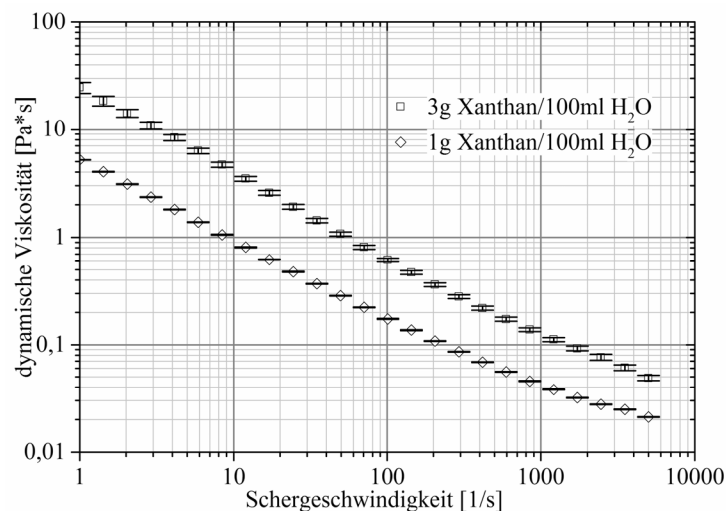


Abbildung 6-5: Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit und des Lösungsverhältnisses von Wasser und Xanthan

Die Variation der Störgutmengen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, die resultierende Verschmutzungsmenge der pastösen Störgüter wird durch Analyse des Verschmutzungsgewichts, analog Ernst [Ern90] vorgenommen. Die unterschiedliche Viskosität der beiden Xanthankonzentrationen führt zu einem deutlich unterschiedlichen Sprühverhalten beim Auftrag der

Kontamination. Um dennoch möglichst vergleichbare Verschmutzungsgewichte zu erzielen, wurden die in Tabelle 5 dargestellten Auftragsparameter der Sprühdüse verwendet.

Tabelle 5: Düsenparameter für den Auftrag der pastösen Störgüter

	1 g Xanthan / 100 ml H ₂ O	3 g Xanthan / 100 ml H ₂ O
Innendruck Druckbecher [bar]	0,2	1
Förderdruck Zerstäuberdüse [bar]	1	1,2
Abstand Düsenunterkante zu Beuteloberkante [mm]	10	10
Sprühzeit [s]	2,5	2,5
Resultierendes mittleres Verschmutzungsgewicht [g]	2	2

Variation stückiges Störgut

Um den Einfluss der Festigkeit bei stückigem Störgut untersuchen zu können, werden Pastastücke mit unterschiedlichem Wassergehalt verwendet. In Abbildung 6-6 ist der mit Hilfe eines Warner Bratzler Scher-Messers ermittelte Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Scherfestigkeit der Pastastücke dargestellt.

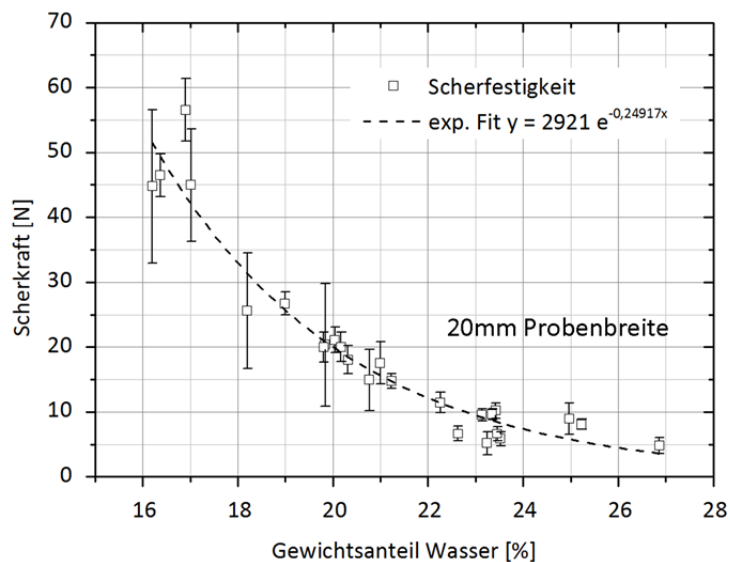


Abbildung 6-6: Scherfestigkeit der gequollenen Pastaprobe in Abhängigkeit des Wassergehalts

Daraus geht hervor, dass die Festigkeit der Pasta eine Funktion des Wassergehaltes ist und mit steigendem Wassergehalt die Festigkeitsschwankungen geringer werden. Diese Schwankungen werden vermutlich durch Geradheitsunterschiede der verwendeten Pastaplaten verursacht, die sich bei den gequollenen Proben ausgleichen und daher mit steigendem Wassergehalt geringer werden.

Für die angestrebten Versuche werden zwei unterschiedliche Pastafestigkeiten verwendet:

- 19 N, bzw. 20 Gew.-% Wasseranteil (hartes pastöse Störgut)
- 5 N, bzw. 26 Gew.-% Wasseranteil (weiches pastöses Störgut)

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Pastastücke nur noch nach Wassergehalt in weich und hart unterschieden und damit der Festigkeitseinfluss der stückigen Störgüter untersucht. Die genauen Festigkeitswerte jedes einzelnen Pastastückes variieren vermutlich, können jedoch nur zerstörend geprüft werden. Es ist daher nicht möglich die exakte Festigkeit des konkreten Pastastückes zu bewerten. Um den Einfluss der stückigen Störgutfestigkeit in dieser Arbeit zu untersuchen, ist die Trennung in zwei sich deutlich unterscheidende Festigkeitsgruppen zunächst ausreichend.

Für die Versuche werden Pastastreifen von 20 mm Breite und 30 mm Länge präpariert und senkrecht im Beutel positioniert, sodass die Mitte der Naht von 20 mm Pasta bedeckt ist. Bei der gewählten Beutel-, bzw. Nahtbreite von 90 mm bedeutet das eine Nahtbedeckung von ca. 22 %. Eine Variation der Verschmutzungsmenge, also die Breite der Pastastücke, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Versuchsumfang

Der Versuchsumfang für das exemplarische Prüfverfahren ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Proben- und Versuchsumfang beim feinaufgelösten Prüfverfahren

Feinaufgelöstes Prüfverfahren											
3 Packmittel x 16 Parameterstes (4 Siegelkräfte, 4 Amplituden)											
Störung durch pastöses Störgut						Störung durch stückiges Störgut					
Referenz			2 Störgut-Viskositäten			Referenz			2 Störgut-Festigkeiten		
Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Dichtigkeit	Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Dichtigkeit	Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Dichtigkeit	Nahtfestigkeit	Prozessdaten	Dichtigkeit
je 3 SNF-Messungen an 2 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 4 Siegelnähten	an 1 Beutel	je 3 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 5 Siegelnähten	an 1 Beutel	je 3 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 3 Siegelnähten	an 1 Beutel	je 1 SNF-Messungen an 3 Siegelnähten	je 1 Prozessdatenverlauf aus 5 Siegelnähten	an 1 Beutel

7. Ergebnisse zum Einfluss von Störungen auf Nahtqualität und Prozessdaten

7.1 Einfluss der Prozessführung auf Prozessdatenverläufe

Die Prozessführung beim Ultraschallsiegeln in Form der hier gewählten Einstellparameter Siegelkraft und Amplitude beeinflusst den Verlauf der Prozessdaten erheblich. Deren Einfluss zu identifizieren ist notwendig, um anschließend den Einfluss einer Störung auf die Prozessdaten besser davon zu unterscheiden und dadurch besser interpretieren zu können. In Abbildung 7-1 ist der Einfluss der Siegelkraft auf die gemessenen Prozessdatenverläufe dargestellt.

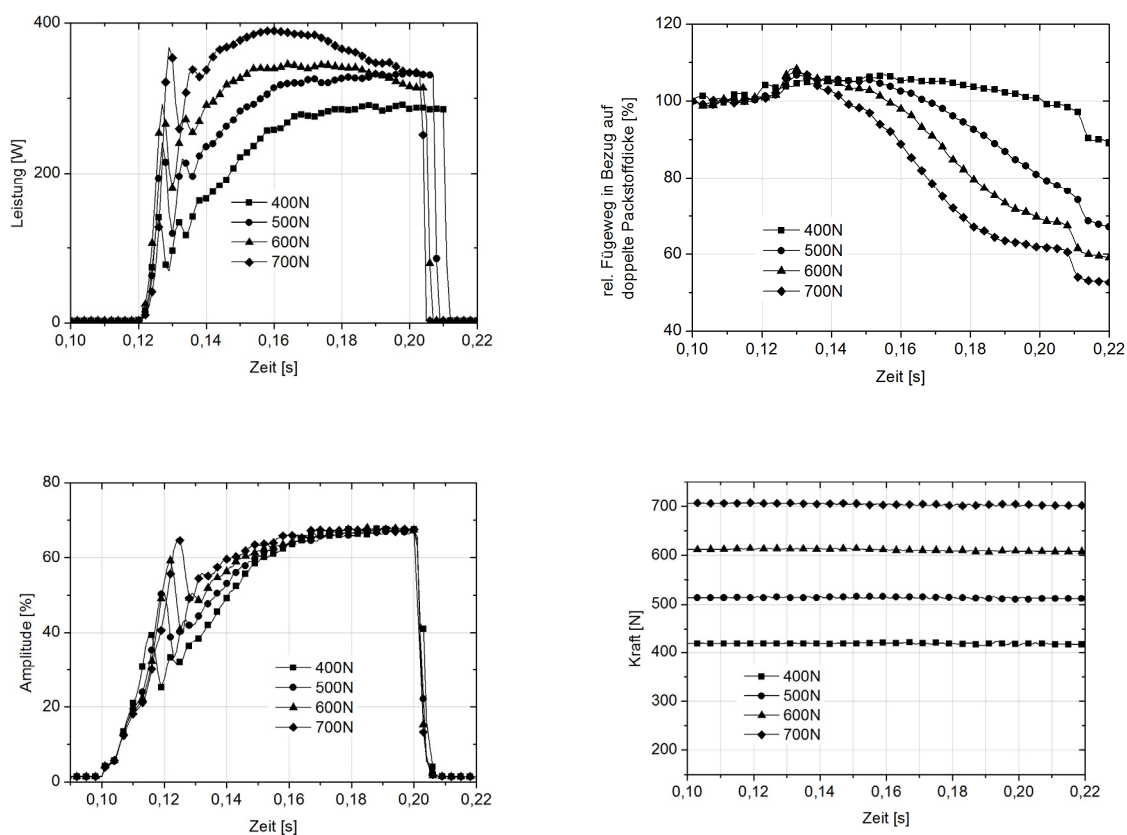


Abbildung 7-1: Prozessdatenverläufe in Abhängigkeit der Siegelkraft am Beispiel von transPE @15 µm (oben links) Leistung, oben rechts) Weg, unten links) Amplitude und unten rechts) Kraft

Mit steigender Siegelkraft werden das Schwingsystem und der Packstoff gegen den Amboss vorgespannt. Für die Schwingungserregung ist mit steigender Vorspannung mehr elektrische Leistung notwendig, was sich in einem entsprechend höheren Leistungsverlauf widerspiegelt (Abbildung 7-1 oben links). Entsprechend wird mit steigender Siegelkraft auch mehr Energie zur Herstellung einer Siegelnaht benötigt. Auch die wirksame Packstoffverformung wird größer, weshalb die Erwärmungsgeschwindigkeit und die Menge an aufgeschmolzenem Fügemedium steigen. Dementsprechend wird der Fügeprozess beschleunigt, was an einem schnelleren Einsinken des Fügeweges erkennbar ist (Abbildung 7-1 oben rechts). Die Siegelkraft beeinflusst außerdem das

Niveau des Gleichgewichtszustandes, bzw. die Nahtdicke nach dem Fügevorgang, weil mit steigender Siegelkraft mehr polymeres Siegelmedium aus der Naht herausgequetscht wird. Im Amplitudenverlauf wird lediglich der erste Peak von der Siegelkraft beeinflusst, danach nähern sich die Verläufe kraftunabhängig der Sollamplitude an (Abbildung 7-1 unten links). Der Vollständigkeit halber sind in Abbildung 7-1 unten rechts die Kraftverläufe dargestellt. Infolge der Nahtdickenreduktion während des Siegelvorgangs und der damit verbundenen Entspannung der Federn im Amboss kommt es zu einem minimalen Absinken der Siegelkraft, welches jedoch so gering ist, dass es in der genannten Darstellung nicht zu erkennen ist und vernachlässigt werden kann.

In Abbildung 7-2 ist der Einfluss der Amplitude auf die entsprechenden Prozessdatenverläufe dargestellt.

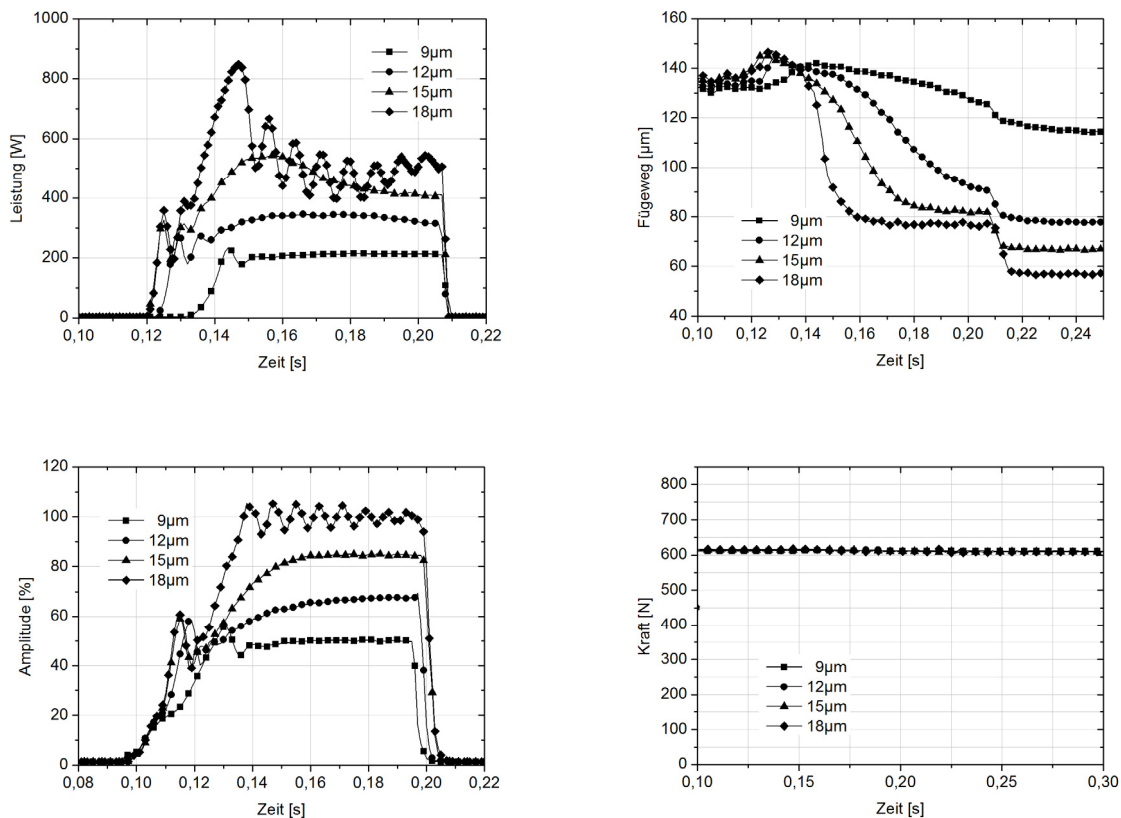


Abbildung 7-2: Prozessdatenverläufe in Abhängigkeit der Amplitude am Beispiel von transPE @600 N (oben links) Leistung, oben rechts) Weg, unten links) Amplitude und unten rechts) Kraft

Mit größer werdender Amplitude der Schwingung steigen sowohl die Reaktionskräfte im Packstoff, als auch der Energiebedarf um die Oszillation des Schwingsystems zu erzeugen. Beide Aspekte resultieren in einem höheren Leistungsniveau (Abbildung 7-2 oben links). Bei den beiden kleineren Amplituden (9 µm und 12 µm) ist ein verzögerter Leistungsanstieg zu beobachten. Bei einer Amplitude von 9 µm führt das im dargestellten Beispiel zu einer Verkürzung der effektiven Siegelzeit um 20 ms. Dieses Verhalten ist abhängig von den konkreten Regelungseinstellungen des Generators, könnte also entsprechend angepasst und kompensiert werden. Zugunsten vergleichender

Aussagen in einem breiten Parameterfenster wurden die Reglereinstellungen je Störprinzip nicht verändert (s. Kap. 6.1.2) und dieses Verhalten in Kauf genommen. Da das Erwärmungsverhalten u.a. von der Verformungsamplitude abhängt [Pot71], wird der Fügeprozess mit höherer Amplitude entsprechend beschleunigt und führt zu einer höheren Fügegeschwindigkeit, was am schnelleren Absinken des Fügeweges erkennbar ist (Abbildung 7-2 oben rechts). Im dargestellten Wegverlauf ist außerdem zu erkennen, dass abhängig von der Amplitude ein unterschiedliches Wegniveau im Gleichgewichtszustand erreicht wird. Weiterhin ist zu erkennen, dass die eingestellte Sollamplitude erst nach 40-50 ms erreicht wird, worin sich die unterschiedlichen Amplituden jedoch nur geringfügig unterscheiden (Abbildung 7-2 unten links). Auffallend ist die überlagerte Schwingung im Verlauf der 18 μm Amplitude, welche mit der entsprechenden Schwingung im Leistungsverlauf korrespondiert. Dies ist ebenfalls auf die Reglereinstellung des Generators zurückzuführen. Auf den Kraftverlauf hat die Amplitude keinen messbaren Einfluss (Abbildung 7-2 unten rechts).

7.2 Prozessdaten und Nahtqualität in Abhängigkeit der Störeinflüsse

7.2.1 Exemplarisches Prüfverfahren

7.2.1.1 Thermische Beeinflussung der Packmittel

Die Untersuchung zum Einfluss von thermischen Störungen auf die Nahtqualität von Beuteln erfolgt durch Abfüllen von heißem Wasser in die Packungen, vor dem eigentlichen Verschließvorgang. Die Messungen wurden an den beiden Packstoffen AluPP und metPE an definierten Punkten des Prozessfensters durchgeführt (s. Kap. 6.3.2.2). Die planare Wärmeleitung des metPE ist im Vergleich zum AluPP schlechter, aufgrund der nur wenige Atomkerne starken Metallisierung im Gegensatz zu einer 8 μm dicken Aluminiumschicht. Der zu erwartende Effekt der Nahtbereichserwärmung wird daher geringer ausfallen. Bei sehr hohen Kräften und kleinen Amplituden kommt es zu einem Fehler der Generatorregelung, in dessen Folge keine Nahtbildung erfolgt. Deshalb werden beim metPE nur drei der vier definierten Parametersets betrachtet. Der Einfluss der thermischen Störung auf die Nahtqualität ist in Abbildung 7-3 für die beiden Packmittel dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass thermische Störungen einen minimalen Einfluss auf die Nahtqualität haben. In der Tendenz erfolgt eine leichte Verminderung der Nahtqualität bei allen untersuchten Parameterpunkten, die sich in ihrem Ausmaß aber in fast allen Fällen innerhalb der Standardabweichung bewegt. Die erwartete Verbesserung der Nahtqualität an Parameter-Sets mit geringem Energieeintrag (AluPP @ 500 N, 18 μm) ist dabei nicht zu beobachten.

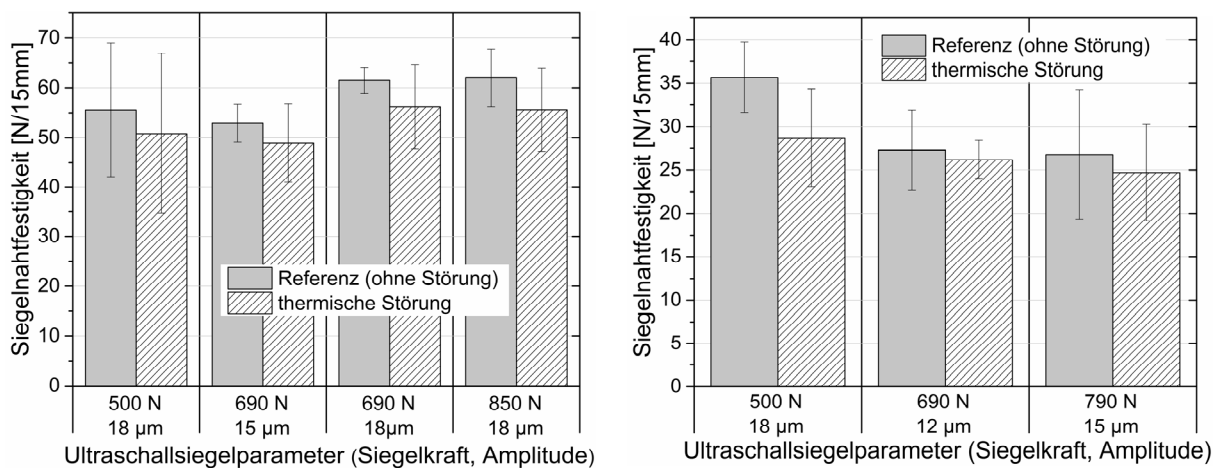


Abbildung 7-3: Einfluss der thermischen Störung auf die Nahtqualität bei links) AluPP und rechts) metPE

Der Einfluss der Erwärmung auf die Prozessdatenverläufe wird anhand des in Kap. 5.6.2 beschriebenen Abweichungskennwertes D_p betrachtet. In Abbildung 7-4 ist dieser für die Leistung dargestellt.

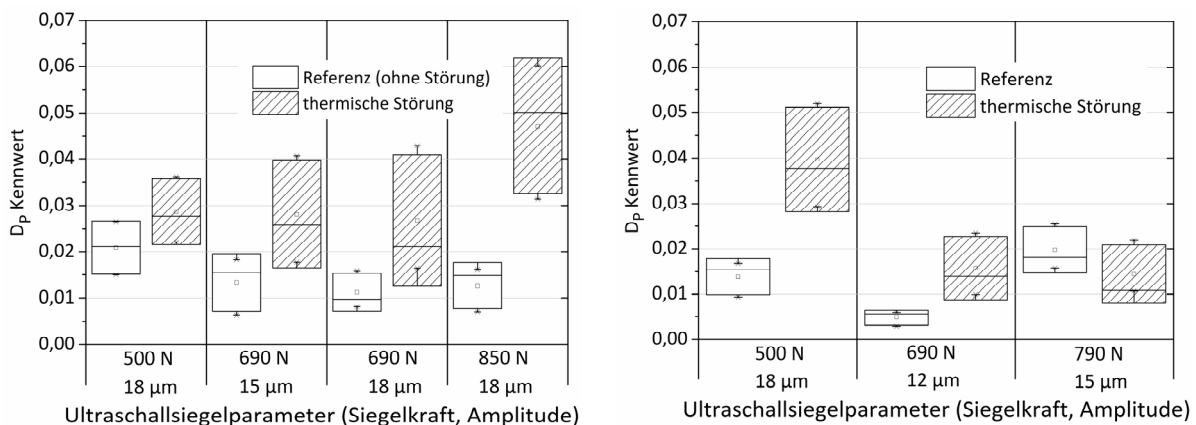


Abbildung 7-4: Einfluss der thermischen Störung auf die Prozessdaten anhand der Leistung bei links) AluPP und rechts) metPE

Die Unterschiede in den Leistungskurven sind ebenfalls relativ gering und meist nicht eindeutig. Für die eindeutige Identifikation, also Abgrenzung von Siegelungen mit Störeinfluss gegenüber den normalen Prozessschwankungen, darf der Wertebereich der Extrema der Referenzsiegelung keine Teilmenge mit dem Wertebereich der Störsiegelung aufweisen. Dies trifft jedoch für jedes Packmittel nur in je einem Parameterpunkt zu (AluPP @850 N, 18 mm und metPE @500 N, 18 µm). Im Fall von metPE ist es gleichzeitig das Parameterset, bei welchem der deutlichste Einfluss auf die Nahtfestigkeit festzustellen ist.

Die Unterschiede in den Wegdaten beider Packmittel sind in Abbildung 7-5 dargestellt. Beim Vergleich der jeweiligen D_s - und D_p -Kennwerte fällt auf, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen beiden gibt. Anhand der Wegdaten sind teilweise Störungen an anderen Parameterpunkten

identifizierbar als anhand der Leistungsdaten (z.B. bei AluPP @690 N, 15 μm), jedoch gibt es auch Parametersets, bei denen die Störungsdetektion durch den Weg nicht möglich ist (metPE @500 N, 18 μm).

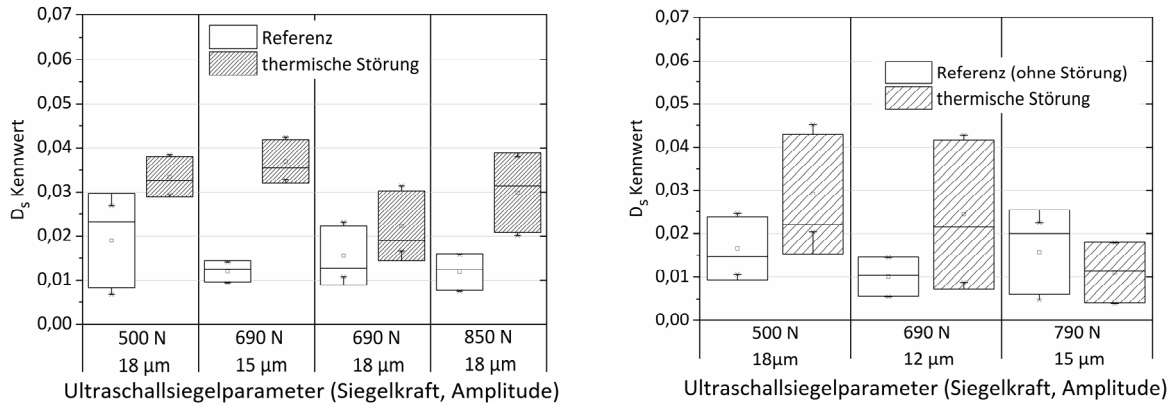


Abbildung 7-5: Einfluss der thermischen Störung auf die Prozessdaten anhand des Weges bei links) AluPP und rechts) metPE

Die hier untersuchte thermische Beeinflussung der Packmittel hat insgesamt einen zu vernachlässigenden Einfluss sowohl auf die Nahtqualität, als auch auf die Prozessdaten. Die Untersuchung wird jedoch durch die unbeheizten Ultraschallsiegelwerkzeuge des Versuchsstands beeinflusst. Am Versuchsstand existiert eine fixe Verzugszeit von 100 ms zwischen dem Schließen der Siegelbacken und dem Start der Ultraschallschwingung. In dieser Zeit befinden sich die Folien in Kontakt mit den Siegelwerkzeugen, und die statische Siegelkraft wird erzeugt. Dabei wird der zuvor erwärmte Packstoff wieder abgekühlt und eine mögliche Erwärmung des Nahtbereiches kompensiert. Die Abkühlung der Folienoberfläche wurde mit Hilfe eines FEM-Modells simuliert und ist in Abbildung 7-6 dargestellt.

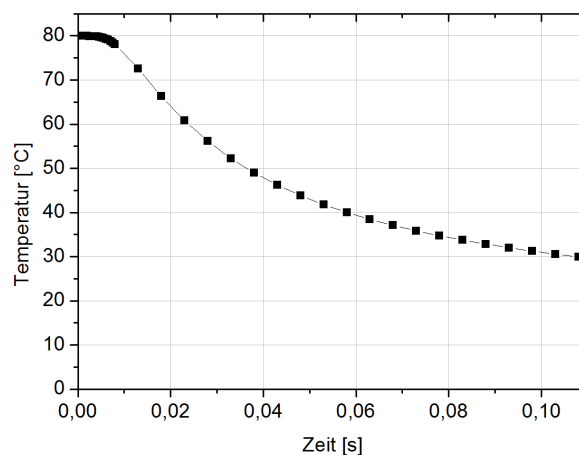


Abbildung 7-6: Temperatur der Folienoberfläche im Nahtbereich nach Schließen der Siegelbacken¹²

¹² FEM-Simulation: Sascha Bach, TU Dresden, mit ANSYS-Classic

Darin ist zu erkennen, dass sich die erwärmte Folie innerhalb der Verzugszeit von 100 ms von anfänglich angenommenen 80 °C bis auf ca. 30 °C abkühlt. Für eine genauere Untersuchung dieser Einflüsse müsste man die Siegelwerkzeuge temperieren, was vor allem bei der Sonotrode schwierig zu realisieren ist und im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen wurde (s. Kap. 5.7.1).

Es wurden deutlich größere Auswirkungen der thermischen Störungen erwartet, die aber mit dem gewählten Versuchsaufbau nicht genauer untersucht werden konnten. Entsprechend dem angestrebten Vorgehen wird als nächstes die Störung untersucht, bei der die nächst größeren Auswirkungen erwartet werden.

7.2.1.2 Störung durch flüssige Störgüter

Die Störung durch Flüssigkeitsspritzer im Nahtbereich wurde durch Aufbringen von Flüssigkeitstropfen auf die Packstoffoberfläche mit Hilfe einer Zerstäuberdüse realisiert. Es ist davon auszugehen, dass sich aufgrund des senkrecht stehenden Packmittels und der Verdrängungsmechanismen (durch die Siegelwerkzeuge) nur die Flüssigkeitsmenge oberhalb der entstehenden Siegelnaht störend auswirkt. Die Flüssigkeitsmenge unterhalb fließt ab und hat keinen Kontakt zur Naht.

In Abbildung 7-7 ist der Einfluss der Störung durch Flüssigkeiten auf die Nahtqualität anhand der Siegelnahtfestigkeiten dargestellt.

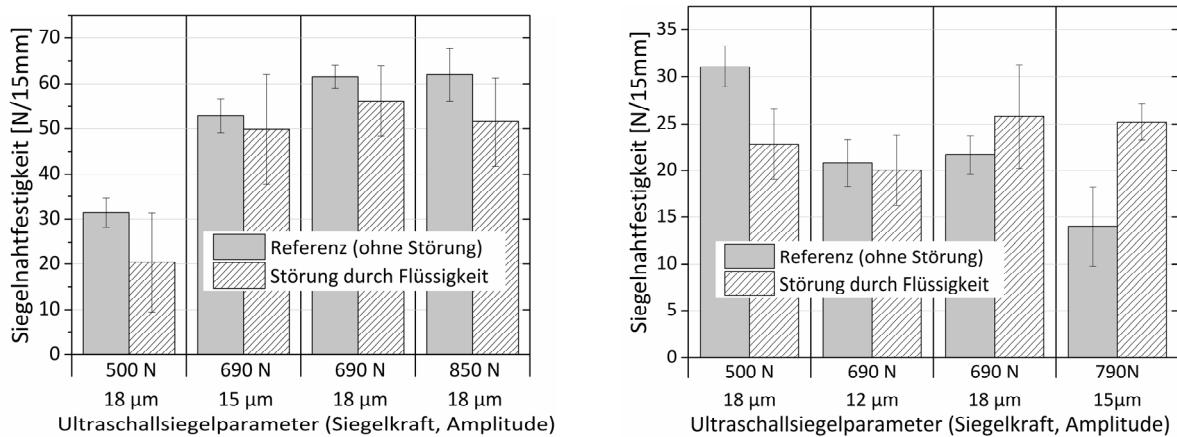


Abbildung 7-7: Einfluss der Störung durch Flüssigkeit auf die Nahtqualität bei links) AluPP und rechts) metPE

Beim AluPP sind die Ergebnisse mit denen im vorherigen Abschnitt dargestellten vergleichbar. Es ist ein genereller Trend zu niedrigeren Nahtfestigkeiten zu erkennen, wobei die Unterschiede vergleichsweise gering sind. Nur bei niedrigen Kräften (AluPP @ 500 N, 18 µm) kommt es zu einer Verringerung der Nahtfestigkeit um ca. 10 N/15mm. Das dabei erreichte Nahtfestigkeitsniveau von 20 N/mm wäre jedoch für die meisten Verpackungsanwendungen völlig ausreichend. Beim metPE-Verbund kommt es bei sehr hohem Energieeintrag (hohe Energie und Amplitude) zu einer Verbesserung der Nahtqualität, was an den höheren Nahtfestigkeiten bei gestörter Siegelung zu erkennen ist (metPE @ 690 N, 18 µm und @ 790 N, 15 µm). In diesen Bereichen verursachen die gewählten Siegelparameter der Referenzsiegelung einen zu hohen Energieeintrag im Vergleich zum

Optimum (metPE @ 590 N, 18 μm). Die Benetzung mit Wasser hat eine kühlende Wirkung, weshalb der effektiv wirkende Energieeintrag in die Naht geringer ist. Dadurch liegt der Energieeintrag näher am Optimum, weshalb die besseren Nahtqualitäten erreicht werden können. Es kommt also insgesamt zu einer Verschiebung des Prozessfensters.

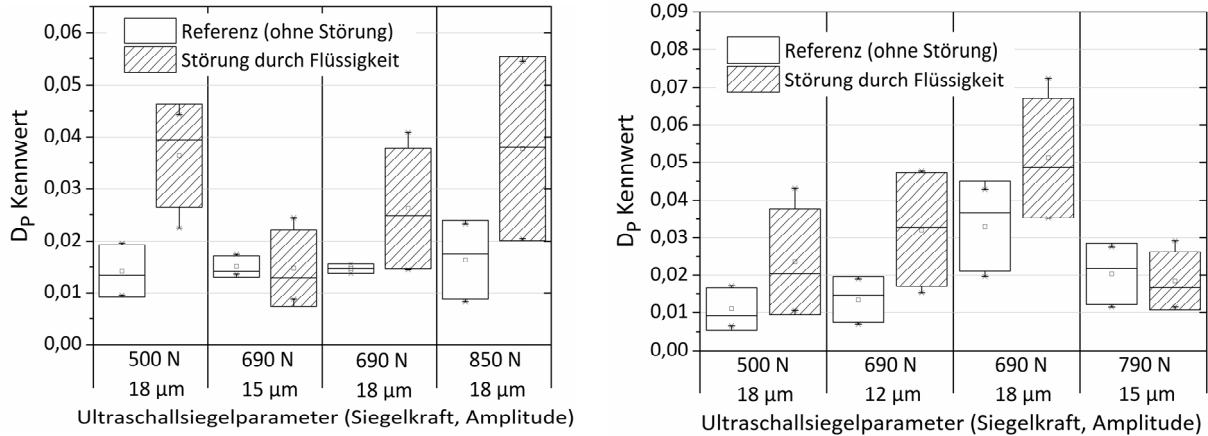


Abbildung 7-8: Einfluss der Störung durch Flüssigkeit auf die Prozessdaten anhand der Leistung bei links) AluPP und rechts) metPE

In Abbildung 7-8 sind die zugehörigen Abweichungskennwerte für die Leistung und in Abbildung 7-9 für den Weg dargestellt. Anhand der D_p -Werte beider Packmittel ist das Auftreten einer Störung bei keinem der gewählten Parameterpunkte möglich, weil die Abweichungen innerhalb der Referenzsiegelungen sich nicht eindeutig von denen der Störsiegelungen unterscheiden lassen. Anhand der D_s -Werte könnte diese Unterscheidung an einigen Parameterpunkten (AluPP @ 500 N, 18 μm und @ 850 N, 18 μm , sowie metPE @ 690 N, 18 μm) getroffen werden. Auffallend ist, dass eine deutliche Beeinflussung der Nahtfestigkeit (metPE@790 N, 15 μm) nicht zwangsläufig zu einer guten Erkennbarkeit der Störung anhand der Prozessdaten führt.

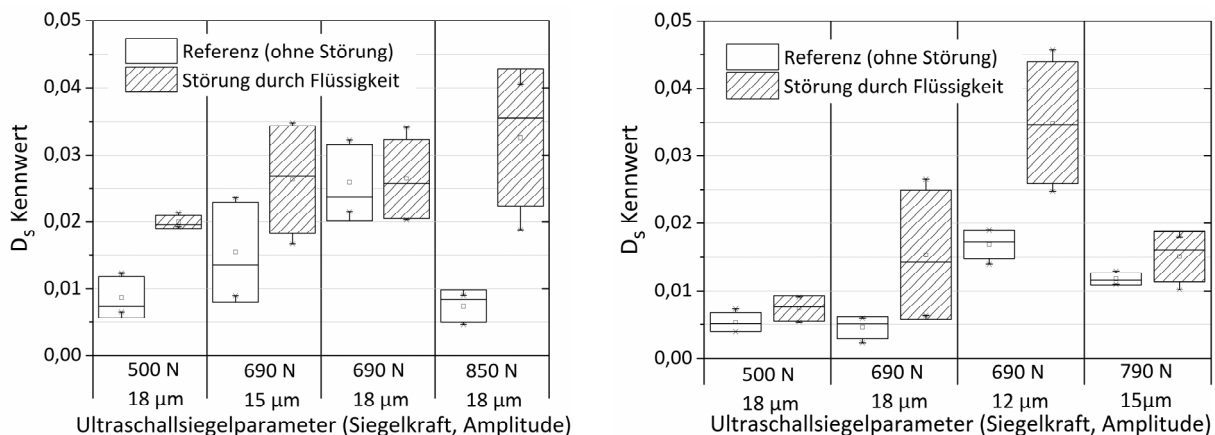


Abbildung 7-9: Einfluss der Störung durch Flüssigkeit auf die Prozessdaten anhand des Weges bei links) AluPP und rechts) metPE

7.2.1.3 Zusammenfassung exemplarisches Prüfvorgehen

Der Einfluss der thermischen Störungen und der Störungen durch Flüssigkeitsspritzer auf die gemessenen Nahtqualitäten ist insgesamt sehr gering. Thermische Störungen führten an allen untersuchten Parameterpunkten zu einer leichten Verringerung der Nahtfestigkeit, die aber immer im Bereich der Standardabweichungen liegt. Die Störung durch Flüssigkeitsspritzer führt in den meisten Fällen ebenfalls zu einer Verringerung der Nahtqualität. Eine Ausnahme sind zwei Parameterpunkte des met-PE-Verbundes, bei denen die Flüssigkeitsspritzer im Nahtbereich zu einer deutlichen Verbesserung der Nahtfestigkeit führen. Die Auswirkungen der Störungen auf die Prozessdaten sind ebenfalls sehr gering. Es ist zunächst kein Zusammenhang zwischen den beiden Abweichungskennwerten D_s und D_p erkennbar. Ein deutlicher Unterschied zwischen Referenz und Störung in einem der Kennwerte bedeutet also nicht automatisch einen entsprechenden Unterschied im anderen. Auch ein Zusammenhang zwischen den Prozessdaten-Kennwerten und dem quantitativen Einfluss der Störung auf die Nahtqualität ist nicht erkennbar. Die genannten Ergebnisse hängen weiterhin von den konkreten Siegelparametern ab, deren genauer Einfluss jedoch nicht erkennbar ist. In einigen Parameterpunkten scheinen sich die Störungen deutlicher auf die Prozessdatenunterschiede auszuwirken.

7.2.2 Feinaufgelöstes Prüfvorgehen

7.2.2.1 Störung durch pastöses Störgut

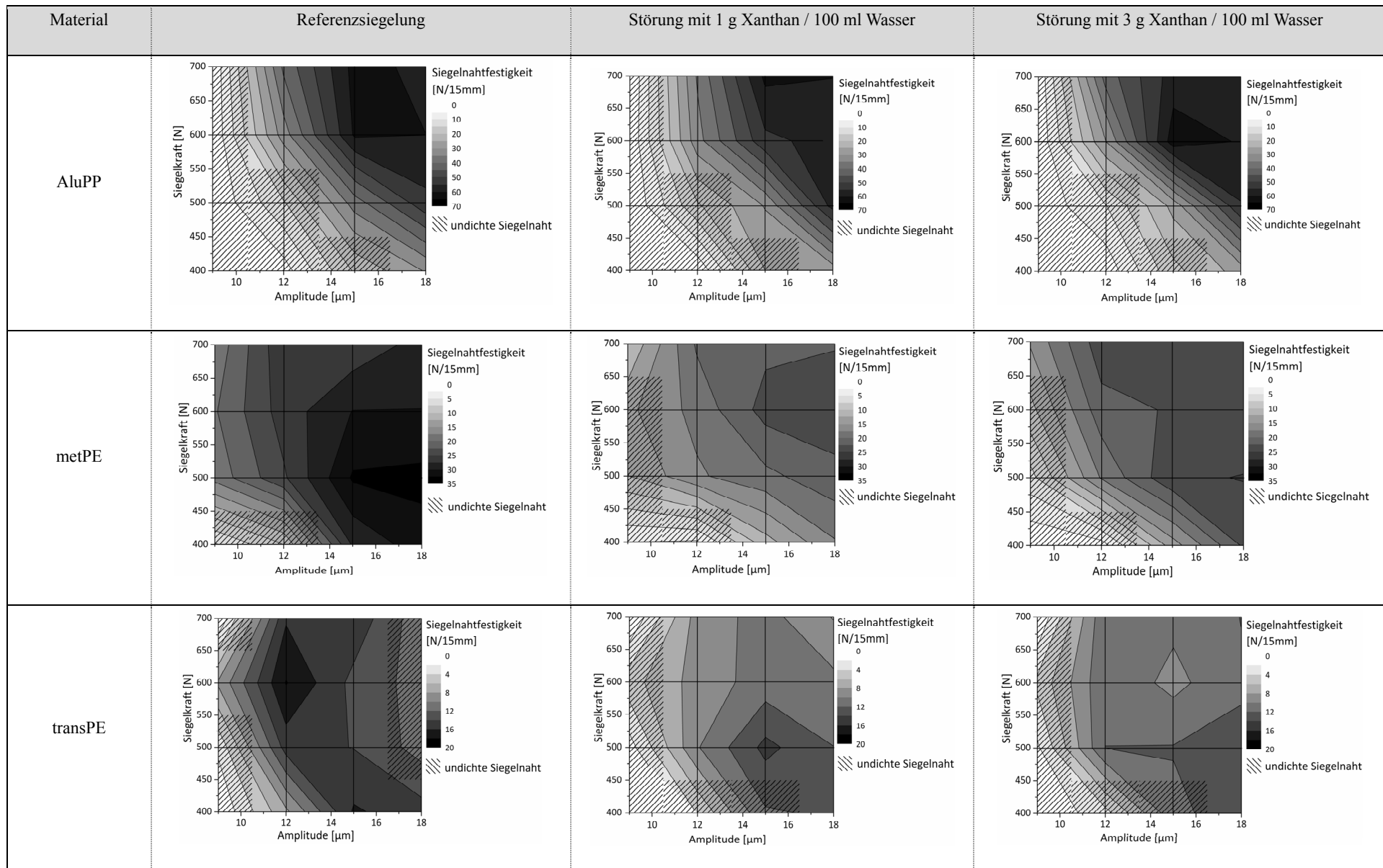
7.2.2.1.1 Einfluss der Störung auf die Nahtqualität

Bei den Messungen mit pastösem Störgut wird eine feiner aufgelöste Parametervariation vorgenommen. Die Störung wird weitestgehend automatisiert (s. Kap. 5.7.7) auf den Packstoff appliziert und zwei Xanthan-Wassergemische mit unterschiedlicher Viskosität untersucht. In Tabelle 7 ist der Einfluss des pastösen Störgutes auf die Nahtqualitäten (Festigkeit und Dichtigkeit) der drei untersuchten Packstoffe dargestellt. In der linken Spalte ist die Nahtqualität der Referenzsiegelung, also ohne Störeinfluss abgebildet. In der mittleren Spalte die Nahtqualität bei Störung mit dem niedrigviskosen Xanthan-Wassergemisch und in der rechten Spalte mit dem höher viskosen Xanthan-Wassergemisch.

AluPP

Der Einfluss von pastösem Störgut auf die Nahtqualität des AluPP-Packmittels (obere Reihe in Tabelle 7) ist äußerst gering. Lediglich in dem Parameterbereich, in welchem optimale Referenznahtfestigkeiten erreicht werden (600-700 N, 14-18 μm) kommt es zu einer minimalen Verringerung der Nahtqualität (SNF 60-70 N/15mm @Referenz vs. 55-60 N/15mm @Störung). Diese Verringerung ist zwar messtechnisch erfassbar, bewegt sich aber innerhalb der Standardabweichung dieser Werte, und ist für das Eigenschaftsprofil einer Verpackung zu vernachlässigen. Die niedrigviskose Verschmutzung scheint sich dabei geringfügig stärker auszuwirken, weil der Bereich für maximale Nahtfestigkeiten im betrachteten Parameterraum kleiner ist als bei den Messungen mit hochviskosem Xanthan. Bezüglich der Dichtigkeit der Nähte sind keine Veränderungen gegenüber den Referenzsiegelungen feststellbar.

Tabelle 7: Ergebnisse der Nahtfestigkeitsmessungen bei Störung durch pastöses Störgut (Xanthan-Wasser-Gemisch)



metPE

Der Einfluss der Störung auf die Nahtfestigkeit bei metPE (mittlere Reihe in Tabelle 7) ist deutlich zu erkennen: Das Nahtfestigkeitsniveau ist im gesamten Parameterraum geringer, und die maximalen Siegelnahtfestigkeiten von 30 N/15mm der Referenzsiegelung werden an keinem Punkt erreicht. Beim Xanthan mit niedriger Viskosität kommt es durch die Störung zu einer Verschiebung des Optimums von 500 N, 18 μm hin zu 600 N, 18 μm , auf niedrigerem Niveau. Das Xanthan mit höherer Viskosität sorgt für ein Abflachen und Einebnen des Nahtfestigkeitsniveaus im gesamten Bereich von 400 N, 18 μm bis 700 N, 12 μm . Das niedrigviskose Xanthan wirkt sich negativer aus, weil in einem deutlich kleineren Bereich Werte von größer 20 N/15mm erreicht werden, als beim hochviskosen Xanthan-Wassergemisch. Der Bereich undichter Siegelnähte vergrößert sich, ist aber unabhängig von der Xanthanmischung und tritt nur in einem Randbereich des Prozessfensters auf (sehr niedrige Amplituden). Für den realen Verpackungsprozess ist die beschriebene Verringerung der Nahtqualität deutlich messbar, aber noch nicht gravierend. Vorausgesetzt das Packmittel würde im Bereich optimaler Siegelparameter verarbeitet (ca. 500 N, 18 μm), würde die Nahtqualität bei einer auftretenden Störung in einem noch vertretbaren Rahmen verringert (keine Undichtigkeit und Nahtfestigkeiten > 15 N/15mm).

transPE

Der Einfluss der pastösen Störung auf die Nahtqualität des transPE-Packmittels ist deutlich zu erkennen (untere Reihe in Tabelle 7). Die Nahtfestigkeiten sind im überwiegenden Teil des untersuchten Parameterraums geringer als die der Referenzsiegelung, und das Nahtfestigkeitsniveau des Referenzoptimums (>18 N/15mm) wird nicht mehr erreicht. Im Bereich des Optimums (600 N, 12 μm) verringern sich die Nahtfestigkeiten auf bis zu 50 % des Referenzwertes und können dazu führen, dass eine Verpackung nicht mehr ihre Anforderungen erfüllen kann. Die dort erreichte Nahtfestigkeit von 10 N/15mm bei niedrigviskosem Xanthan, kann für bestimmte Anwendungen kritisch werden. Es kommt durch die pastöse Störung beim transPE zu einer Verschiebung des Bereichs maximaler Nahtfestigkeit in Richtung niedrigerer Kräfte und höherer Amplituden, was insbesondere beim niedrigviskosem Xanthan-Wassergemisch deutlich erkennbar ist (Verschiebung von 600 N, 12 μm hin zu 500 N, 15 μm). Aber auch beim Xanthan höherer Viskosität werden die höchsten Stör-Nahtfestigkeiten bei niedrigeren Kräften und höheren Amplituden erreicht. Das niedrigviskose Xanthan wirkt sich auf die Nahtfestigkeiten geringfügig schlechter aus, weil insgesamt etwas geringere Festigkeiten erreicht werden. Die pastösen Störungen führen zu Undichtigkeiten der Siegelnähte in Bereichen niedrigen Energieeintrags (geringe Amplituden und geringen Kräfte). Bei diesem Packmittel sind außerdem undichte Referenznähte bei sehr hohem Energieeintrag zu beobachten (500-700 N, 18 μm), wohingegen bei den Siegelungen mit pastösem Störeinfluss die entsprechenden Nähte dicht sind. An diesen Punkten kommt es bei der Referenzsiegelung vermutlich zu einer Zerstörung der Packmittelstruktur infolge des zu hohen Energieeintrags. Durch die kühlende Wirkung der pastösen Störung wird der auf die Naht wirkende zu hohe Energieeintrag herabgesetzt. Dadurch wird eine Zerstörung der Nähte vermieden und die Nähte sind dicht.

7.2.2.1.2 Einfluss der Störung auf die Prozessdaten

Für die Bewertung des Einflusses der pastösen Störung auf die Prozessdaten werden entsprechend Gleichung (9) (s. Kap. 5.6.2) die Werte ΔD_p und ΔD_s im untersuchten Parameterraum in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt.

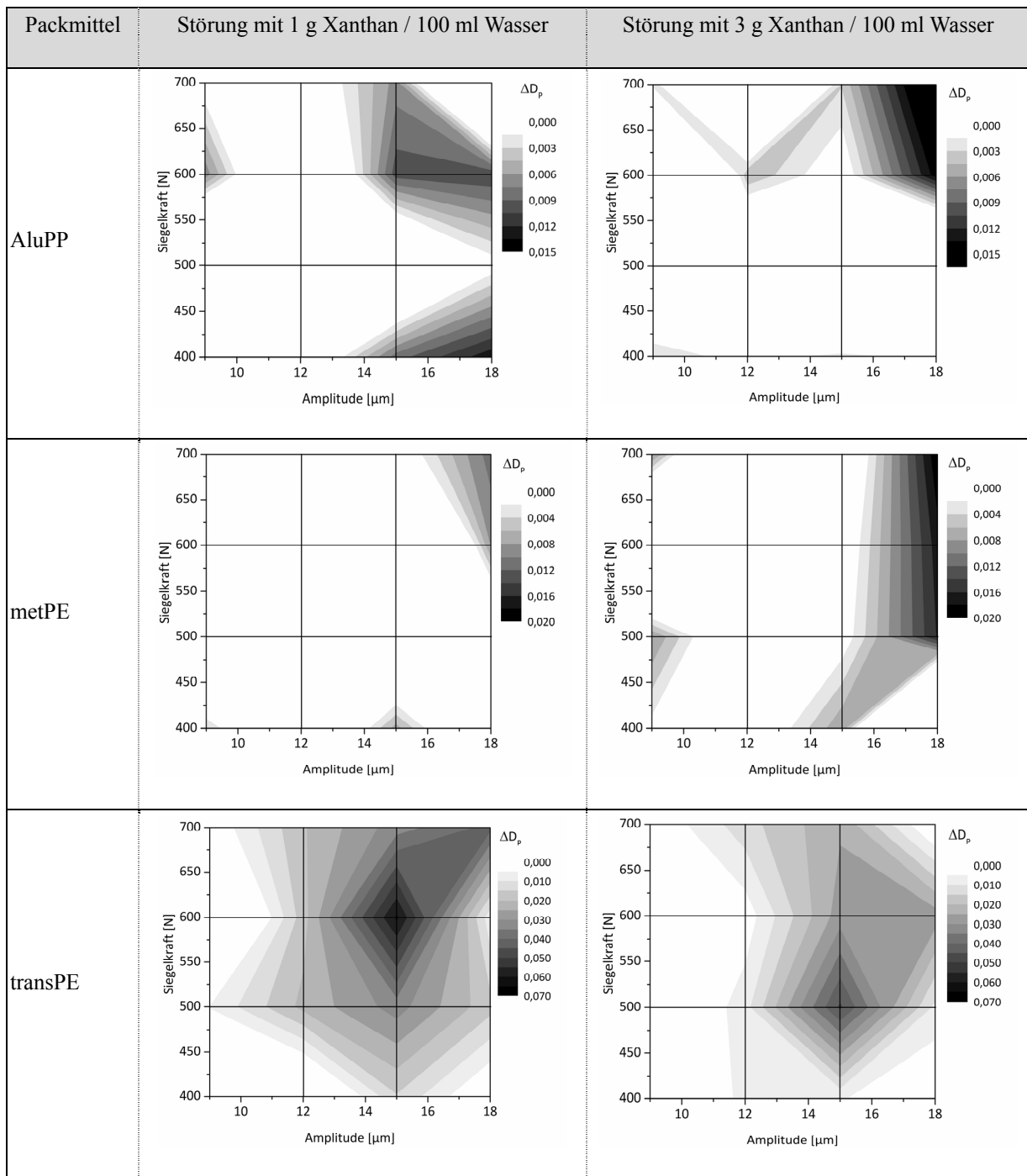
AluPP

Die Störerkennbarkeit anhand der Werte ΔD_p für AluPP ist in der oberen Reihe in Tabelle 8 abgebildet. Der Parameterbereich in dem sich eine Störung eindeutig detektieren lässt ist relativ klein (ca. 550-700 N, 14-18 μm), liegt aber in dem Bereich, in dem die höchsten Referenznahtfestigkeiten erreicht werden (Optimum). Die Werte für ΔD_p unterscheiden sich in Abhängigkeit der Xanthankonzentration und korrelieren mit dem Einfluss der Störung auf die Nahtfestigkeit an jeweils einem Punkt: Der Einfluss des hochviskosen Xanthan auf die Nahtfestigkeit ist bei 700 N, 18 μm höher, und auch der Wert ΔD_p ist an diesem Punkt größer. Dies gilt entsprechend für niedrigviskoses Xanthan bei 400 N, 18 μm . Die Störerkennbarkeit in den Wegdaten anhand der Werte ΔD_s ist in der oberen Reihe in Tabelle 9 abgebildet, worin zu erkennen ist, dass beim niedrigviskosen Xanthan-Gemisch die Erkennbarkeit in dem Parameterbereich zwischen 600 N, 15 μm und 700 N, 12 μm gegeben ist. Beim hochviskosen Xanthan ist dies jedoch in keinem Parameterpunkt möglich. Insgesamt ist die Erkennbarkeit einer Störung durch pastöses Störgut beim AluPP sehr gering, aber auch die Störauswirkungen auf die Nahtqualität sind zu vernachlässigen.

metPE

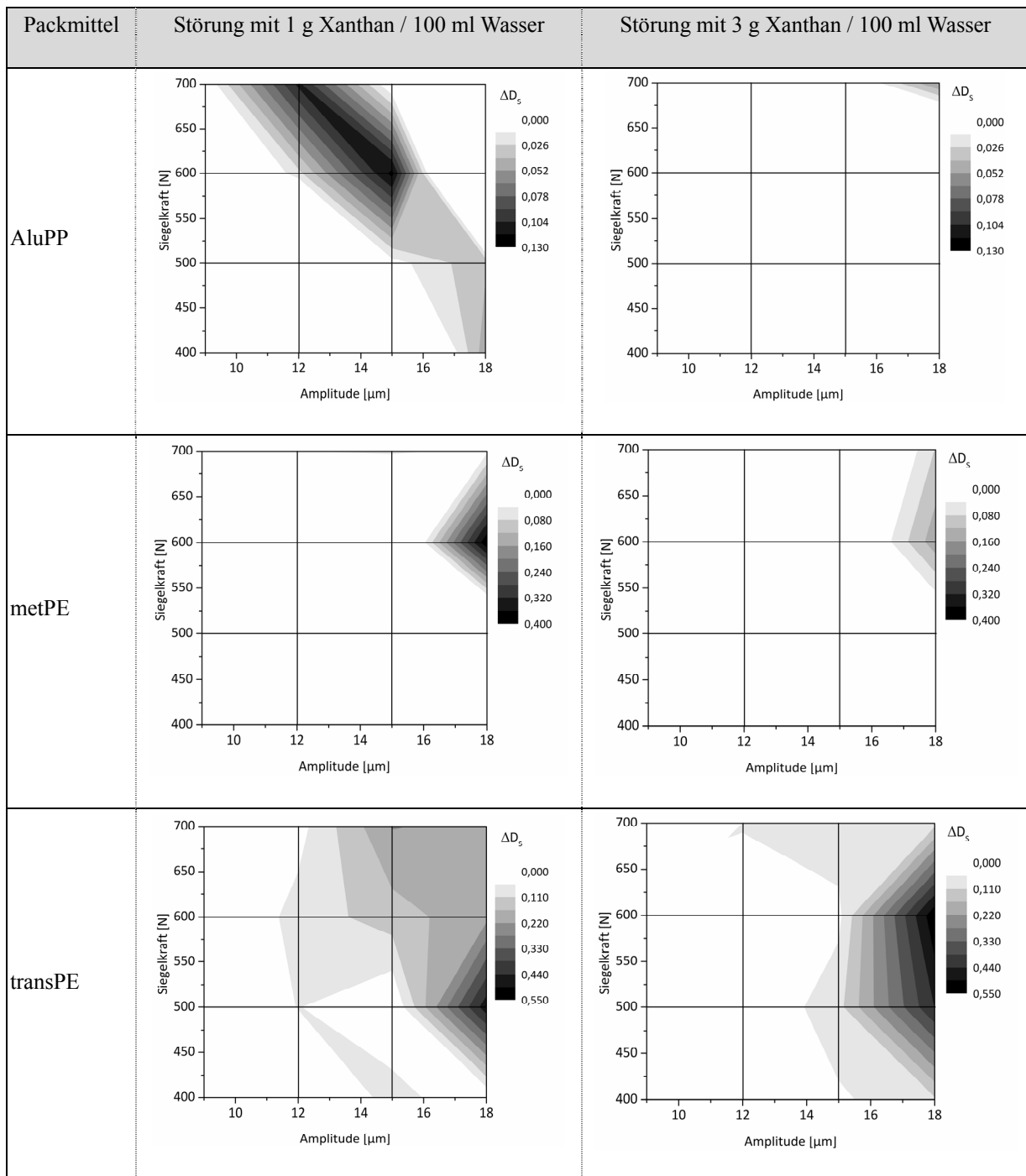
Die Werte für ΔD_p des metPE-Packmittels sind in der mittleren Reihe in Tabelle 8 dargestellt. Eine Erkennbarkeit von Störungen anhand der Prozessdaten ist bei Xanthan niedriger Viskosität nicht möglich, nur bei 700 N und 18 μm wäre eine Identifikation der Störung gegeben. Dieser Parameterpunkt liegt jedoch außerhalb des verarbeitungsrelevanten Parameterraumes (Optimum: 500 N, 18 μm) dieses Packmittels. Demgegenüber kann für das höherviskose Xanthan-Wasser-Gemisch eine Erkennbarkeit von Störungen in einem größeren Bereich festgestellt werden (500-700 N, 16 - 18 μm). Die Werte ΔD_s sind in der mittleren Reihe in Tabelle 9 abgebildet, worin zu erkennen ist, dass eine Störerkennbarkeit unabhängig von der Xanthan-Konzentration nur im Punkt 600 N, 18 μm möglich ist. Beim metPE gibt es bei ΔD_p und ΔD_s tendenziell eine bessere Erkennbarkeit bei höheren Amplituden. Ein direkter Zusammenhang zwischen Ausmaß des Nahtqualitätsverlustes und Größe der Prozessdatenabweichung scheint jedoch nicht zu bestehen. Insgesamt ist der Einfluss der pastösen Störung auf die Nahtqualität deutlich, aber nicht gravierend. Der Einfluss auf die Prozessdaten ist hingegen verschwindend gering.

Tabelle 8: Prozessdatenunterschiede der Leistung bei Störung mit pastösem Produkt¹³



¹³ Hinweis: Die Skalierung der Diagramme in Tabelle 8 und Tabelle 9 wurde packstoffabhängig vorgenommen und unterscheidet sich insbesondere bei transPE deutlich von den anderen beiden Packmitteln.

Tabelle 9: Prozessdatenunterschiede des Wegs bei Störung mit pastösem Produkt



transPE

Der Einfluss der pastösen Störung auf die Leistungsdaten bei transPE ist in der unteren Reihe in Tabelle 8 dargestellt. Demnach lassen sich die Störungen anhand ΔD_P fast im gesamten Parameterbereich gut identifizieren, also von den Schwankungen innerhalb der Referenzprozessdaten deutlich unterscheiden. Lediglich im Bereich von 400 - 700 N und 9 - 11 μm unterscheiden sich Referenz- und Störsiegelungsprozessdaten nicht eindeutig.

Hervorzuheben ist hier die gute Erkennbarkeit von Störungen im verarbeitungsrelevanten Bereich (Optimum bei 11-15 μm , alle Kräfte). Beim Xanthan niedriger Viskosität ist die Erkennbarkeit etwas deutlicher (höhere Werte ΔD_p), sowie in einem größeren Parameterbereich möglich. Je nach Xanthankonzentration gibt es ein um 100 N verschobenes Optimum in der Erkennbarkeit (niedrigviskos bei 600 N, 15 μm vs. hochviskos bei 500 N, 15 μm). Der Einfluss der Störung anhand der Werte ΔD_s ist in der unteren Reihe in Tabelle 9 abgebildet. Demnach lassen sich Störungen beim niedrigviskosen Xanthan von 500-700 N zwischen 12 und 18 μm detektieren. Die Störungen mit höherviskosem Xanthan-Gemisch sind hingegen bei allen Kräften und Amplituden zwischen 15-18 μm erkennbar. Die Erkennbarkeit der Störung in den Prozessdaten und die Auswirkung auf die Nahtqualität scheinen beim transPE zu korrelieren: beim niedrigviskosen Xanthan sind sowohl die Prozessdatenunterschiede, als auch die Nahtqualitätseinbußen etwas höher. Der Parameterraum, in dem die Prozessdatenunterschiede deutlich erkennbar sind, stimmt für beide Xanthan-Konzentrationen mit dem Bereich überein, in welchem auch die Nahtqualität negativ beeinflusst wird.

7.2.2.1.3 Zusammenfassung der Störung durch pastöses Störgut

Die Störung des Nahtbildungsvorgangs durch pastöses Störgut ist anhand der gemessenen Nahtqualitäten messbar. Generell führt eine pastöse Störung zu einer Beeinträchtigung der Nahtqualität, die Größenordnung und Relevanz der Beeinflussung ist aber sehr stark vom Packmittel und den Siegelparametern abhängig. Auch die Erkennbarkeit von pastösen Störungen anhand der Prozessdaten ist von den Störguteigenschaften, vom Packmittel und den Siegelparametern abhängig. Die Prozessdatenbeeinflussung unterscheidet sich jeweils für Weg und Leistung. Durch gleichzeitige Betrachtung von Weg- und Leistungsverlauf wird daher die Störerkennbarkeit in einem größeren Parameterbereich ermöglicht.

Das Packmittel transPE, bei dem sich die Störung am stärksten auswirkt, hat gleichzeitig auch die deutlichste Beeinflussung der Prozessdaten, aber nicht in allen Punkten des untersuchten Parameterraums. Vor allem bei transPE und metPE hängen die verursachten Prozessdatenunterschiede scheinbar mit der ermittelten maximalen Fügegeschwindigkeit zusammen. Mit steigender Fügegeschwindigkeit werden die Abweichungen in den Prozessdaten größer, was in Abbildung 7-10 dargestellt ist.

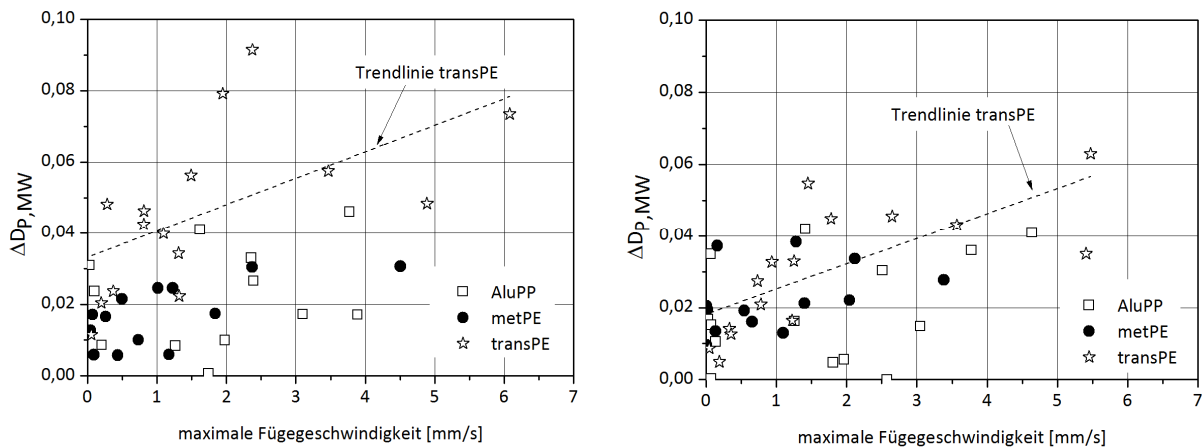


Abbildung 7-10: Zusammenhang zwischen Abweichungskennwert der Leistung und Fügegeschwindigkeit (links) niedrigviskoses und rechts) hochviskoses Xanthan-Wasser-Gemisch

Die Ursache dafür liegt vermutlich in der schnelleren Verdrängung der Polymerschmelze im Randbereich der Naht. An dieser Stelle kommt das heiße Polymer aus der Nahtmitte mit dem kühlenden Störgut in Kontakt. Bei schneller Fügegeschwindigkeit wird das Polymer aus dem Zentrum der Naht innerhalb kürzerer Zeit zum Nahtrand gequetscht. Dadurch ist der Nahtrand dann heißer als bei langsamer Prozessführung. Bei langsamer Prozessführung ist das Material am äußersten Nahtrand vermutlich schon bis unterhalb der Schmelztemperatur abgekühlt. Der Kontakt mit dem Störgut im Nahtrandbereich wirkt sich aber nur dann prozessbeeinflussend aus, wenn die stattfindende Kühlwirkung auch einen großen Einfluss auf die Polymereigenschaften hat, z.B. einen Phasenübergang bewirkt. Dies tritt bei schneller Prozessführung und heißem Nahtrand eher auf, als bei einem gemächlich ablaufenden Fügevorgang mit bereits erstarrtem Nahtrand. Dieser Effekt wird zusätzlich verstärkt, je größer die latente Schmelzwärme (Fläche unter Schmelzpeak) des Materials ist, weil dieses Material generell schlechter abkühlt, also tendenziell eine höhere Nahtrandtemperatur hat (vor allem transPE, aber auch metPE).

Die Viskosität der Störung hat einen geringen aber messbaren Einfluss: bei niedrigerer Viskosität der Modellsubstanz steigt der Einfluss auf den Fügevorgang, was an dem höheren Niveau der Werte ΔD_p (Trendlinie in Abbildung 7-10) erkennbar ist. Die Ursache dafür sind vermutlich die senkrecht stehenden Beutel, bzw. Packstoffflächen. Das niedrigviskose Störgut hat besseren Kontakt zur Naht, bzw. dem Nahtrandbereich, weil es leichter fließt. Beide Störgutkonzentrationen werden aufgrund der Siegelkraft vor der eigentlichen Siegelung und infolge des Schalldrucks ähnlich gut verdrängt. Eine höhere Viskosität verhindert aber das Zurückfließen zur Naht, wodurch es sich weniger stark auswirkt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen den einzelnen Nahtqualitätseinbußen der Versuche und der Größe der jeweiligen Abweichungen in den Prozessdaten ist hingegen nicht festzustellen (Abbildung 7-11).

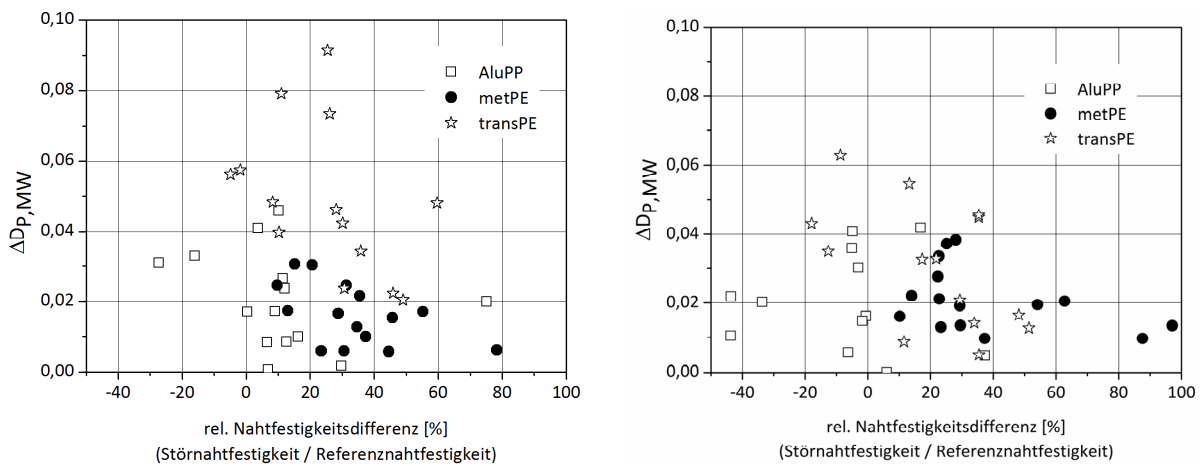


Abbildung 7-11: Abweichungskennwert der Leistung und relativer Nahtfestigkeitsdifferenz links) niedrigviskoses und rechts) hochviskoses Xanthan-Wasser-Gemisch

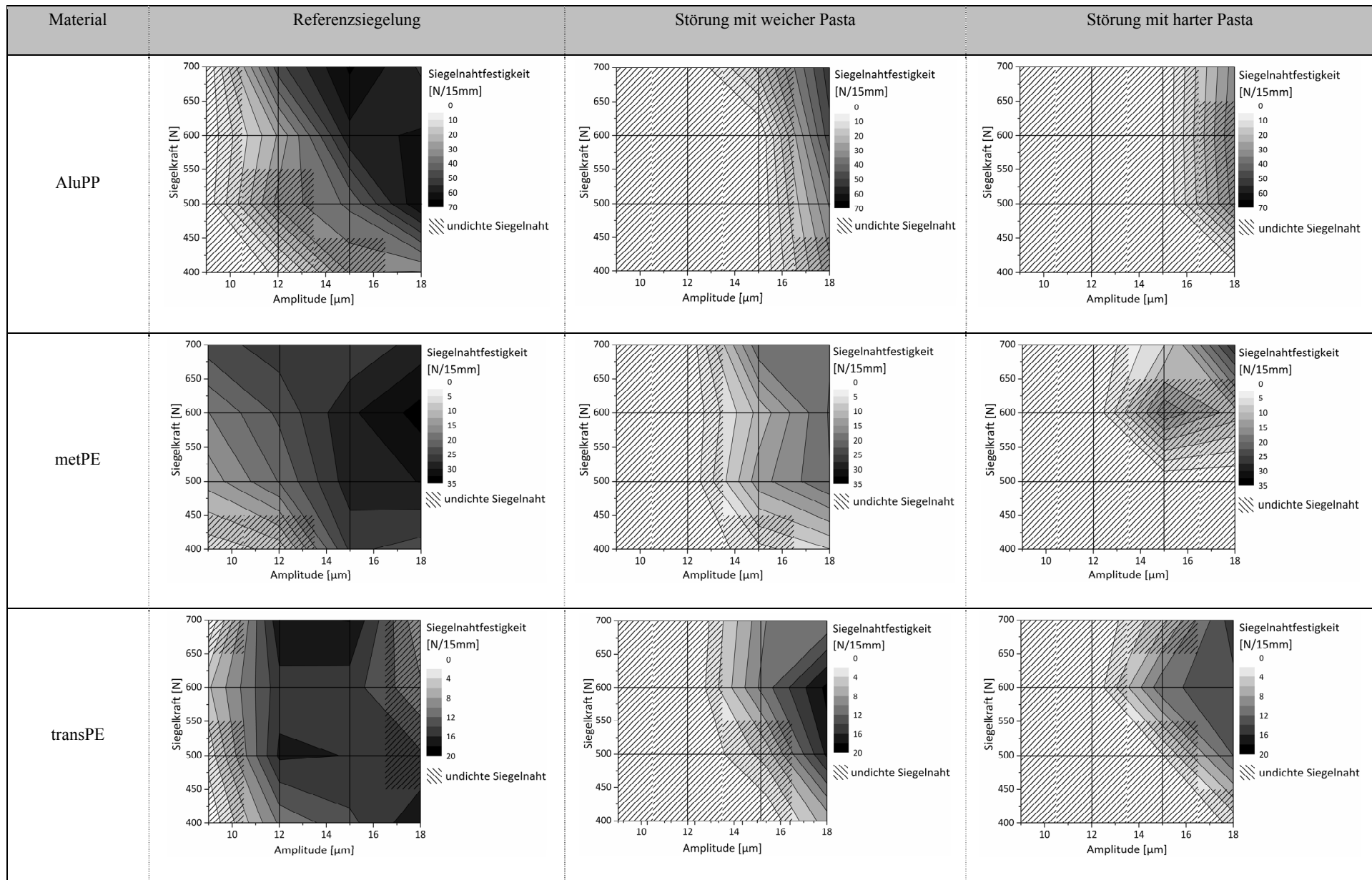
Das kann vor allem damit erklärt werden, dass die Festigkeit einer Siegelnaht durch den Schmelzefluss und morphologische Unterschiede in der Gefügeausbildung beim Abkühlen der teilkristallinen Thermoplaste beeinflusst wird [Bac14]. Der Abkühlvorgang einer Naht erfolgt aber nach dem eigentlichen Siegelvorgang, mit dem die Prozessdaten zusammenhängen. Es können in den Prozessdaten daher nur Einflüsse bis zum Ende der Ultraschallschwingung betrachtet werden. Die Prozessdaten beschreiben demzufolge nur einen Teil des eigentlichen Nahtbildungsvorgangs. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von KUHLMANN zum Ultraschallschweißen überein [Kuh06]. Das bedeutet weiter, dass Störungen auf den Siegelvorgang nur dann in den Prozessdaten erkannt werden können, wenn sie so gravierend sind, dass sie sich während der Ultraschallschwingung, also während des Aufschmelzvorgangs der festen Kunststoffe und bis zum Fließen des geschmolzenen Polymermaterials auswirken.

7.2.2.2 Störung durch stückiges Störgut

7.2.2.2.1 Einfluss der Störung auf die Nahtqualität

Die Störbeeinflussung des Siegelvorgangs durch stückiges Störgut wird anhand von wasserhaltigen Pastastreifen im Nahtbereich untersucht. Die Festigkeit der Pastastücke wird durch zwei verschiedene Wassergehalte variiert. Die ermittelten Auswirkungen von stückigen Störgütern auf die Nahtqualität sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Nahtfestigkeitsmessungen bei Störung durch stückiges Störgut (gequollene Pastastreifen)



AluPP

Der Einfluss auf die Nahtqualität bei AluPP ist in der oberen Reihe in Tabelle 10 abgebildet. Demnach haben die eingebrachten stückigen Störungen im Nahtbereich einen erheblichen Einfluss auf die Nahtqualität einer Siegelnaht. Lediglich bei hohen Amplituden (18 μm) und im Bereich großer Kräfte (500-700 N) kommt es überhaupt zur Nahtbildung, jedoch mit halb so hohen Festigkeiten (30 N/15mm), als bei der Referenzsiegelung (65 N/15mm). Bei der Siegelung durch weiches stückiges Störgut kommt es an mehr Parametersets zu einer Nahtbildung. Also hat die Festigkeit der Störgüter einen Einfluss. In den Bereichen des untersuchten Parameterraums, in dem keine Nahtbildung stattfindet, sind die untersuchten Packungen entsprechend undicht. Analog zu den Festigkeitswerten treten dichte Siegelnähte nur bei hohen Amplituden und großen Kräften auf.

metPE

In der mittleren Reihe in Tabelle 10 ist die Auswirkung der Störung mit stückigem Störgut auf die Nahtqualität des metPE-Packmittels dargestellt. Beim metPE-Packmittel ist ebenfalls eine gravierende Beeinträchtigung der Nahtqualität durch stückige Störung zu beobachten, wobei diese geringer ist als bei AluPP. Die Nahtbildung erfolgt nur bei hohen Kräften und großen Amplituden, unterscheidet sich aber deutlich je nach Festigkeit der stückigen Störung. Bei Störung mit weicher Pasta können in einem breiteren Parameterraum Nähte hergestellt werden (450 - 700 N und 14 - 18 μm), als bei fester Pasta (650 - 700 N und 14 - 18 μm). Jedoch sind die erreichbaren Nahtfestigkeiten in beiden Fällen deutlich geringer (ca. 20 N/15mm) als die der Referenzsiegelung (>30 N/15mm). Die Dichtigkeitseigenschaften der Nähte korrelieren mit den beschriebenen Ergebnissen zur Nahtfestigkeit, bei der weichen Pasta lassen sich in einem breiteren Parameterbereich dichte Nähte erzeugen.

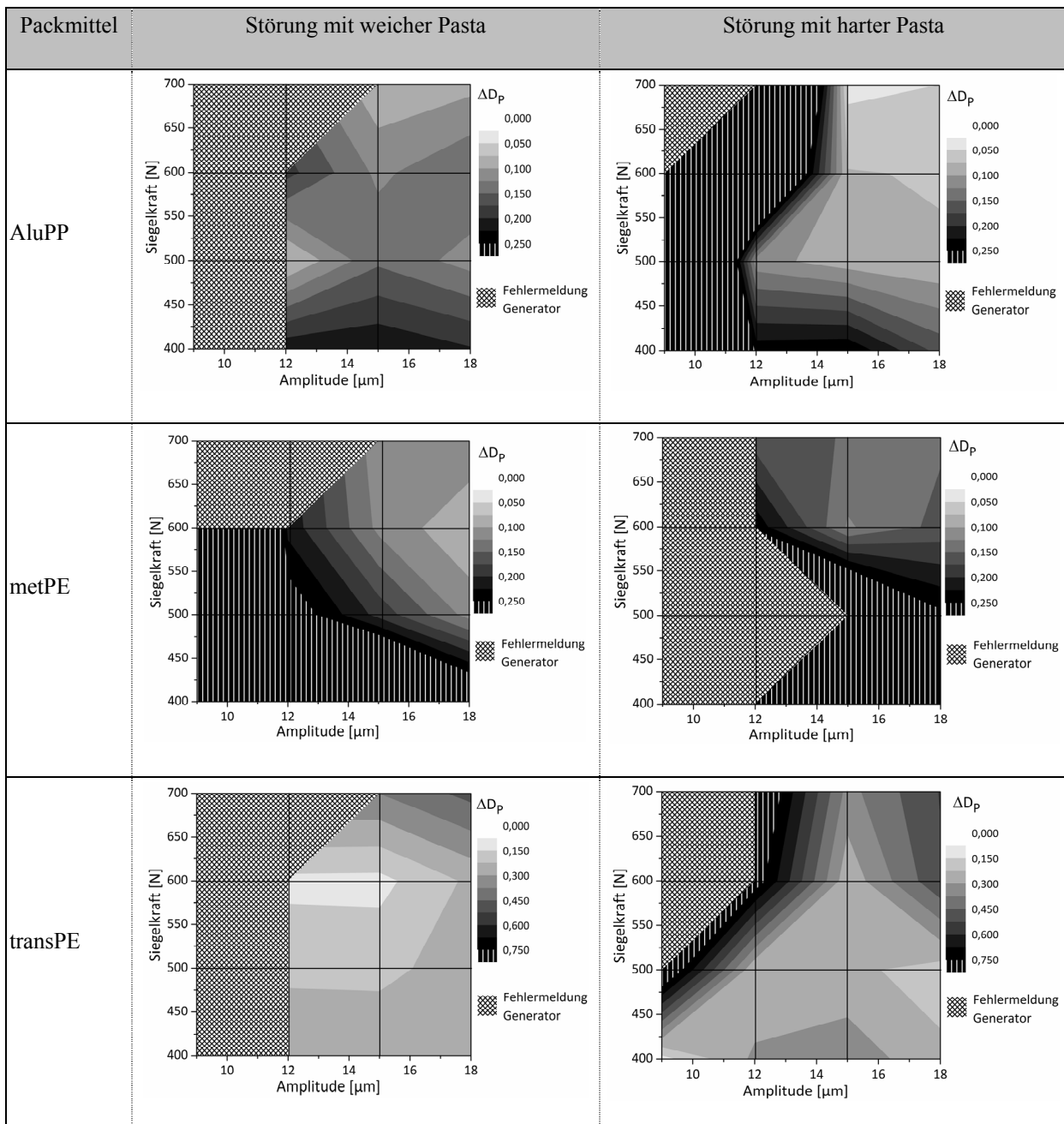
transPE

In der unteren Reihe in Tabelle 10 ist der Einfluss der Modell-Störung mit Pasta beim transPE-Packmittel dargestellt. Die Nahtqualität wird auch beim transPE-Packmittel deutlich negativ beeinträchtigt. Der Parameterbereich in dem trotz der Störung Siegelnähte hergestellt werden können, ist für beide Festigkeiten der Pasta ähnlich (500-700 N und 16-18 μm). Bei der Störung mit weicher Pasta lassen sich Nähte tendenziell auch bei niedrigeren Amplituden herstellen und es werden insgesamt etwas höhere Nahtfestigkeiten erreicht, die dabei sogar das Nahtfestigkeitsniveau des Referenzoptimums (>16 N/15mm) erreichen. Auch werden bei weicher Pasta dichte Siegelnähte in einem größeren Parameterbereich erzielt. Anzumerken bleibt, dass die Parameterbereiche optimaler Nahteigenschaften der Referenzsiegelung (500-700 N, 12 μm) nicht identisch mit den Parameterbereichen sind, bei denen im Störfall gute Nahtqualitäten erreicht werden können. Ebenso würde die Wahl von geeigneten Parametern, mit denen Störungen kompensiert werden könnten (hohe Siegelkräfte und Amplituden), zu undichten Siegelnähten der Referenz führen. Es wäre zwar möglich, trotz stückigen Störeinflusses anforderungskonforme Nähte herzustellen, jedoch müssten dafür die Siegelparameter verändert werden.

7.2.2.2 Einfluss der Störung mit stückigem Störgut auf die Prozessdaten

Der Einfluss des stückigen Störguts auf die Prozessdaten, anhand der mit Gleichung (9) (s. Kap. 5.6.2) berechneten Werte ΔD_p , ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Prozessdatenunterschiede bei Störung mit stückigem Produkt (gequollene Pastastreifen)¹⁴



¹⁴ Hinweis: Die Skalierung der Diagramme wurde packstoffabhängig vorgenommen und unterscheidet sich bei transPE deutlich von den anderen beiden Packmitteln.

AluPP

In der oberen Reihe in Tabelle 11 sind die Werte ΔD_P für das AluPP-Packmittel abgebildet. Bei den Parameterpunkten, bei welchen durch die Störung keine Nahtbildung stattfindet (vgl. dazu Tabelle 10), kommt es häufig zu einer Fehlermeldung des Ultraschallgenerators (schraffierter Bereich in Tabelle 11), weil das Schwinggebilde seine Sollamplitude nicht erreicht und die Siegelung abgebrochen wird. Diese Fehlermeldung ist ein eindeutiges Signal im Sinne der Störungserkennung, weil der Einfluss auf den Fügeprozess so dramatisch ist, dass es zu einem Generatorfehler kommt. Die Erkennbarkeit der stückigen Störung auf die Prozessdaten ist somit an jedem Parameterpunkt eindeutig möglich. Es ist die Tendenz zu erkennen, dass die Prozessdatenunterschiede bei höheren Siegelkräften und Amplituden geringer werden. Das liegt daran, dass in diesem Bereich auch eher eine Nahtbildung stattfindet, wodurch die Datenverläufe den Referenzverläufen ähnlicher sind, als die Verläufe, bei denen gar keine Nahtbildung stattfindet.

metPE

In der mittleren Reihe in Tabelle 11 sind die Werte ΔD_P des metPE-Packmittels dargestellt. Eine Erkennbarkeit der Störung im Sinne deutlicher Prozessdatenunterschiede ist für beide Festigkeiten der stückigen Störgüter in jedem Punkt des untersuchten Parameterraums möglich. Beim Störgut mit höherer Festigkeit kommt es in einem größeren Bereich zu Fehlermeldungen des Generators, und mit steigender Siegelkraft und Amplitude werden die Werte ΔD_P tendenziell kleiner. Bei der Störung mit weicher Pasta kommt es im Bereich hoher Kräfte zu kleineren Prozessdatenunterschieden, die mit der höheren Nahtqualität in diesem Bereich (siehe mittlere Reihe in Tabelle 10) korrelieren, weil durch die stattfindende Nahtbildung, die entsprechenden Prozessdatenverläufe ähnlicher sind, als ohne Nahtbildung.

transPE

In der unteren Reihe in Tabelle 11 sind die Werte ΔD_P für das transPE-Packmittel dargestellt. Analog zu den Ergebnissen der vorherigen beiden Packmittel sind die Störungen durch stückiges Störgut in jedem Punkt des untersuchten Parameterraums anhand der Prozessdatenunterschiede eindeutig erkennbar. Bei der weichen Pasta kommt es in einem größeren Bereich des untersuchten Parameterraums zu Siegel Fehlern, bei der harten Pasta treten höhere Werte ΔD_P auf. Beim Vergleich der Ergebnisse mit der Nahtqualität (siehe untere Reihe in Tabelle 10) ist vor allem bei der festen Pasta die Tendenz erkennbar, dass in den Bereichen mit Nahtbildung, bzw. höherer Nahtqualität, etwas kleinere Werte ΔD_P auftreten.

Auf eine detaillierte Auswertung der Prozessdatenunterschiede anhand von ΔD_S wird bei den Störungen mit stückigem Störgut verzichtet, weil sich die Wegdaten an jedem einzelnen Parameterpunkt des Prozessfensters sehr deutlich unterscheiden. Das zeigt Abbildung 7-12, in der die Wegverläufe von Referenzsiegelung und Siegelung durch stückiges Störgut am Beispiel von transPE dargestellt sind. Das Packmittel transPE ist das Material mit der geringsten Biegesteifigkeit, weil es erstens am dünnsten ist, zweitens gegenüber AluPP kein Aluminium enthält und drittens nur halb so viel steiferes PET als im metPE enthalten ist. Die sehr dünne EVOH-Schicht hat dabei keinen nennenswerten Einfluss, weil deren E-Modul zwischen dem von PE und dem des PET liegt.

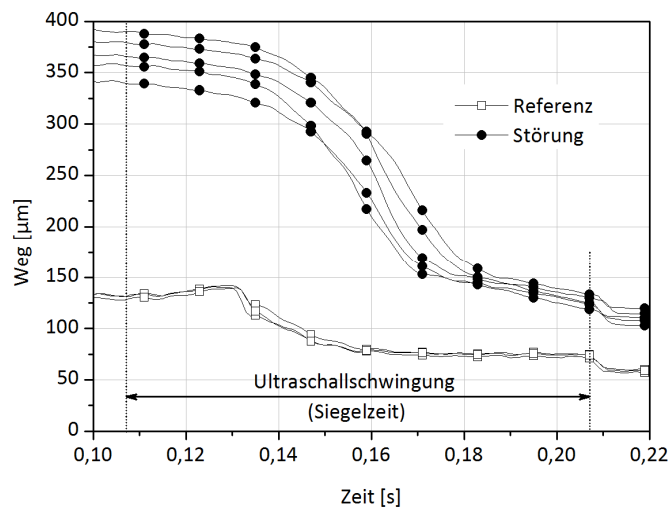


Abbildung 7-12: Wegverlauf bei einer Störung mit stückigem Produkt am Beispiel von transPE, weicher Pasta, 700 N und 18 µm

In Abbildung 7-12 ist also das Packmittel mit der geringsten Biegesteifigkeit (transPE), bei der größten Siegelkraft (700 N) und der Pasta mit geringster Festigkeit dargestellt, daher ist mit einer maximal möglichen Verdrängung des stückigen Störgutes vor der Siegelung zu rechnen. Während die Referenzsiegelungen in Abbildung 7-12 unmittelbar vor der Siegelung ein Wegniveau von ca. 130 µm aufweisen, erfolgt die Verdrängung des stückigen Störgutes nur bis zu einem Werkzeugabstand von minimal 330 µm. Bei jeder anderen Versuchskonfiguration im untersuchten Parameterraum ist deshalb davon auszugehen, dass tendenziell weniger Verdrängung, also noch größere Wegniveaus erreicht werden. D.h. auch anhand von ΔD_s oder einem punktuellen Erfassen des Wegsignals vor der Siegelung lässt sich eine Störung mit stückigem Störgut eindeutig identifizieren.

7.2.2.2.3 Zusammenfassung der Störung mit stückigem Störgut

Die Störung der Nahtqualität durch stückiges Störgut im Nahtbereich ist sehr deutlich messbar und führt in weiten Teilen des untersuchten Parameterraums zu Siegelnähten mit stark verminderten Nahteigenschaften. Wie groß die negative Beeinflussung ist, hängt dabei sehr stark vom Packmittel und den Siegelparametern ab. Unabhängig vom jeweiligen Prozessfenster der Packmittel sind hohe Kräfte und hohe Amplituden bei diesem Störeinfluss erforderlich, um überhaupt eine Nahtbildung zu erreichen. Die hohen Kräfte und hohen Schwingweiten führen zu einer besseren Verdrängung der Störung (s. Kap. 2.5.3). Mit steigender Festigkeit der stückigen Störung wirken sich diese negativer auf die Nahtqualität aus, weil sich die Störung weniger leicht durch das Werkzeug verdrängen lässt. Die Störungen lassen sich in jedem Punkt des Prozessfensters und für alle Packmittel deutlich anhand der Prozessdaten erkennen. Beim Vergleich von $\Delta D_{p,pastös}$ und $\Delta D_{p,stückig}$ wird deutlich, dass sich die beiden Werte teilweise um eine Größenordnung unterscheiden. Die Bereiche geringerer Prozessdatenunterschiede der Pasta sind deshalb immer noch deutlich größer als die Unterschiede, welche durch pastöses Störgut verursacht werden. Eine Detektion dieser Störeinflüsse wäre sogar durch einfache Kennwertüberwachung vor Beginn der Siegelung möglich: Anhand des Wegsignals sind diese deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 7-12).

Weil sich die Störungen mit stückigem Störgut bei jedem Packstoff und bei jeder Parametereinstellung eindeutig erkennen lassen, kann geschlussfolgert werden, dass sie den Siegelvorgang so gravierend beeinflussen, dass sie sich auf den Teil des Nahtbildungsvorgangs während der Schwingung des Ultraschallwerkzeuges auswirken. Durch sie wird also der Teil von der festen Phase über die Energiewandlung bis zum Schmelzefluss beeinflusst. Dies ist auch aus Abbildung 7-12 ersichtlich, in der beispielhaft die maximal mögliche Verdrängung vor der Siegelung dargestellt ist. Die speziellen Verdrängungsmechanismen des Ultraschallsiegeln können die hier untersuchten stückigen Störungen vor der Siegelung nicht vollständig aus der Naht verdrängen. Dadurch befindet sich die stückige Störung noch zwischen den Folien, wandelt selbst Energie und führt zu einer unvollständigen Siegelung. Das ist in Abbildung 7-12 daran zu erkennen, dass bei der Siegelung mit Störung die Nahtdicke am Ende der Siegelzeit nur knapp unterhalb der Ausgangsdicke beider Packstoffe liegt (siehe Referenzsiegelung), also nur ein geringer Teil der gesamten Werkzeugbewegung zur Verjüngung, bzw. Versiegelung der Folien beigetragen hat.

Die Biegesteifigkeit des Packmittels ist bei den stückigen Störungen von großer Bedeutung, was in Abbildung 7-13 dargestellt ist.

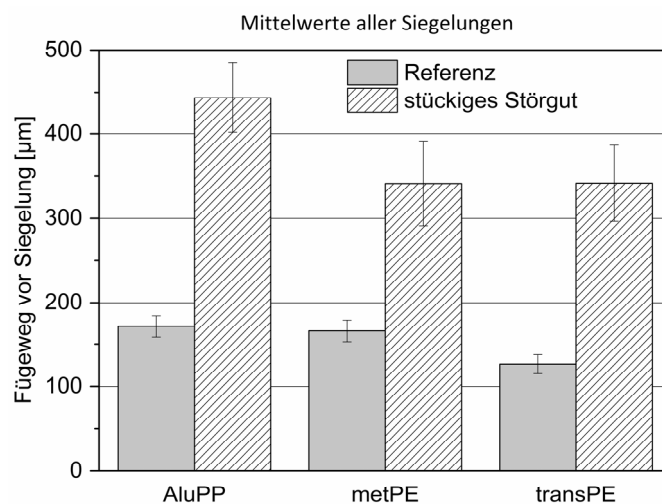


Abbildung 7-13: Gemessene Sonotrodenposition vor Beginn der Siegelung

AluPP und metPE sind ungefähr gleich dick, was an dem ähnlichen Wegniveau der Referenzsiegelung erkennbar ist. Beim Siegeln durch stückiges Störgut ist das Wegniveau beider Packmittel vor der Siegelung jedoch deutlich unterschiedlich. Das stückige Störgut wird also schon vor der Siegelung beim metPE besser verdrängt. Dies ist auf die höhere Biegesteifigkeit des AluPP zurückzuführen, wodurch sich das Packmittel weniger gut an die relativ spitze ERG-Kontur anlegen kann, und dieser spezielle Verdrängungsmechanismus des Ultraschallsiegeln dadurch teilweise kompensiert wird.

7.3 Schlussfolgerungen

7.3.1 Störprinzipie

Die durchgeführten Untersuchungen zu den vier verschiedenen Störprinzipien sind insgesamt nur bedingt untereinander vergleichbar. Das liegt einerseits an der jeweils unterschiedlichen Regler-Einstellung (s. Kap. 6.1.2) und zum anderen an der verschiedenen großen Datenbasis aufgrund des eskalierenden Prüfverfahrens. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen sind in Abbildung 7-14 die mittleren relativen Nahtfestigkeiten gegenüber der mittleren Störerkennbarkeit dargestellt. Es besteht demnach ein prinzipieller Zusammenhang zwischen dem Ausmaß einer Störung auf die Nahtqualität und ihrem Einfluss auf die Prozessdaten.

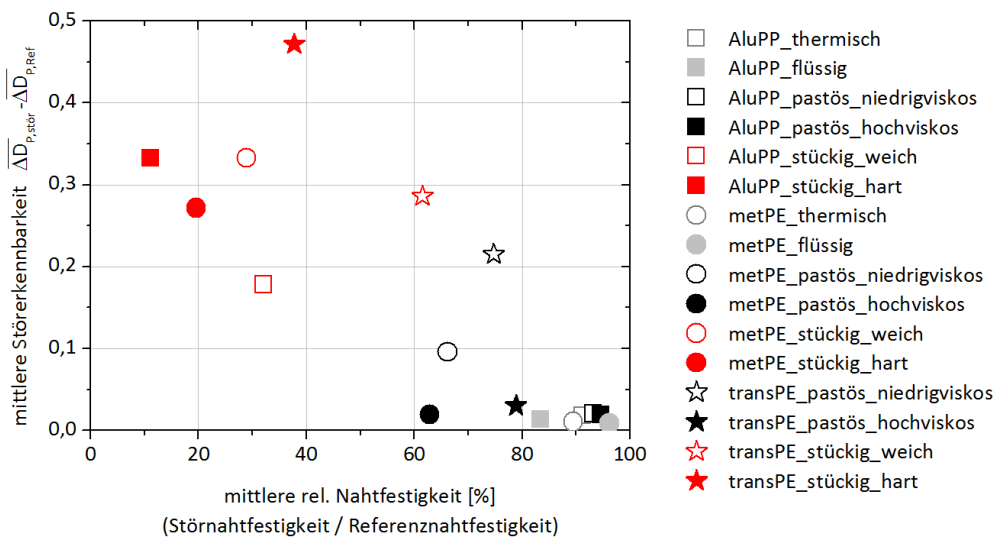


Abbildung 7-14: Einfluss der einzelnen Störprinzipie auf die mittlere Nahtfestigkeit und die mittlere Störerkennbarkeit anhand des Leistungsverlaufs

Klassifizierung der Störprinzipie

Zusammenhang zwischen dem Einfluss der einzelnen Störprinzipie auf die mittlere Nahtfestigkeit und die mittlere Störerkennbarkeit anhand der Leistung

In Abbildung 7-14 ist zu erkennen, dass die angenommene Klassifizierung der Störprinzipie zutreffend ist: Die Störungen durch stückiges Störgut haben den größten Einfluss auf Siegelnahtfestigkeit (und Dichtigkeit) und die Prozessdaten, unabhängig vom untersuchten Packmittel. Etwas weniger gravierend sind die Störungen mit pastösem Störgut, wobei sich der Einfluss der Störung je nach Packmittel deutlich unterscheidet. Am wenigsten beeinträchtigen thermische und flüssige Störgüter den Ultraschallsiegelprozess, beide Störungen haben einen ähnlich geringen Einfluss. Die im Diagramm dargestellten Werte der thermischen und flüssigen Störgüter basieren, im Gegensatz zu den beiden anderen untersuchten Störprinzipien, nur auf punktuellen Einzelmessungen, weshalb auf eine Entscheidung, welche der beiden Störungen einen größeren Einfluss hat, verzichtet wird und diese als gleichwertig betrachtet werden können.

Thermische und flüssige Störeinflüsse

Die Auswirkungen der thermischen und flüssigen Störeinflüsse beim Ultraschallsiegeln sind zu vernachlässigen. Es konnte zwar eine geringfügige Beeinflussung der Nahtqualität nachgewiesen werden, diese ist jedoch im Rahmen dieser Untersuchungen nie so gravierend, dass die Funktionserfüllung der Verpackung dadurch beeinträchtigt wird.

Pastöse Störgüter

Beim untersuchten AluPP-Verbund werden sowohl Siegelnahtfestigkeit, als auch Prozessdaten gleichermaßen minimal beeinflusst und sind ähnlich gering wie bei den thermischen und flüssigen Störungen. Bei transPE und metPE ist die Beeinflussung deutlich anhand der hier abgebildeten mittleren relativen Nahtfestigkeit erkennbar, wobei der Einfluss beim metPE etwas größer ist. Die Viskosität des pastösen Störgutes beeinflusst die Nahtfestigkeiten nachweislich, kann aber als vergleichsweise gering betrachtet werden, da die Funktion einer Verpackung dadurch nicht beeinflusst wird. Dies wird vielmehr von Packstoff und Prozessparametern beeinflusst. Der Einfluss auf die Prozessdaten ist bei metPE und transPE hingegen deutlich von den viskosen Störguteigenschaften abhängig. Mit geringerer Viskosität erhöht sich die Störerkennbarkeit in den Prozessdaten, bei transPE etwas deutlicher als bei metPE.

Stückige Störgüter

Bei den stückigen Störgütern ist der Einfluss auf die Nahtfestigkeit bei allen Packmitteln deutlich von der Festigkeit des Störgutes abhängig: Steigende Störgutfestigkeit bewirkt geringere Nahtfestigkeiten und ist in den Prozessdaten deutlich erkennbar. Dieser Unterschied ist bei metPE, im Vergleich zu den anderen beiden Packmitteln etwas weniger ausgeprägt. TransPE erreicht trotz stückigem Störut insgesamt etwas bessere Nahtfestigkeiten, was an der geringeren Biegesteifigkeit dieses Verbundes liegt. Der Einfluss auf die Prozessdaten ist bei allen drei Packmitteln deutlich erkennbar. Mit steigender Störgutfestigkeit vergrößern sich die Prozessdatenunterschiede bei transPE und AluPP gleichermaßen. Beim metPE verringern sich die Prozessdatenunterschiede, aber in geringerem Ausmaß, als bei den beiden anderen Packmitteln. In Abbildung 7-14 ist auch erkennbar, dass der Übergang zwischen stückigen und pastösen Störgütern offenbar fließend ist: Durch die weichen stückigen Störgüter können ähnliche Auswirkungen auf Nahtfestigkeit und Prozessdatenunterschiede verursacht werden, wie durch die pastösen Störgüter. Das liegt daran, dass mit steigendem Wassergehalt die gewählte stückige Modellsubstanz zunehmend pastöse Eigenschaften hat.

7.3.2 Packstoffe

Der Einfluss der Packmittel auf die Auswirkungen von Störungen auf Nahtqualität und Prozessdaten muss je nach Grad des Störeinflusses differenziert betrachtet werden. Bei Störungen mit großem Störeinfluss (stückiges Störgut), bei dem der Fügeflächenkontakt trotz der speziellen Verdrängungsmechanismen des Fügeverfahrens verhindert wird, spielen vor allem die mechanischen Eigenschaften des Verbundes eine Rolle. Es wurde gezeigt, dass in diesem Fall Folien mit geringer

Biegesteifigkeit tendenziell besser geeignet sind, um trotz der Störung eine Nahtbildung zu ermöglichen, weil dadurch eine bessere Verdrängung des Störgutes erreicht wird.

Bei den Störungen, welche durch die speziellen Verdrängungsmechanismen des Ultraschallsiegels aus der Naht verdrängt werden können, die sich aber im Nahtrandbereich auf den Nahtbildungsvorgang störend auswirken, sind die beeinflussenden Packmitteleigenschaften vielschichtiger. Es fällt auf, dass AluPP im Vergleich zu den beiden anderen Packstoffen äußerst tolerant auf pastöse Störungen reagiert, und sich diese weder in den Prozessdaten noch in den Nahtfestigkeiten relevant auswirken. Dies ist unter anderem auf die gute planare Wärmeleitung der Aluminiumschicht zurückzuführen. Dadurch wird der Temperaturgradient zwischen Nahtmitte und Nahträndern verringert, und die daraus resultierende morphologische Grenzschicht beim Ultraschallsiegeln im Nahtquerschnitt ist weniger stark ausgeprägt ([TD10], [Bac14]). Diese Verbundeigenschaft führt bei zusätzlicher Kühlwirkung durch Störgut im Nahtrandbereich zu einem toleranteren Verhalten: Durch die planare Wärmeleitung wird auch das Störgut erwärmt, und die Temperaturgradienten und daraus folgenden Nahtqualitätseinbußen sind weniger stark ausgeprägt. Aber auch das in diesem Verbund als Siegelschicht vorhandene PP hat einen Einfluss auf das spezielle Verhalten des AluPP-Verbundes. PP hat im Vergleich zu PE meist eine deutlich größere sogenannte Unterkühlung [DEE+08], d.h. eine größere Temperaturdifferenz zwischen Schmelzpeak- und Kristallisationspeaktemperatur (siehe Abbildung 7-15), was durch die komplexere Kristallographie des PP verursacht wird [Kur13]. Das bedeutet, dass eine vergleichbare Temperaturverringerng durch den Kontakt von Störgut und Polymerschmelze bei PE viel schneller zu Erstarrung und dadurch Veränderung der Fließeigenschaften führen kann. Wohingegen bei PP eine identische Temperaturverringerng noch nicht zur Erstarrung führt. PP verhält sich dadurch toleranter gegenüber Störeinflüssen.

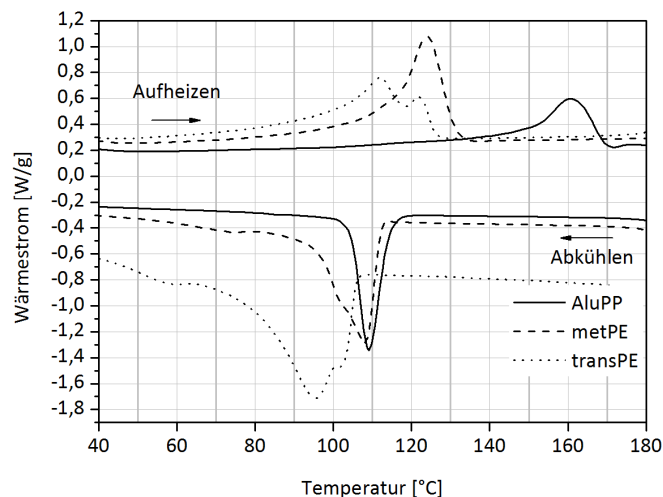


Abbildung 7-15: DSC-Messung der Aufheiz- und Abkühlmessung der untersuchten Packmittel im Temperaturbereich der Siegelschichtpolymere¹⁵

¹⁵ Messung: Neda Stöhr, SKZ Das Kunststoffzentrum, Würzburg, Messgerät NETZSCH DSC 204F1 Phoenix

Für tiefergehende Aussagen zu den Einflüssen der jeweiligen Packstoffe müssten diese hinsichtlich ihrer konkreten Siegelpolymereigenschaften genauer spezifiziert werden. Ein Rückschluss auf die beeinflussenden Eigenschaften anhand der jeweiligen Polymersorte ist nicht möglich und wird am Beispiel des untersuchten transPE deutlich: Bei transPE ist die Siegelschicht ein Blend aus PE-LD und PE-LLD und hat bei den pastösen Störgütern die größten Einbußen in der Nahtqualität. In [BTM12] wurde eine andere Verbundfolie untersucht, die ebenfalls eine Siegelschicht aus einem PE-LD und PE-LLD hat. Dabei traten an dieser Folie jedoch die geringsten Beeinflussungen der Nahtqualität auf. Die Kenntnis der Polymersorte bringt daher keinen Aufschluss über das konkrete Verhalten des jeweiligen Packstoffs.

Die zu ermittelnden, relevanten Eigenschaften sind vor allem die temperaturabhängigen viskosen Eigenschaften. Es wird davon ausgegangen, dass die Materialien deutlich unterschiedliches Fließverhalten aufweisen, wodurch erklärbar wird, warum sich die Prozessdatenunterschiede je nach Packstoff unterschiedlich auswirken.

7.3.3 Prozessdaten und Prozessführung

Detektionsgrenzen

Es ist möglich, Störungen des Ultraschallsiegelprozesses anhand der Prozessdaten zu erkennen, und es besteht ein prinzipieller Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Störung auf die Nahtfestigkeiten und der damit einhergehenden Beeinflussung der Prozessdaten (siehe Abbildung 7-14). Die Erkennbarkeit ist dabei vom Grad der Störung, vom Packstoff und von den Prozessführungsparametern abhängig. Die Detektionsgrenze liegt zwischen den pastösen und den stückigen Störgütern, denn mit der hier dargestellten Methode der Prozessdatenauswertung lassen sich je nach Packstoff und Prozessführung pastöse Störgüter teilweise detektieren. Für die Erkennbarkeit anhand der Prozessdaten konnte vor allem beim transPE ein prinzipieller Zusammenhang zwischen Fügegeschwindigkeit und Prozessdatenunterschieden festgestellt werden. Für abschließende Aussagen bezüglich dieses Zusammenhangs sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Empfehlungen für die Prozessführung

Durch eingeschlossenes Störgut im Bereich der Naht wird beim Siegeln zusätzlich Energie gewandelt, was insbesondere beim energiegesteuerten Ultraschallsiegelverfahren zu Problemen führen kann. Die Schwingung wird im Falle des Erreichens eines definierten Energiewertes gestoppt. Wird durch die Störung zusätzlich Energie gewandelt, fehlt dieser Betrag zum Herstellen der eigentlichen Naht. Theoretisch fehlt dieser Energiebetrag bei einem zeitgesteuerten Verfahren gleichermaßen, es wird also in der vorgegebenen Siegelzeit nicht genug Energie eingebracht. Das Ultraschallsiegelsystem ist aber in der Lage den Energiebetrag, der vom Störgut gewandelt wird, zusätzlich bereitzustellen, kann also in der vorgegebenen Siegelzeit auch mehr Energie abgeben. Diese Korrekturmöglichkeit besteht beim energiegesteuerten Siegelverfahren nicht.

Bisher werden die Prozessdaten beim Ultraschallsiegeln nur integral oder punktuell (Wegmessung vor einer Siegelung, [N.N.12]) überwacht, wodurch größere Störeinflüsse (z.B. Packstofffalten oder

stückiges Produkt) erkannt werden können. Auf Grundlage der in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse wird empfohlen, die Prozessdatenüberwachung beim Ultraschallsiegeln mit konstanten Siegelparametern (z.B. Produkt und Folienspezifisch) auch auf die zeitlich veränderlichen Prozessdatenverläufe auszuweiten, weil damit auch weniger gravierende Störeinflüsse (z.B. pastöse Störungen) erkannt werden können. Bei einem stabilen Siegelverfahren kann bei einzelnen abweichenden Prozessdatenverläufen davon ausgegangen werden, dass beim betreffenden Siegelvorgang Störungen aufgetreten sind. Über den Grad der Störung kann dadurch aber keine sichere Aussage getroffen werden. Die entsprechenden Siegelnähte, bzw. Verpackungen sollten zumindest aus Sicherheitsgründen ausgeschleust werden. Auch wenn die Nahtqualität davon nicht beeinflusst sein sollte, könnten Störgutreste im Kopfnahtbereich vorhanden sein, was als Qualitätsmangel der Verpackung anzusehen ist.

Es muss weiterhin festgestellt werden, dass mit der hier dargestellten Methode bei ungünstiger Kombination von Packstoff und Prozessführungsparametern, auch Störungen auftreten können, die nicht anhand der Prozessdaten zu erkennen sind. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

7.3.4 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen führen zu dem Ergebnis, dass der Packstoffeinfluss bei Ultraschallsiegelungen mit Störeinfluss sehr groß ist. Das wurde in dem Ausmaß nicht erwartet. Es wurde ein Packstoffeinfluss dahingehend erwartet, dass Störungen zu unterschiedlichen Bedingungen beim Nahtbildungsvorgang führen, und sich Packstoffe mit einem breiten Prozessfenster toleranter verhalten, weil ein großes Prozessfenster kennzeichnend für hohe Nahtqualitäten bei unterschiedlichsten Bedingungen ist. Wodurch jedoch nicht erklärt werden kann, warum der Packstoffeinfluss zu solch großem Einfluss auf die Störungserkennbarkeit anhand der Prozessdaten führt. In weiterführenden Untersuchungen sollte daher mit speziellen Labor-Packstoffen gearbeitet werden, deren Siegelschicht aus einer einzigen Polymersorte besteht. In dem Fall kann eine genaue Eigenschaftsbestimmung dieser Polymere erfolgen, welche an handelsüblichen Verbunden so nicht möglich ist. In der vorliegenden Arbeit wurde vor allem eine breit gefächerte Variation der Störprinzipie angestrebt, da aufgrund des Stands der Technik nicht abgeschätzt werden konnte, wie diese sich jeweils auswirken. Unter Maßgabe der breiten Variation und Modularität des Versuchsstandes wurde die Verwendung von vorgefertigten Beuteln favorisiert. Weil Laborverbunde teilweise mangelhafte Verbundqualität aufweisen, hätten die vorgefertigten Beutel nicht maschinell hergestellt werden können und die Möglichkeiten zur Variation der untersuchbaren Störprinzipie wären dadurch eingegrenzt worden.

In der vorliegenden Arbeit wurde ersichtlich, dass die thermischen und flüssigen Störungen einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Nahtqualität und die Prozessdaten haben. In weiterführenden Untersuchungen sollte daher der Fokus auf die nunmehr als gravierender bekannten pastösen und stückigen Störungen gelegt werden. Dabei sollten vor allem der Grenzbereich zwischen hochviskosen, pastösen und weichen, stückigen Störgütern untersucht und die scheinbare Grenze zwischen den beiden Störgutgruppen nach Möglichkeit aufgelöst werden.

Bei der hier dargestellten Umsetzung der Untersuchungsmethode in einen Versuchsstand sind senkrecht stehende vorgefertigte Beutel verwendet worden, um vor allem die thermischen Störungen

durch heiß abgefülltes Wasser untersuchen zu können. In zukünftigen Untersuchungen sollten die Packstoffproben nach Möglichkeit waagrecht orientiert werden, um evtl. schwerkraftbedingtes Abfließen der Störgüter zu vermeiden. Außerdem sollte eine Quantifizierung des Störgutaufrags erfolgen, um auch die Variation der Störgutmenge genauer untersuchen zu können. Um den Einfluss der Störungen auf den Nahtbildungsvorgang tiefgründiger zu untersuchen, sollte die Temperaturverteilung in der Naht gemessen werden, ähnlich wie in [TB13] dargestellt. Damit wären Aussagen zum Abkühlverhalten und der daraus resultierenden Morphologie der Naht möglich. Die externe Erfassung der Temperatur während des Nahtbildungsvorgangs stellt jedoch streng genommen keine systemimmanenten Prozessdaten dar.

Es wurde weiterhin nicht erwartet, dass sich die Prozessführung derart auf die Störerkennbarkeit auswirkt. Es scheint einen Zusammenhang zwischen der Fügegeschwindigkeit und der Störerkennbarkeit zu geben, der ebenfalls tiefgründiger untersucht werden muss. Im beschriebenen Versuchsstand ist die Fügegeschwindigkeit keine direkt regelbare Größe und kann nur durch Kombination von Siegelkraft und Amplitude indirekt beeinflusst werden. In einem Folgeversuchsstand sollte dieser Parameter daher direkt regelbar sein. Der Einfluss der Fügegeschwindigkeit auf den Ultraschallsiegelvorgang ist daher Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten ([TB13], [MAH+14]).

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist zunächst eine Sammlung aller typischen Störungen erfolgt, die den Siegelvorgang in maschinellen Verpackungsprozessen beeinflussen können. Ausgehend von dieser Sammlung wurden die verschiedenen Störungen zu Störprinzipen gruppiert. Die Störprinzipien orientieren sich an den jeweils auftretenden physikalischen Wirkprinzipien der einzelnen Störungen. Darauf aufbauend wurde eine Methode konzipiert, mit der systematisch untersucht werden kann, wie sich einzelne Störprinzipien auf die Siegelnahtqualität und die Prozessdaten (anhand von Leistung und Weg) beim Ultraschallsiegeln auswirken. Mit Hilfe der Methode lassen sich die einzelnen Störprinzipien jeweils wiederholbar applizieren, wodurch deren Auswirkung auf den Fügevorgang betrachtet werden kann. Innerhalb der Methode wird weiterhin beschrieben, wie die Auswirkungen auf die Nahtqualität (anhand Siegelnahtfestigkeit und -dichtigkeit) ermittelt und interpretiert werden können. Weiterhin wird eine Möglichkeit zur Datenverarbeitung, Analyse und Interpretation der zeitlich veränderlichen Prozessdatenverläufe dargestellt. Auf Basis der beschriebenen Methode wurde anschließend für eine Auswahl von Störprinzipien ein maschineller Versuchsaufbau konzipiert, mit dessen Hilfe die Methode für ausgewählte Packmittel und Störprinzipien angewendet werden kann. Mit dem Versuchsstand erfolgten im Rahmen dieser Arbeit einige grundlegende Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Störungen auf den Nahtbildungsvorgang beim Ultraschallsiegeln. Mit Hilfe dieser Untersuchungen konnten Aussagen zum Einfluss der Störprinzipien auf Nahtqualität und Prozessdaten getroffen werden. Aus dem bisherigen Stand von Wissenschaft und Technik konnte nicht abgeleitet werden, welche Störprinzipien beim Ultraschallsiegeln tatsächlich relevant sind. Mit den dargestellten Untersuchungen konnten Erkenntnisse darüber generiert werden, in welchem Maß die einzelnen Störprinzipien sich jeweils auswirken. So kann festgehalten werden, dass aufgrund der speziellen Verdrängungsmechanismen und Werkzeugeigenschaften beim Ultraschallsiegeln thermische Störungen und Störungen durch flüssiges Störgut einen kaum messbaren Einfluss haben. Wohingegen bei Störungen mit pastösem Störgut die spezifischen Auswirkungen von einer ganzen Reihe von Einflussfaktoren abhängig sind. Die jeweiligen Auswirkungen auf Nahtqualität und Prozessdaten sind abhängig vom Packstoff, von der Prozessführung und den Eigenschaften des Störprinzips. Bei den Störprinzipien, die aus der Naht verdrängt werden können und sich im Nahtrandbereich auswirken (pastöse Störgüter), spielen die polymeren Eigenschaften der Siegelschicht eine Rolle. Diese konnten anhand des unterschiedlichen Verhaltens von PE und PP, sowie aufgrund der Wärmeleiteigenschaften des Packmittelverbundes grob dargestellt werden. Für abschließende Aussagen zum Polymereinfluss wäre eine genaue Eigenschaftscharakterisierung der Siegelschichten notwendig, die jedoch in dieser Arbeit nicht genauer erfasst werden konnten. Bei Störungen, die aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften vor der eigentlichen Siegelung nicht verdrängt werden können, wirken sich vor allem die mechanischen Eigenschaften (Biegesteifigkeit) des Gesamtverbundes aus. Mit den Versuchen ist gezeigt worden, dass die Grenze zwischen relevanten und zu vernachlässigenden Störungen zwischen den pastösen und stückigen Störgütern verläuft. Diese Grenze ist vom Packstoff und den konkreten Störguteigenschaften abhängig.

Prinzipiell besteht ein Zusammenhang zwischen dem Einfluss von Störungen auf die Nahtqualität und die Prozessdaten. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass sich Störungen auf die zeitlich veränderlichen Prozessdatenverläufe auswirken. Mit der dargestellten Methode der Prozessdatenauswertung ist es möglich, je nach Packmittel und Prozessführung diese Störungen zu detektieren. Die dargestellte Methode der Prozessdatenauswertung ist außerdem in der Lage,

Abweichungen im zeitlichen Verlauf der Prozessdaten zu erfassen, die mit einer integralen Überwachung nicht erkannt werden können.

Es ist generell denkbar, aus der reinen Erkennung von Störungen auch Strategien zur Behebung derselben zu entwickeln. Beispielsweise könnte die Siegelzeit bei stückigen Störungen nach Möglichkeit verlängert werden. Dadurch könnten evtl. funktionsgerechte Nahtqualitäten der Verpackung erreicht werden. Es lässt sich jedoch nicht ausschließen, dass Produktreste im Randbereich der Packung vorhanden sind. Dies stellt im Sinne der Nahtoptik dennoch keine ausreichende Packungsqualität dar.

Aus den Unterschieden im Prozessdatenverlauf auf Störungen im eigentlichen Prozess zu schließen, ist eine Möglichkeit, die auch bei vielen anderen Anwendungsfeldern des Ultraschalls interessant sein kann. Voraussetzung dafür sind Verfahren, die unter annähernd konstanten Randbedingungen und Einflüssen ablaufen, sodass einzelne abweichende Datenverläufe als solche erkannt werden können.

Literaturverzeichnis

- [Ahl97] Ahlhaus, O. E.: Verpackung mit Kunststoffen. München, Wien: Hanser, 1997, ISBN: 3-446-17711-6
- [ALG69] Asay, J.R.; Lamberson, D.L.; Guenther, A.H.: Pressure and Temperature Dependence of the Acoustic Velocities in Polymethylmethacrylate. In Journal of Applied Physics, Vol. 40 (4/1969), S. 1768 – 1783
- [ALST97] Alig, I.; Lellinger, D.; Sulimma, J.; Tadjbakhsch, S.: Ultrasonic shear wave reflection method for measurements of the viscoelastic properties of polymer films. In: Review of Scientific Instruments, Vol. 68 (3/1997), S. 1536 – 1542
- [Ant06] Antranikian, G.: Angewandte Mikrobiologie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006
- [Bac14] Bach, S.: Untersuchung der Vorgänge und Einflüsse beim Ultraschallsiegeln flexibler polymerer Packstoffe. Dresden, TU Dresden, Fak. Maschinenwesen, Diss., 2014
- [Bar88] El Barbari, N.: Ultraschallschweißen von Thermoplasten – Möglichkeiten der Einsatzoptimierung. Aachen, RWTH Aachen, Fak. Maschinenwesen, Diss., 1988
- [BB08] Brinson, H.F.; Brinson, L.C.: Polymer Engineering Science and Viscoelasticity – An Introduction. New York: Springer Science and Business Media, 2008, ISBN: 978-0-387-73860-4
- [BBT+01] Benatar, A. Bonten, C.; Tüchert, C.; Grewell, D.: Welding. München, Carl Hanser, 2001, ISBN 9781569903339
- [Bec71] Becker, K.: Untersuchung der Vorgänge bei der Ultraschallschweißung thermoplastischer Kunststoffe mit Hilfe elektronischer Messverfahren. Braunschweig, Techn. Univ., Fak. Maschinenbau und Elektrotechnik, Diss., 1971
- [Bei09] Beier, W.: Biologisch abbaubare Kunststoffe. In: Hintergrund, Herausgeber: Bundesumweltamt Pressestelle, 2009
- [Ben87] Benatar, A.: Ultrasonic Welding of Advanced Thermoplastic Composites. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, PhD thesis, 1987
- [BG89] Benatar, A.; Gutowski, T.G.: Ultrasonic Welding of PEEK Graphite APC-2 Composites. In: Polymer Engineering and Science, 29 (23/1989), S. 1705 – 1721
- [BGS08] Belitz, H.-D.; Grosch, W.; Schieberle P.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [BLM14] Bleisch, G.; Langowski, H.-C.; Majschak, J.-P.: Lexikon Verpackungstechnik. 2. Auflage. Hamburg: Behr's, 2014
- [BMW11] Bleisch, G.; Majschak, J.-P.; Weiß, U.: Verpackungstechnische Prozesse / Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie. Hamburg: Behr's Verlag, 2011, ISBN: 978-3-89947-281-3

-
- [BP11] Brandt, B.; Pilz, H.: Die Auswirkungen von Kunststoffverpackungen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Europa – Kurzfassung. Studie der denkstatt GmbH, Wien, 2011
- [BSW10] Brecher, C.; Schug, R.; Weber, A.; Wenzel, C.; Hannig, S.: New systematic and time-saving procedure to design cup grinding wheels for the application of ultrasonic-assisted grinding. In: International Journal for advanced Manufacturing Technology, 47 (2010), S. 153 – 159
- [BTM10] Bach, S.; Thürling, K.; Majschak, P.: Analysis and modelling of the heating and sealing behaviour of polymer films during ultrasonic sealing. In: Tagungsband P2010, 14th International Conference on Polymeric Materials, 2010, S. 180, ISBN 978-3-86829-282-4
- [BTM12] Bach, S.; Thürling, K.; Majschak, J.-P.: Ultrasonic Sealing of Flexible Packaging Films – Principle and Characteristics of an Alternative Sealing Method. In: Packaging Technology and Science, 25 (4/2012), S. 233 – 248
- [Buc99] Buchner, N.S.: Verpackung von Lebensmitteln – Lebensmitteltechnologische, verpackungstechnische und mikrobiologische Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999
- [Bun12] Bunk, N.: Erarbeitung einer Methode zur Bewertung der Abdichtfähigkeit polymerer Packstoffe bei Lagensprungsiegelungen. Diplomarbeit, TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen/ Verarbeitungstechnik, 2012
- [CCC+00] Chuah, Y.K.; Chien, L.-H.; Chang, B.C.; Liu, S.-J.: Effects of the Shape of the Energy Director on Far-Field Ultrasonic Welding of Thermoplastics. In: Polymer Engineering and Science, Vol. 40 (1/2000), S. 157 – 167
- [CGM+03] Cuq, B.; Gonçalves, F.; Mas, J.F.; Varelle, L.; Abecassis, J.: Effects of moisture content and temperature of spaghetti on their mechanical properties. In: Journal of Food Engineering, 59 (2003), S. 51 – 60
- [Dar09] Darby, D.: Heat Sealing. In: Tagungsband TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2009
- [DBT13] Van Dun, J.; Bensason, S.; Thürling, K.: Polyolefins for ultrasonic sealing. In: Packaging Films, 4/2013, S. 8 – 10
- [DE06] Dallner, C.; Ehrenstein, G.W.: Thermische Einsatzgrenzen von Kunststoffen – Teil 2: Dynamisch-mechanische Analyse unter Last. In: Zeitschrift Kunststofftechnik, 2 (2006), S. 96 – 102
- [DEE+08] Domininghaus, H.; Elsner, P. (Hrsg.); Eyerer, P. (Hrsg.); Hirth, T. (Hrsg.): Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen 7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2008, ISBN: 978-3-540-72400-1
- [Die14] Dienst, S.: Analyse von Maschinendaten zur Entscheidungsunterstützung bei der Produktverbesserung durch die Anwendung eines Feedback Assistenz Systems. Siegen, Univ., Naturwissenschaftlich-Technische Fak., Diss., 2014
- [DIN 1320] Norm DIN 1320 Dez 2009. Akustik – Begriffe

-
- [DIN 31501] Norm DIN 31051 Sep 2012. Grundlagen der Instandhaltung
- [DIN 55350-17] Norm DIN 55350-17 Aug 1988. Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Teil 17: Begriffe der Qualitätsprüfungsarten
- [DIN 55405] Norm DIN 55405 Nov 2006. Verpackung – Terminologie – Begriffe
- [DIN 55529] Norm DIN 55529 Sep 2012. Bestimmung der Siegelnahtfestigkeit von Siegelungen aus flexiblen Packstoffen
- [DIN 1910-3] Norm DIN 1910-3 Sep 1977. Schweißen; Schweißen von Kunststoffen, Verfahren
- [DIN EN ISO 11357-1] Norm DIN EN ISO 11357-1 Mär 2010. Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- [DIN EN ISO 6721-1] Norm DIN EN ISO 6721-1 Aug 2011. Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- [DT09] Dudbridge, M.; Turner, R.: Seal integrity and the impact on food waste. University of Lincoln, 2009, Final Report, Project code: RTL 035-001
- [EE12] Emblem, A.; Emblem, H.: Packaging Technology: Fundamentals, Materials and Processes. Elsevier Science & Technology, 2012, ISBN: 9780857095701
- [Ehr04] Ehrenstein, G.W. (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. München, Wien: Hanser, 2004
- [Ehr08] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. 4.Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2008
- [Ern90] Ernst, U.: Siegeln von Verpackungsfolien mit Ultraschall. Wissenschaftliche Mitteilungen des Schweizerischen Verpackungsinstituts (SVI), St. Gallen, 1990
- [ERT03] Ehrenstein, G.W.; Riedel, G.; Trawiel, P.: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen. 2. Auflage. München: Hanser Verlag, 2003
- [Fal01] Falla, D. J.: Seal Through Vegetable Oil Contamination: A Comparison of Polyolefin Plastomers Produced via Insite Technology with Ethylene/Acrylic Acid Copolymers, Ionomers, and Ultra Low Density Polyethylene. In: Tagungsband TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2001
- [Fal69] Falk, S.: Lehrbuch der Technischen Mechanik – Dritter Band: Die Mechanik des elastischen Körpers. Berlin Heidelberg, Springer, 1969
- [FI95] Fu, S.; Die, M.: Measurement on Specimen Acoustic Impedance in Ultrasonic Plastic Welding. In: Japanese Journal of applied physics, 34 (1995), S. 2740 – 2744
- [Fis09] Fischer, T.: Verpacken mit Schall. In: Kunststoffe (8/2009), S. 51 – 55
- [FMG08] Friedrich, S.; Motshev, S.; Gehde, M.: Torsionales Ultraschallschweißen. In: Joining Plastics, 2/2008, S. 110 – 114

-
- [FS06] Frick, A.; Stern, C.: DSC-Prüfung in der Anwendung. München, Wien: Hanser Verlag, 2006, ISBN-10: 3446-40563-1
- [GAF+12] Gahmann, H.; Antonoff, A.; Falser, A.: Nestlé Studie 2012 – Das is(s)t Qualität. Studie der Nestlé Deutschland AG, Frankfurt/Main, 2012
- [GCS+11] Gustavsson, J.; Cederberg, C.; Sonesson, U.; van Otterdijk, R.; Meybeck, A.: Global food losses and food waste – extent, causes and prevention. Food and agriculture organization of the united nations (FAO), Rom, 2011
- [GFF10] Gehde, M.; Friedrich, S.; Fuhrich, R.: Longitudinales und torsionales Ultraschallschweißen – ein Verfahrensvergleich. In: joining plastics, 1/2010, S. 32 – 35
- [Gho09] Ghosh, A.: Ursache und Wirkung – Die Siegelnaht unter der Lupe – Teil 2. In: Packreport, 4/2009, S. 56 – 57
- [GK12] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau 23. Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012, ISBN: 9783642173059
- [GK82] Gesellschaft Kunststofftechnik: Verpacken mit Kunststoff-Folien. Düsseldorf : VDI-Verl., 1982, ISBN: 3-18-404092-5
- [GM15] Goldhahn, H., Majschak, J.-P.: Hoch effiziente Maschinensysteme für die individualisierte Massenproduktion. In: Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, 122 (2015), S. 151 – 157
- [Gol69] Goldhahn, H.: Aufbau eines Systems verarbeitungstechnischer Grundlagen. Dresden, Technische Universität Dresden, Diss., 1969
- [Gol78] Goldhahn, H.: Analyse von Wirkpaarungen zur Herausarbeitung von Gemeinsamkeiten. Dresden, Technische Universität Dresden, Diss. B, 1978
- [Gre03] Greitmann, M.J.: Entwicklung eines Qualitätssicherungs(QS)-Systems für das Ultraschallschweißen auf Basis Neuronaler Netze unter Nutzung der von der Maschine zur Verfügung gestellten Messwerte. Universität Stuttgart, 2003, Abschlussbericht, AiF-Vorhaben 12.937N , DVS-Nr. 5.022
- [GSC+00] García-Ochoa, F.; Santos, V. E.; Casas, J. A.; Gómez, E.: Xanthan gum: production, recovery, and properties. In: Biotechnology Advances 18 (2000), S. 549 – 579
- [GWM04] Glies, H.F.; Wagner, J.R.; Mount, E.M.: Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook. Norwich, NY: William Andrew, 2004, ISBN: 978-0-8155-1473-2
- [Hab09] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 6. Aktualisierte Auflage. Berlin [u.a.] : Springer, 2009, ISBN: 978-3-540-85266-7
- [Hei13] Heinrich, G.: Skript zur Vorlesung Polymerwerkstoffe: Struktur- Eigenschafts-Beziehungen. Dresden, 2013
- [Her10] Herrmann, T.: Schwarze Magie reproduzierbar gemacht. In: Kunststoffe 06/2010, S. 18 – 20

-
- [Hil03] Hillers, O.: Fehlerklassifizierende Prozesskontrolle mittels multivariater Statistik beim Laserstrahlschweißen. Hannover, Univ., Diss., 2003
- [HK04a] Haberstroh, E.; Kuhlmann, K.: Prozessführung beim Ultraschallschweißen. In: Kunststoffe 07/2004, S. 35 – 38
- [HK04b] Haberstroh, E.; Kuhlmann, K.: The residual Melt Layer Thickness as new Criterion for Ultrasonic Welding. In: Tagungsband ANTEC, 2004, S. 43 – 46
- [HS10] Hänsel, R.; Sticher, O.: Pharmakognosie – Phytopharmazie. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, ISBN: 9783642009631
- [HS12] Härth, M.; Schubert D.W.: Simple Approach for Spreading Dynamics of Polymeric Fluids. In: Macromol. Chem. Phys., 213 (2012), S. 654 – 665
- [Hue11] Hueber, R.: Mehr als Schall und Rauch!. In: austropack, 04/2011, S. 16 – 17
- [Ise94] Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendung bei technischen Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994, ISBN: 3-18-401344-8
- [Kai07] Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure – Von der Synthese bis zur Anwendung. München: Hanser, 2007
- [Kai92] Kaiser H.: Prozeßanalyse und Prozeßführung beim linearen Vibrationsschweißen von Kunststoffen. Paderborn, Universität-Gesamthochschule Paderborn, Fachbereich 10 Maschinentechnik, Diss., 1992
- [Kap07] Kaps, C.: Entzaubertes Geheimnis Maschinendiagnose. In: Intelligenter Produzieren – Mit Condition-Monitoring-Systemen robust produzieren, 2007/01, S. 18 – 19
- [KK05] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 2 – Schleifen, Honen, Läppen, 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, ISBN: 978-3-540-23496-8
- [Kor96] Korte, W. H.: Einfluß der Spritzgießherstellbedingungen und Möglichkeiten der prozeßnahen Qualitätssicherung mittels statistischer Methoden beim Ultraschallschweißen. Aachen, RWTH Aachen, Fak. Maschinenwesen, Diss., 1996
- [Krü99] Krüger, J.: Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken. Berlin, Techn. Univ., Diss., 1999
- [KSA08]#81 Khmelev, V.N.; Slivin, A.N.; Abramov, A.D.: Research of Parameter Influence of Ultrasonic Welding Process on Conjunction of Polymeric Thermoplastic Materials. In: Tagungsband 9th International Siberian Workshop and Tutorials EDM, 2008
- [KSB+06] Khmelev, V.N.; Slivin, A.N.; Barsukov, R.V.; Tsyganok, S.N.; Savin, I.I.; Shalunov, A.V.; Levin, S.V.; Abramov, A.D.: Measurement of Parameters and Automatic Selection of Optimal Modes During Ultrasonic Welding of Thermoplastic Materials. In: Tagungsband 7th International Siberian Workshop and Tutorials EDM, 2006

- [KTB04] Khmelev, V.N.; Tsyganok, S.N.; Barsukov, R.V.: Definition of Quality Criterion for the Sealing Seam Obtained by Ultrasonic Welding of Containers with Blood Specimens. In: Tagungsband 51th International Siberian Workshop and Tutorial EDM, 2004
- [Kuh06] Kuhlmann, K.: Untersuchungen zum Verhalten von intakten und beschädigten Schwingsystemen beim Ultraschallschweißen. Aachen, Univ., Diss., 2006
- [Kur13] Kurz, A.: Rheologische Untersuchungen zum Einfluss des TBPMN-Netzwerkes auf die scherinduzierte Kristallisation von Polypropylen. Berlin, TU, Diss., 2013
- [Lin12] Lindner, C.: Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011. In: Consultic-Bericht, 2012
- [LLL+06] Ling, S. F.; Luan, J.; Li, X.; Yong Ang, W. L.: Input electrical impedance as signature for nondestructive evaluation of weld quality during ultrasonic welding of plastics. In: NDT&E International, 39 (2006), S. 13 – 18
- [Lot08] Steuerungsintegrierte Vorgangsdiaagnose in Verarbeitungsmaschinen am Beispiel einer Quersiegeleinheit. Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2008
- [Luz68] Luz E.: Zur Analyse der Werkstoffdämpfungszahlen aus dem Schwingungsversuch. In: Rheologica Acta, 7 (Heft 1/1968), S. 78 – 84
- [MAH+00] Mesnil, P.; Arnauts, J.; Halle, R.W.; Rohse, N.: Seal Through Contamination Performance of Metallocene Plastomers. In: Tagungsband TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2000, S. 669 – 686
- [MAH+14] Marcus, M.; Aldaz, B.; Holt, K.; DeVries, M.; Nguyen, L.: Benefits of servo-driven ultrasonic welding for critical assemblies. In: Tagungsband ANTEC, 2014, S. 1824 – 1831, ISBN 978-0-9850112-4-6
- [Mah09] Mahr, M.: Grenzen gesprengt – Komplettes Ultraschallsiegeln von Schlauchbeuteln. In: neue verpackung, 9/2009, S. 24 – 26
- [Mai99] Maier, R.-D.: Fortschritte bei Metallocen-Produkten. In: Kunststoffe 89 (1999), S. 120 – 132
- [Mat02] Matyas, K.: Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. In: Industrie Management, 18 (2002), S. 13 – 16
- [Mat62] Mataushek, J.: Einführung in die Ultraschalltechnik. 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1962
- [Mau12] Mauermann, M.: Methode zur Analyse von Reinigungsprozessen in nicht immmergierten Systemen der Lebensmittelindustrie. Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2012
- [MHM+02] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: Werkstoffkunde Kunststoffe. 5. Aufl. München, Wien: Hanser, 2002
- [Mic06] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 5. Auflage. München, Wien: Hanser, 2006

-
- [Mih12] Mihindukulasuriya, S.D.F.: Investigations of Heat Seal Parameters and Oxygen Detection in Flexible Packages, University of Guelph, Food Sciences, Diss., 2012
- [MK93] Michaeli, W.; Korte, W.: Bessere Nahtqualität beim Ultraschallschweißen – Kraftregelung mit Servoventil eröffnet neue Wege der Prozeßführung. In: Kunststoffe 83 (1993), S. 667 – 670
- [MK94] Michaeli, W.; Korte, W.: Einfluß der Spritzgießbedingungen auf Schweißprozeß und Nahtfestigkeit beim Ultraschallschweißen. In: Plaste und Kautschuk 41 (6/1994), S. 293 – 297
- [MK95] Michaeli, W.; Korte, W.: Quality Assurance in Ultrasonic Welding using Statistical Process Models – Prediction of Weld Strength. In: Tagungsband ANTEC, 1995, S. 1290 – 1295
- [MKD+94] Michaeli, W.; Korte, W.; Dhawan, K.; Exner, S.: Festigkeit von Ultraschallschweißnähten vorausberechnen. In: Plastverarbeiter 45 (10/1994), S. 40 – 44
- [ML12a] Mihindukulasuriya, S.; Lim, L.-T.: Effects of Liquid Contaminants on Heat Seal Strength of low-density polyethylene Film. In: Packaging Technology and Science, 25 (2012), S. 271 – 284
- [ML12b] Mihindukulasuriya, S.D.; Lim, L.-T.: Heat sealing of LLDPE films: Heat transfer modeling with liquid presence at film–film interface. In: Journal of Food Engineering Vol. 116 (2013), S. 532 – 540
- [MO00] Masuzawa, N.; Ohdaira, E.: Information contained in the radiating ultrasound during ultrasonic welding. In: Ultrasonics, 38 (2000), S. 609 – 613
- [MW09] Michaeli, W.; Weber, M.: Untersuchungen zur Restschmelzeschichtdicke als neues Merkmal zur Prozessoptimierung beim Ultraschallschweißen. In: joining plastics, 4/2009, S. 235 – 245
- [MWK94] Michaeli, W.; Wegener, M.; Korte, W.: Prozessmodell verdrängt Empirie – Qualitätssicherung beim Ultraschallschweissen. In: Kunststoffe Synthetics 41 (7/1994), S. 12 – 14
- [MWK97] Michaeli, W.; Korte, W.; Klein, H.: Ausschuß verringern. In: Plastverarbeiter 48 (1997), S. 66 – 70
- [N.N.02] N.N.: Untersuchung – Nahtdichte von Flachbeuteln. In: neue verpackung, 1/2002, S. 38 – 41
- [N.N.03] N.N.: Kreative Baumeister – Katalysatoren produzieren maßgeschneiderte Kunststoffe. In: Bayer research 15 (2003), S. 72 – 75
- [N.N.10a] N.N.: Entwicklung des Verpackungsverbrauches flexibler Kunststoffe nach Branchen, Auswertung des deutschen Marktes 2009, Prognose 2014 3. Ausgabe. Bericht der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, Mainz, 2010
- [N.N.10b] N.N.: Global Flexible Packaging – Opportunity in Versatility. Studie der Euromonitor International Ltd., 2010

- [N.N.11] N.N.: Effizienzsprung an der letzten Naht. In: neue verpackung, 6/2011, S. 42 – 43
- [N.N.12] N.N.: Kritische Kopfnahht gelingt mit Ultraschall. In: neue verpackung, 9/2012, S. 38 – 39
- [N.N.13a] N.N.: World plastics production growth. In: Plastics – the Facts 2013, Bericht von Plastics Europe, 2013
- [N.N.13b] N.N.: Unwrapping the packaging industry – Seven factors for success. Studie der EYGM Limited, 2013
- [Neh11] Neher, J.: Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozessüberwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen. Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Diss., 2011
- [Ném03] Németh, E.: Triboelektrische Aufladung von Kunststoffen. Freiberg, Techn. Univ. Bergakademie, Fak. Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Diss., 2003
- [Nen06] Nentwig, J.: Kunststoff-Folien – Herstellung – Eigenschaften – Anwendung. 3. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2006
- [Net92] Netze, C. R.: Ultraschallschweißen von hochtemperaturbeständigen, unverstärkten, kurzglasfaser- und endlosglasfaserverstärkten Thermoplasten. Aachen, RWTH Aachen, Fak. Maschinenwesen, Diss., 1992
- [NSC11] Norton, I. T.; Spyropoulos, F.; Cox, P.: Practical Food Rheology: An Interpretive Approach. Wiley-Blackwell, 2011, ISBN: 978-1-4051-9978-0
- [Pas12] Pasternak, M.: Laminating Carbon Preforms. In: Kunststoffe International 10/2012, S. 116 – 117
- [Pea08] Market Statistics and Future Trends in Global Packaging. Studie der WPO – World Packaging Organisation / PIRA International Ltda., 2008
- [Pot04] Potente, H.: Fügen von Kunststoffen – Grundlagen, Verfahren, Anwendung. München, Wien: Hanser, 2004
- [Pot71] Potente, H.: Untersuchung der Schweißbarkeit thermoplastischer Kunststoffe mit Ultraschall. Aachen, RWTH Aachen, Fak. Maschinenwesen, Diss., 1971
- [PWH+93] Potente, H.; Wortberg, J.; Hanning, D.; Häußler, J.: Kritische Betrachtungen zur Prozeßüberwachung in der Kunststoffverarbeitung, Teil 1. In Plastverarbeiter, 44 (8/1993), S. 44 – 49
- [Rau68] Rausing, G.A.; Tetra Pak International AB, Lund (Schweden): Verfahren zum Sterilisieren und Füllen eines flexiblen Behälters unter aseptischen Bedingungen mit einer sterilen Flüssigkeit und Verpackungsmaterial zur Verwendung in Verbindung mit dem Verfahren. DE 1 667 936 A, Deutschland, 1968, Patentschrift
- [Ric08] Richter, T.: Zerstäuben von Flüssigkeiten – Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis. 2., durchgesehene Auflage. Renningen: Expert Verlag, 2008, ISBN: 978-3-8169-2815-7

- [Ric97] Richter, A.: Möglichkeiten und Grenzen der Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung beim Fügen durch Umformen. Hamburg, TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Produktionstechnik, Fertigungstechnik, Diss., 1997
- [Rit86] Ritter, J.: Untersuchungen zur Energieumwandlung und zum Schwingungsverhalten des Systems Sonotrode, Fügeteile und Amboß beim Ultraschallschweißen ausgewählter Thermoplaste. München, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 1986
- [RMA00] Rohse, N.; Mesnil, P.; Arnauts, J.: Siegeln durch Verunreinigungen. In: Kunststoffe 90 (2000), S. 102 – 108
- [Roc13] Roch, F.: Ermittlung von Prozessdatenänderungen beim Ultraschallsiegeln mit definierten Störeinflüssen. Unveröffentlichte Studienarbeit (500 h-Beleg), TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen/ Verarbeitungstechnik, 2013.
- [Ros83] Rostásy, F.S.: Baustoffe. Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer, 1983, ISBN: 978-3170079281
- [Sae01] Saechtling, H.: Kunststoff-Taschenbuch. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2001, ISBN: 3-446-21605-7
- [Sch00] Schnerr-Häselbarth, O.: Automatisierung der Qualitätsüberwachung beim Kunststoffspritzgießen. Aachen, RWTH Aachen, Fak. Maschinenwesen, Diss., 2000
- [SCH04] Selke, S.E.M.; Culter, J.D.; Hernandez, R.J.: Plastics Packaging: properties, processing, application and regulations 2nd edition. München: Carl Hanser Verlag, 2004, ISBN: 3-446-22908-6
- [Sch04] Schubert, G.: Herstellung beständiger Aluminiumverbunde. In: Innoform-Seminar Wechselwirkungen Folie, Farbe, Klebstoff – Füllgut, Osnabrück 2004
- [Sch10a] Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, ISBN 978-3-642-03948-5
- [Sch10b] Schubert, G.: Phänomene beim Ultraschallsiegeln von Aluminiumverbunden. In: Tagung VVD2010-Seminar Ultraschallsiegeln in Verarbeitungs- und Verpackungsprozessen, Dresden, 2010
- [Sch12] Schenck, H.E.: Neue Siegelschichten für High-End-Anwendungen. In: Tagung PE- und PP-Folien – Siegelschichten für dichte Verpackungen, Würzburg, 2012
- [Sch89] Schlarb, A.: Zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffen – Prozeß-Struktur-Eigenschaften. Kassel, Universtät – Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Diss., 1989
- [SG08] Siddiq, A.; Ghassemieh, E.: Thermomechanical analyses of ultrasonic welding process using thermal and acoustic softening effects. In: Mechanics of Materials 40 (2008), S. 982 – 1000
- [SM94] Stehling, F.C.; Meka, P.: Heat Sealing of Semicrystalline Polymer Films. II. Effect of Melting Distribution on Heat-Sealing Behavior of Polyolefins. In: Journal of Applied Polymer Science, Vol. 51 (1994), S. 105 – 119

-
- [SN05] Schmidberger E.; Neher J.: Höchste Aufmerksamkeit – Zyklische Produktionsprozesse qualitätsorientiert regeln. In: Qualität und Zuverlässigkeit, 50 (2005), S. 58 – 59
- [SÖA11] da Silva, L.; Öchsner, A.; Adams, R.: Handbook of adhesion technology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, ISBN: 3642011683
- [Sol95] Soltysiak, J.T.: Überwachung und Steuerung von Gesenkschmiedeprozessen auf Basis messtechnisch erfassbarer Prozessgrößen. Paderborn, Universität-Gesamthochschule Paderborn, Fachbereich 10 Maschinentechnik, Diss., 1995
- [SP96] Simpson, M.F.; Presa, J.L.: A Comparison of AFFINITY™ Plastomers Produced via INSITE™ Technology with Ethylene/Acrylic Acid Copolymers, Ionomers, and ULDPE. In: Tagungsband Future-Pak, 1996
- [Str00] Strache, W.: Multisensorielle Überwachung des Stanzprozesses. Hannover, Universität Hannover, Fak. Maschinenbau, Diss., 2000
- [Str12] Strunz, M.: Instandhaltung Grundlagen – Strategien –Werkstätten. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, ISBN 978-3-642-27389-6
- [Str95] Strohfuß, W.: „Schwarze Magie“? Ultraschallfügen. In: Kunststoffe 85 (1995), S. 827 – 833
- [Str97] Strecker, S.: Künstliche Neuronale Netze – Aufbau und Funktionsweise. In: Arbeitspapiere Wirtschaftsinformatik, Universität Giessen, 1997
- [Suw99] Suwalski, I.: Steuerungsintegriertes Prozessüberwachungssystem für Drehmaschinen. Berlin, Techn. Univ., Diss., 1999
- [TB11] Thürling, K.; Bach, S.: Ultrasonic sealing of packaging films – influencing material properties. In: Tagungsband International Congress on Engineering and Food (ICEF11), 2011, S. 109 – 110
- [TB13] Thürling, K.; Baudrit, B.: Untersuchungen zum Einfluss des Schmelzeflusses auf die Nahtqualität beim Ultraschallsiegeln und Entwicklung einer Methode zur prozessnahen Charakterisierung der Ultraschallsiegelbarkeit von Packstoffen. Fraunhofer AVV, 2013, Abschlussbericht, AiF- Vorhaben 17194BG
- [TBK11] Thürling, K.; Bach, S.; Kram, F.: Sealing Behavior of Modell-contaminated Sealant Surfaces. In: Tagungsband TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2011, Poster
- [TBM10] Thürling, K.; Bach, S.; Majschak, J.-P.: Ultrasonic sealing behaviour in context with material characteristics of packaging films. In: Tagungsband 5th International Conference on the Food Factory for the Future, 2010, Poster
- [TBM11] Thürling, K.; Bach, S.; Majschak, J.-P.: Influence of material properties in the ultrasonic sealing behaviour of packaging films. In Tagungsband 25th International Association of Packaging Research Institutes (IAPRI) – Symposium on Packaging, 2011

-
- [TBN+10] Thürling, K.; Bach, S.; Nase, M.; Majschak, J.-P.: Influence of material parameters on ultrasonic sealing behavior of polymer films for packaging. In: Tagungsband P2010, 14th International Conference on Polymeric Materials, 2010, S. 274, Poster, ISBN 978-3-86829-282-4
- [TD10] Thürling, K.; Dorbath F.: Untersuchung des Einflusses der Materialeigenschaften einzelner Verbundschichten bei mehrschichtig aufgebauten Verpackungsfolien auf die Ultraschallsiegelbarkeit und Modellierung des Ultraschallsiegelvorgangs. Fraunhofer AVV, 2010, Abschlussbericht, AiF- Vorhaben 15809BG
- [Ter95] Terzyk, T.: Prozeßüberwachung beim Gesenkschmieden mit Grat durch Auswertung prozeßbedingter Signale. Hannover, Universität Hannover, Fak. Maschinenbau, Diss., 1995
- [TG06] Tadmor, Z. ; Gogos, C.G.: Principles of Polymer Processing – Second Edition. New York, John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-38770-3
- [THS01] Tsujino, J.; Harada, Y.; Sano, T.: Ultrasonic complex vibration welding systems of 100kHz to 200 kHz with large welding tip area for packaging in microelectronics. In: Tagungsband IEEE International Ultrasonics Symposium, 2001, S. 665 – 668
- [Thü11] Thürling, K: Energy transformation mechanism during ultrasonic sealing of laminated films for packaging. In Tagungsband 13th TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2011
- [Tie98] Tietze, S.: Entwurf des Ambosses einer Ultraschallschweißeinrichtung für Packstoffe. Dresden TU-Dresden, Fak. Maschinenwesen, Diss., 1995
- [Tro08] Troughton M.J.: Handbook of Plastics Joining – A Practical Guide, Second Edition. Norwich, NY: William Andrew, 2008, ISBN: 978-0-8155-1976-8
- [TSB+13] Thürling, K.; Stephan, B.; Bach, S.; Majschak, J.-P.: „In situ“ Temperature Measurement at Ultrasonic Sealing using IR-thermography. In Tagungsband 26th International Association of Packaging Research Institutes (IAPRI) – Symposium on Packaging, 2013
- [TST+94] Tsujino, J.; Ishii, Y.; Shiraki, T.; Tamura, T.; Ueoka, T.: Welding Characteristics of 90 kHz Two-Vibration-System Ultrasonic Plastic Welding Equipment. In: Tagungsband, IEEE Ultrasonics Symposium, 1994, S. 1353 – 1358
- [TUA+07] Tsujino, J.; Ueoka, T.; Aoyama, T.; Karatsu, R.; Kyuzen, T.: Welding Characteristics of a 27 kHz Ultrasonic Complex Vibration Welding System with Six Transducers Integrated Using a (2, 1) Mode Transverse Vibration Disk. In: Tagungsband, IEEE Ultrasonics Symposium, 2007, S. 1132 – 1135
- [TUO+00] Tsujino, J.; Ueoka, T.; Otoda, K.; Fujimi, A.: One-dimensional longitudinal-torsional vibration converter with multiple diagonally slitted parts. In: Ultrasonics 38 (2000), S. 72 – 76
- [TWW+03] Tauschitz, B.; Washüttl, M.; Wepner, B.; Tacker, M.: MAP-Verpackungen: ein Drittel nicht optimal. In: PACK aktuell (03/2003), S. 6 – 8

-
- [VDMA 2006/13] VDMA 2006/13: Dichtigkeitsklassen von flexiblen Verpackungen. VDMA-Fachverbandsschriften Nahrungsmittelmaschinen und Verpackungs-maschinen.
- [VDMA 8748] Norm VDMA 8748 Mär 2014. Kriterien zur Qualitätsbeurteilung von Packstoff zur Verarbeitung auf Siegelrand- und Schlauchbeutel- Form-, Füll- und Verschleißmaschinen und –anlagen (Mindestanforderungen)
- [Wag10] Wagner, J.R.: Multilayer Flexible Packaging – Technology and Applications for the Food, Personal Care and Over-The-Counter Pharmaceutical Industries. Amsterdam Heidelberg [u.a.]: Elsevier, 2010, ISBN: 978-0-8155-2022-1
- [Wan10] Wanske, M.: Hochleistungs-Ultraschallanwendungen in der Papierindustrie / Methoden zur volumenschonenden Glättung von Oberflächen. Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2010
- [WB06] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 3 – Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. 6. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2006, ISBN: 978-3-540-32506-2
- [Whi73] Whistler, R.: Industrial Gums : Polysaccharides and their Derivatives. 2nd Edition. New York, London, Academic Press, 1973, ISBN: 0124337902
- [Wie10] Wieduwilt, U.: Einsatz der Ultraschalltechnologie in Schlauchbeutel-FFS-Maschinen. In: Tagung VVD2010-Seminar Ultraschallsiegeln in Verarbeitungs- und Verpackungsprozessen, Dresden, 2010
- [Wit06] Witt, G.; u.a.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. München [u.a.]: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2006
- [Wod04] Wodara, J.: Ultraschallfügen und –trennen. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag, 2004
- [Zah09] Zahn, S.: Ultraschallschneiden von Lebensmitteln / Optimierung durch Abstimmung der Verfahrensparameter auf die spezifischen Eigenschaften des Schnittgutes. Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2009
- [ZDB02] Zhao, J. Q.; Daigle, L.; Beaulieu, D.: Effect of joint contamination on the quality of butt-fused HDPE pipe joints. In: Canadian Journal of Civil Engineering, 29 (2002), S. 787 – 798
- [ZM06] Zienert, L.; Mauermann, M.: Dichtigkeit von Beuteln – Auswahl einer geeigneten Prüfmethode zur Bestimmung der Dichtigkeit von Beuteln. In: Verpackungs-Rundschau (5/2006), S. 87 – 92
- [Zog93] Zogg, M.: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik – 3. Überarbeitete Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner, 1993, ISBN: 3-519-16319-5

Publikationsliste

Teile der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Publikationen, Vorträgen und Postern veröffentlicht:

Publikationen

Thürling, K.; Majschak, J.-P.: Inline seal failure detection in ultrasonic sealing of packaging films. In: Tagungsband ANTEC 2014 – Proceedings of the Technical Conference & Exhibition, Society of Plastics Engineers, 2014

Baudrit, B.; Stöhr, N.; Heidemeyer, P.; Bastian, M.; Majschak, J.-P.; Stephan, B.; Thürling, K.: Einblicke in den Ultraschallsiegelprozess. In: Joining Plastics – Fügen von Kunststoffen 8 (2014), Nr. 1, S. 46 – 51

Van Dun, J.; Bensason, S.; Thürling, K.: Polyolefins for ultrasonic sealing. In: Packaging Films, 4/2013, S. 8-10

Thürling, K.; Baudrit, B.: Untersuchungen zum Einfluss des Schmelzefflusses auf die Nahtqualität beim Ultraschallsiegeln und Entwicklung einer Methode zur prozessnahen Charakterisierung der Ultraschallsiegelbarkeit von Packstoffen. Fraunhofer AVV, 2013, Abschlussbericht, AiF- Vorhaben 17194BG

Bach, S.; Thürling, K.; Majschak, J.-P.: Ultrasonic Sealing of Flexible Packaging Films – Principle and Characteristics of an Alternative Sealing Method. In: Packaging Technology and Science, 25 (4/2012), S. 233 – 248

Thürling, K.; Stephan, B.: Den Hot Spots auf der Spur. Analyse der Temperaturverteilung in Siegelnähten im Ultraschallprozess. In: Lebensmitteltechnik 44 (2012), Nr.6, S.60-61, ISSN: 0047-4290

Baudrit, B.; Dorbath, F.; Heidemeyer, P.; Bastian, M.; Thürling, K.; Majschak, J.-P.; Bach, S.: Ultraschallsiegeln von Verpackungsfolien. In: Joining plastics - Fügen von Kunststoffen 5 (2011), Nr.2, S.130-133, ISSN: 1864-3450

Bach, S.; Thürling, K.; Majschak, P.: Analysis and modelling of the heating and sealing behaviour of polymer films during ultrasonic sealing. In: Tagungsband P2010, 14th International Conference on Polymeric Materials, 2010, S. 180, ISBN 978-3-86829-282-4

Thürling, K.; Dorbath F.: Untersuchung des Einflusses der Materialeigenschaften einzelner Verbundschichten bei mehrschichtig aufgebauten Verpackungsfolien auf die Ultraschallsiegelbarkeit und Modellierung des Ultraschallsiegelvorgangs. Fraunhofer AVV, 2010, Abschlussbericht, AiF- Vorhaben 15809BG

Thürling, K.: Klärung zwischen Schall und Folie. In: Lebensmitteltechnik 42 (2010), Nr.7-8, S.44-45, ISSN: 0047-4290

Vorträge

Thürling, K.: Ultrasonic sealing. In „Dow Techtalks“ auf Messe K 2013, 18.10.2013 und 21.10.2013

Thürling, K.: IR-Thermografie als Analysemethode beim Ultraschallsiegeln von Folien. In: Thermografie-Tag „Forschung & Entwicklung“, 2012

Thürling, K.; Bach, S.; Majschak, J.-P.: Influence of material properties in the ultrasonic sealing behaviour of packaging films. In Tagungsband 25th International Association of Packaging Research Institutes (IAPRI) – Symposium on Packaging, 2011

Thürling, K.: Energy transformation mechanism during ultrasonic sealing of laminated films for packaging. In: Tagungsband 13th TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2011

Thürling, K.; Bach, S.: Ultrasonic sealing of packaging films – influencing material properties. In: Tagungsband International Congress on Engineering and Food (ICEF11), 2011, S. 109-110

Poster

Thürling, K.; Stephan, B.; Bach, S.; Majschak, J.-P.: "In situ" temperature measurement at ultrasonic sealing using infrared-thermography. In: Tagungsband 26th IAPRI Symposium on Packaging, 2013, ISBN 978-951-38-7434-6

Thürling, K.; Bach, S.; Kram, F.: Sealing Behavior of Modell-contaminated Sealant Surfaces. In: Tagungsband 13th TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2011

Bach, S.; Thürling, K.: Impact of multilayer film composition on ultrasonic sealing. In: Tagungsband 13th TAPPI Polymers, laminations & coatings conference, 2011

Thürling, K.; Bach, S.; Majschak, J.-P.: Ultrasonic sealing behaviour in context with material characteristics of packaging films. In: Tagungsband 5th International Conference on the Food Factory for the Future, 2010

Thürling, K.; Bach, S.; Nase, M.; Majschak, J.-P.: Influence of material parameters on ultrasonic sealing behavior of polymer films for packaging. In: Tagungsband P2010, 14th International Conference on Polymeric Materials, 2010, S. 274, Poster, ISBN 978-3-86829-282-4